

ВАЦЛАВ СМІЛ

СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННОГО МИРА

Материалы и дематериализация



Making the Modern World

Materials and Dematerialization

VACLAV SMIL
*Distinguished Professor Emeritus,
University of Manitoba,
Canada*

Создание современного мира

Материалы и дематериализация

ВАЦЛАВ СМИЛ

*Почетный профессор,
Университета Манитобы,
Канада*



**ФОНД ИНФРАСТРУКТУРНЫХ
И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ
ПРОГРАММ**

Группа РОСНАНО

Москва
2017

УДК 33; 574; 620.9
ББК 65:20.1:31
С 50

Making the Modern World: Materials and Dematerialization
by Vaclav Smil
Публикуется по соглашению с издательством John Wiley & Sons, Ltd.
(Великобритания)
при содействии Агентства Александра Корженевского (Россия)

Все права защищены. Перевод англоязычного издания разрешен издателем – Джон Вайли энд Санс Лимитед. Ответственность за достоверность перевода возлагается исключительно на ООО «Проф Лингва», Джон Вайли энд Санс Лимитед не несёт ответственности за перевод. Никакая часть настоящей публикации не может быть воспроизведена каким-либо образом без письменного разрешения первоначального владельца авторских прав – Джон Вайли энд Санс Лимитед.

Смил, Вацлав

С 50 Создание современного мира: материалы и дематериализация / Вацлав Смил.
– Москва: ООО «ПрофЛингва», 2017. – 296 с.

ISBN 978-1-119-94253-5

Потребление материалов в развитых странах все растет— когда придет пора остановиться? Приведет ли удельная дематериализация к абсолютному снижению потребности в материалах? Книга «Создавая современный мир. Материалы и дематериализация» анализирует и содержит ответы на эти и многие другие вопросы.

УДК 33; 574; 620.9
ББК 65:20.1:31

ISBN 978-1-119-94253-5

© John Wiley & Sons, Ltd., 2014
© ООО «Проф Лингва», перевод. 2017 год, Москва.
© ООО «Проф Лингва», электронный макет. 2017 год, Москва.

Об авторе

Вацлав Смил ведет междисциплинарные исследования во многих областях, в том числе в энергетике, экологии и демографии, занимается проблемами производства и потребления продовольствия, инновационных технологий, вопросами оценки рисков и государственной политики. Он опубликовал более 30 книг и около 500 научных работ по этим темам. Смил является заслуженным почетным профессором Университета Манитобы, научным сотрудником Королевского общества Канады (Академии наук), а также первым неамериканцем, удостоенным Премии Американской Ассоциации продвижения науки за содействие общественному пониманию науки и технологий; в 2010 году журнал *Foreign Policy* включил его в список 50 ведущих мировых мыслителей.

Предыдущие работы автора

China's Energy

Energy in the Developing World

(ред. соавт. с W. Knowland)

Energy Analysis in Agriculture

(в соавт. с P. Nachman и T.V. Long II)

Biomass Energies

The Bad Earth

Carbon Nitrogen Sulfur

Energy Food Environment

Energy in China's Modernization

General Energetics

China's Environmental Crisis

Global Ecology

Energy in World History

Cycles of Life

Energies

Feeding the World

Enriching the Earth

The Earth's Biosphere

Energy at the Crossroads

China's Past, China's Future

Creating the 20th Century

Transforming the 20th Century

Energy: A Beginner's Guide

Oil: A Beginner's Guide

Energy in Nature and Society

Global Catastrophes and Trends

Why America Is Not a New Rome

Energy Transitions

Energy Myths and Realities

Prime Movers of Globalization

Japan's Dietary Transition and Its Impacts

(в соавт. с K. Kobayashi)

Harvesting the Biosphere

Should We Eat Meat?

Уважаемые читатели!

Перед вами книга выдающегося экономиста и философа Вацлава Смила, который входит в число ста самых влиятельных мировых мыслителей по версии журнала Foreign Policy.

Она - о дематериализации. Нет, речь не о паранормальных и не о потусторонних явлениях. Речь о теме, которая, как ни странно, совершенно выпала и из общественных, и из профессиональных дискуссий в нашей стране. Бурные обсуждения блок-чейн, машинного обучения, больших данных, нейросетей, искусственного интеллекта и других, безусловно, важных технологических прорывов в мире информационно-телекоммуникационных технологий как-то заслонили от нас тот простой факт, что материальный мир, созданная человеком техносфера никуда не исчезли и не исчезнут. Более того, её масштабы, темпы роста, уровень влияния не только на жизнь современного человека, но и на всю нашу планету таковы, что не видеть и не изучать это было бы предельно легкомысленно. По понятным причинам наука давно и глубоко анализирует только один из аспектов этой темы, связанный с добычей и переработкой углеводородов, появилась даже научная дисциплина «Энергетический анализ». Но ведь современная техносфера состоит из материалов, которые когда-то были частью природы и извлечены из неё человеком. До сих пор здесь не работает даже классический экономико-математический аппарат, на основе которого строится межотраслевой баланс. Каковы масштабы глобального процесса добычи и переработки материалов, как он изменился за время активного воздействия человека, чего здесь ждать в будущем - всем этим серьёзная наука начала заниматься лишь в последней четверти XX века. Эта книга, как мне кажется, одно из наиболее профессиональных исследований в этой сфере.

Вацлав Смил подходит к анализу материальных потоков, созданных человеком, системно и целостно. От биоматериалов, полученных непосредственно из органической природы, до материалов микроэлектроники, от каменных орудий неолита до современного графена. Анализирует весь жизненный цикл - производство, использование, утилизацию и переработку. Читая его, задумываешься над тем, что понимание основных потоков материалов в созданной человеком техносфере сопоставимо по значимости с пониманием кругооборота воды в природе, которое все мы усвоили с начальных классов школы. Если современная наука, экономика, бизнес так сфокусированы на вопросах использования энергии: энергоэффективности, истощаемости энергоресурсов, воздействия на окружающую среду и, в особенности, на климатические изменения, то почему те же вопросы применительно к материалам

явно находятся на втором плане? Ведь даже на уровне здравого смысла понятно, что более прочные и более легкие материалы в конечных изделиях способны дать кумулятивный эффект по всей технологической цепочке их добычи, производства, транспортировки и обработки, включающий и материальную и энергетическую составляющую. Почему термин энергоэффективность стал совсем обыденным, а термин «материалоэффективность» вообще не получил права на существование?

Говоря об этом, Вацлав Смил описывает интегральные тренды по динамике производства и потребления базовых материалов - от нерудных строительных до чёрных и цветных металлов. Сводная картина в книге выглядит примерно так.

По мере технологического развития и роста уровня жизни наблюдается естественный рост потребления этих материалов. Затем, в какой-то момент, темпы этого роста замедляются и объёмы потребления выходят на плато - более или менее продолжительное с учётом специфики стран и самих материалов. Наконец, в последнее время в наиболее развитых странах можно говорить о начале сокращения потребления материалов, пусть и с небольшим темпом.

Эта исходная интуитивно вполне понятная картина осложняется двумя группами факторов, действующих в противоположные стороны.

В сторону роста потребления действует тот фактор, что снижение материалоемкости одного изделия приводит к его удешевлению и, следовательно, росту спроса на него. Это известный «парадокс Джевонса» открытый ещё в середине XIX века. На глобальном уровне он, естественно, усиливается экономическими прорывами крупных стран, прежде всего Китаем и Индией. Если верна теория о том, что XXII -ой век - это век Африки, это значит что на наших глазах устаревающая категория «золотой миллиард» достигнет к этому времени масштаба 5-7 миллиардов со всеми вытекающими отсюда последствиями по потреблению материалов.

В сторону снижения потребления действует собственно технический прогресс (что очень убедительно показано автором в том числе при анализе изменений веса двигателей внутреннего сгорания, приходящегося на один ватт мощности). Менее очевидные, но не менее важные для некоторых материалов факторы - утилизация и вторичная переработка, замена материалов на более современные. Любопытная особенность здесь, вскрытая автором - снижение материалоемкости совсем не обязательно приводит к снижению совокупной энергоёмкости с учётом всего жизненного цикла, что убедительно показано на примере замены стали на алюминий, который существенно легче, но более энергоёмок.

Автор прямо говорит о нежелании давать прогнозы, но все же дает описание главного тренда в потреблении материалов, вбирающего в себя и понижающие и повышающие факторы: «мы не увидим значительного снижения общего объёма добычи и производства материалов» и можно ожидать «...сокращение глобальных темпов роста ... в течение следующего одного-двух поколений» стр. 208. В целом вывод выглядит вполне здраво на общем фоне взвешенного анализа и ухода автора от соблазнов алармистских прогнозов.

Однако есть вопрос, в котором мне придётся вступить в полемику. Речь идёт о разделах 6.3 «Новые материалы и дематериализация» и 6.4 «Шансы на кардинальные изменения». В них автор вполне корректно описывает тренды в значимой для меня сфере наноматериалов, упоминает и графен, и углеродные нанотрубки. Однако

в этих упоминаниях, как мне кажется, автор не вскрыл тренд, который, возможно, как и раз и даёт шанс на кардинальные изменения.

Речь идёт именно об углеродных нанотрубках. Первое, что видно из авторского анализа - он вообще не отделяет многостенные и одностенные УНТ, в то время как сегодня уже очевидно, что это два совершенно разных по своим свойствам продукта. Уникальные физико-механические и электрические свойства одностенных УНТ хорошо известны. Чуть менее известна универсальность этого поразительного аддитива, добавление единиц или даже долей процентов которого способно на десятки процентов изменять физико-механические и электрические свойства базовых конструкционных материалов. Сейчас, когда компании Ocsial удалось освоить его промышленное производство и снизить цену примерно в 75 раз я считаю, что речь идёт о потенциальном годовом снижении объёма потребления самых массовых конструкционных материалов: цемента, пластмассы и металлов не на десятки, а на сотни миллионов тонн. Влияние этого тренда и на материальные потоки, и на связанный с ними спрос на энергию колоссально. Недавно по заказу «Роснано» было выполнено исследование, с тем чтобы ответить на вопрос - каков потенциал снижения глобальных выбросов CO₂ при массовом применении одностенных УНТ (<http://www.rusnano.com/projects/otchet-etap3>)? Ответ оказался поразительным - он больше, чем совокупное снижение CO₂ в мире за счёт всех видов возобновляемой энергетики!

Несмотря на наше расхождение с автором в оценке этого тренда, представленный в книге материал впервые на русском языке глубоко, системно и в то же время вполне доходчиво описывает базовые тренды в материальной составляющей техносферы. Книга изобилует богатейшим фактическим материалом, полезной статистикой и уникальной библиографией. Взвешенность и глубина изложения, как видим, не снижает его полемический потенциал. Отдельную благодарность стоит высказать редактору и переводчику за точный и ясный русский язык, вполне адекватный авторскому тексту.

Думаю, эту книгу стоит прочитать всем тем, кто интересуется не только броскими, но и глубинными трендами в современной техносфере, без понимания которых невозможно ни технологическое предпринимательство, ни само строительство инновационной экономики.

Анатолий Чубайс
Председатель Правления
Управляющей компании «РОСНАНО».

Содержание

<i>Предисловие: Почему и как</i>	xiii
1. Что включено	1
2. Как мы к этому пришли	11
2.1 Материалы, используемые организмами	12
2.2 Материалы в доисторические времена	17
2.3 Античные и средневековые материалы	21
2.4 Материалы раннего Нового времени	30
2.5 Создание современной цивилизации материалов	36
2.6 Материалы XX века	46
3. Самое вещественное	59
3.1 Биоматериалы	60
3.2 Строительные материалы	68
3.3 Металлы	75
3.4 Пластик	80
3.5 Промышленные газы	85
3.6 Удобрения	91
3.7 Материалы в электронике	94
4. О потоках материалов	99
4.1 Ведение отчетности по материальным потокам	101
4.2 Материальные потоки США	107
4.3 Европейская отчетность	112
4.4 Материалы в эпоху модернизации Китая	117
4.5 Энергозатраты на производство материалов	121
4.6 Оценки жизненных циклов	133
4.7 Переработка	143
5. Дематериализация: миф или реальность?	153
5.1 Мнимая дематериализация	154
5.2 Удельная дематериализация: снижение удельного веса	157
5.3 Последствия дематериализации	165

5.4 Удельная дематериализация в современной экономике	175
5.5 Снижение энергоемкости	182
5.6 Декарбонизация и сероочистка	191
6. Прогноз использования материалов	199
6.1 Природные ресурсы	201
6.2 Сокращение отходов	208
6.3 Новые материалы и дематериализация	213
6.4 Шансы на кардинальные изменения	218
Приложение А Единицы и кратные единицы	229
Приложение В Производство материалов, ВВП и население США, 1900–2005 гг.	231
Приложение С Мировое население, экономический продукт, производство продовольствия, основных материалов и топлива, 1900–2010 гг.	233
Приложение D Мировые энергозатраты на производство основных материалов в 2010 г.	235
Приложение E	237
<i>Список литературы</i>	239
<i>Указатель</i>	271

Предисловие: почему и как

История человечества — эволюция нашего вида, доисторический переход от собирательства к сельскому хозяйству, взлеты и падения цивилизаций Античности, Средневековья и Нового времени, экономический подъем последних двух столетий, механизация сельского хозяйства, диверсификация и автоматизация производственной безопасности, огромный рост потребления энергии, распространение новых коммуникационных и информационных сетей, а также впечатляющее улучшение качества жизни — все это было бы невозможно без постоянно растущего и все более сложного и комплексного использования материалов. Человеческая изобретательность сначала превращала эти материалы в простую одежду, инструменты, оружие и убежища, затем — в более сложные жилища, религиозные и погребальные сооружения, чистые металлы и их сплавы, а нынешние поколения превращают их в развитую промышленную и транспортную инфраструктуру, мегаполисы, синтетические и композитные соединения, а также материалы и условия, необходимые для создания нового электронного мира.

Прогресс в использовании материалов не был линейным; он состоял из двух неравных периодов. Сначала шел медленный рост от доисторических времен до начала быстрой модернизации экономики, которая началась в восемнадцатом веке в большинстве стран Европы, в девятнадцатом веке — в США, Канаде и Японии, а во второй половине двадцатого века — в Южной Америке, Китае и на Ближнем Востоке. Подавляющее большинство людей, живших до начала модернизации, обладали лишь ограниченным количеством простых вещей, которые создавались людьми самостоятельно или изготавливались ремесленниками в единственном экземпляре или небольшими партиями, при этом изделия, производимые в больших количествах, будь то предметы из металла, обожженные кирпичи и плитка, или стаканы, были слишком дорогими для большинства людей.

Основной причиной ограниченного применения материалов являлась нехватка энергии: в течение многих тысячелетий возможности человека по добыче, переработке и транспортировке биоматериалов и полезных ископаемых ограничивались возможностями живой тяги (то есть мышечной силы человека и животных), которая дополнялась простыми механическими устройствами и очень медленно совершенствовавшимися древними механическими движителями: парусами, водяными колесами и ветряными мельницами. И только преобразование химической энергии ископаемых видов топлива в недорогую и легко применяемую энергию механических двигателей — сначала на основе сжигания угля, на котором работали паровые двигатели, затем на основе внутреннего сгорания жидкого горючего и газов, слу-

жащих источником энергии для бензиновых, дизельных, а теперь и газотурбинных двигателей — дало толчок фундаментальным переменам и ознаменовало начало второй, быстро прогрессирующей, фазы потребления материалов. Развитие этой эпохи в дальнейшем ускорило за счет производства электроэнергии, а также появления промышленного химического синтеза, производящего широкий диапазон различных соединений: от удобрений до пластиков и медикаментов.

А затем и мир разделился на два лагеря: богатое меньшинство, управляющее огромными потоками материалов и превращающее их в здания, построенные на века, и в материальные и нематериальные потребительские товары; и бедное большинство, на чью долю приходится лишь небольшая часть запасов мира богачей. Перечень вещей, без которых большинство американцев, по их же словам, не может жить, включает автомобили, микроволновые печи, персональные компьютеры, посудомоечные машины, сушилки для одежды, а также системы кондиционирования воздуха (Taylor и соавт., 2006). Люди забыли, что все эти вещи появились лишь недавно: 50 лет назад многое из этого еще не было изобретено или встречалось очень редко. В 1960 году менее 20% американских семей имели посудомоечную машину, сушилку для одежды или кондиционер; только-только появился первый цветной телевизор, а микроволновых печей, видеомагнитофонов, компьютеров, мобильных телефонов и внедорожников еще и вовсе не существовало.

Напротив, те малоимущие жители в странах с низким уровнем дохода, которым повезло хотя бы иметь собственный дом, живут в убогих маленьких домиках из глиняного кирпича или дерева, и все их имущество — это кровать, несколько кастрюль для приготовления пищи и немного поношенной одежды. Тем из моих читателей, которые плохо представляют себе такое разделение по материальному признаку, стоит полистать альбом Питера Менцеля *“Material World: A Global Family Portrait”*, где содержатся фотографии семей из 30 разных стран. Все семьи сфотографированы на фоне своих жилищ и всего своего имущества (Menzel, 1995). Такому материальному контрасту в частной сфере соответствует и огромная пропасть между развитой и дорогостоящей инфраструктурой богатых стран (транспортные сети, города, высокопроизводительное сельское хозяйство, автоматизированное производство) и слабо развитой и неполноценной инфраструктурой бедных стран.

Анализ этого контраста показывает, что даже для того, чтобы уменьшить этот разрыв между двумя мирами, потребуются гигантские усилия по добыче и переработке сырья. В то же время рост потребления материалов вызывает обеспокоенность, поскольку это ведет к загрязнению и ухудшению состояния окружающей среды. Дальнейший рост потребления поставит под угрозу сохранность биосферы. При рассмотрении подобных эффектов возникает вопрос определения объема аспектов, подлежащих анализу. Необходим обоснованный и рациональный выбор таких аспектов, так как изучение всех потенциально анализируемых потоков материалов было бы непрактичным и, кроме того, отсутствует какое-либо общепринятое определение того, что должно быть включено в комплексную оценку современного использования материалов. Такое отсутствие стандартизации осложняется еще и тем, что в рамках некоторых аналитических работ применяется максималистский подход с включением всех потоков сырья и отходов, которые только можно проанализировать, включая «скрытые» потоки, связанные с добычей минералов, растени-

еводством, затратами кислорода на сгорание, выбросы газов, а также сброс отходов в воду или почву.

В других исследованиях, напротив, учитывалось только поддающееся гораздо более точному расчету непосредственное использование органических и неорганических материальных ресурсов, затрачиваемых национальными экономиками. Я буду придерживаться последнего подхода и подробнее остановлюсь на некоторых ключевых материалах (в зависимости от объема их применения или их незаменимости), используемых современной экономикой. Потребление материалов в огромных количествах вынуждает задать несколько фундаментальных вопросов. Насколько еще богатым странам следует нарастить потребление материалов? Связан ли дальнейший рост такого потребления с подлинным улучшением качества жизни? Насколько возможно отделить экономический рост и улучшение среднего уровня жизни от увеличения потребления материалов? Иными словами, приведет ли удельная дематериализация (сокращение расходов материала на единицу продукции или на выполнение единицы работы) к абсолютному снижению спроса на материал?

Чтобы ответить на эти вопросы наиболее убедительно, мне нужно проанализировать эволюцию использования материалов человеком, описать все основные материалы, их добычу, производство и основное применение, тщательно рассмотреть тенденции к повышению эффективности добычи, обработки, синтеза, конечного производства и распределения материалов, а также проанализировать энергозатраты и экологические последствия, связанные с увеличением потребления материалов. Как и в прочих моих книгах, я не буду давать никаких точных прогнозов касательно будущего использования материалов на общемировом уровне и уровне отдельных стран. Вместо этого я рассмотрю возможные меры по снижению нашей зависимости от материалов с сохранением высокого качества жизни и сокращением разрыва между богатыми и бедными экономиками.

Необходимо осознать, что в долгосрочной перспективе внедрения даже наиболее эффективных производственных процессов, наименее расточительных способов проектирования и производства, а также достижения максимально практичного использования переработанных материалов (в случаях, когда такая переработка возможна) может оказаться недостаточно для обеспечения такого уровня дематериализации, который позволит нивелировать отрицательные последствия возрастающего спроса на материалы, обусловленного непрерывным ростом численности населения и уровня жизни, а также всеобщим стремлением людей к накоплению материальных благ. Поэтому весьма вероятно наступление такой ситуации, в которой для исполнения наших желаний и одновременного сохранения целостности биосферы нам придется сделать осознанный выбор, который поможет сократить абсолютные значения потребления материалов и тем самым переопределить само понятие современных обществ, чье существование основывается на непрерывных и массивных потоках материалов.

1

Что включено

Любое исследование, направленное на изучение потоков материалов в современном обществе, их предпосылок и последствий, должно быть настолько всеобъемлющим, насколько возможно. Об этом легко говорить, но при попытке использовать такой подход на деле мы немедленно сталкиваемся с принципиальной проблемой: что представляет собой полный набор современных видов потребления материалов? Выбор здесь не очевиден, и общепринятого списка нет. Имеются только более-менее свободно (и более-менее осторожно) определенные границы того, что входит в этот список; реальность лучше всего иллюстрируется анализом диапазонов, охватываемых уже проведенными комплексными исследованиями, а также принятыми ведущими национальными и международными базами данных материальных потоков.

Первое сравнительное исследование ресурсных потоков на уровне государств (Adriaanse и соавт., 1997), подзаголовком которого стала фраза “*The Material Basis of Industrial Economies*” — «Материальная основа промышленных экономик» — не затрагивало воду и воздух; однако в нем рассматривались не только сельскохозяйственная (сырье, продукты питания и корма), лесохозяйственная и рыболовная продукция, добыча минералов и ископаемого топлива, но также и скрытые потоки (связанные с добычей, перемещением и потерей материалов), которые воздействуют на окружающую среду, но не имеют общепризнанной экономической ценности. В скрытых потоках преобладают вскрышные материалы, от которых приходится избавляться в ходе эксплуатации месторождений полезных ископаемых (в первую очередь добычи угля и руды открытым способом) и переработки отходов (в особенности потоков, связанных с отделением относительно редких металлов от пустой породы). Значительную часть таких потоков составляют почва, песок и скальные породы, которые необходимо убрать или сместить в ходе масштабных строительных работ, а также эрозия почв в полях и местах постоянных насаждений. Мониторинг скрытых потоков не проводится, и их количественная оценка является в лучшем случае приблизительной и зачастую базируется лишь на экспертных предположениях.

Это утверждение наиболее справедливо в отношении годовых значений скрытых потоков материалов, связанных с импортируемым сырьем: очевидно, что точность таких оценок нельзя гарантировать в отношении крупных экономик (США, Японии и Германии), когда речь идет об импорте широкого спектра материалов сразу из многих стран. Поэтому неудивительно, что в описываемом исследовании его авторы в своих расчетах решили обратиться к среднемировым показателям. Так, масса вскрышных пород¹ была принята за 0,48 тонны на тонну бокситов, 2 тонны на тонну железной руды. Такие глобальные обобщения, несомненно, приводят к значительным неточностям в расчетах, если использовать их вместо усредненных значений по конкретным странам. Темпы эрозии варьируются в еще большей степени; тщательные исследования на национальном уровне проводятся нечасто, и величины ежегодных потерь почвы могут различаться на порядок даже в пределах относительно небольших регионов, притом что в данном исследовании используются только показатели из реестра США. Еще одна неопределенность возникает в количественной оценке пастбищной травы, съедаемой крупным рогатым скотом, в то время как другие растительные корма для животных учтены в урожае сельскохозяйственных культур.

Через три года после проведения первого сравнительного исследования Институт мировых ресурсов (ИМР) начал другой проект, который был назван «Вес наций» — “The Weight of Nations” (Matthews и соавт., 2000). В этом исследовании рассматривались потоки материалов в четырех странах, проанализированных в первоначальной работе (США, Япония, Германия и Нидерланды), а также в Австрии; был охвачен период с 1975 по 1996 год (в первоначальной работе — по 1993 г.). Подзаголовок работы — «Материальные отходы развитых стран» (“*Material Outflows from Industrial Economies*”) — указывает на то, что ее основной темой стали результаты «метаболической» деятельности современных обществ. Как и в предыдущей работе, в данном проекте анализировались все ископаемые виды топлива, а также скрытые потоки, где основная доля приходится на вскрышные породы, и переработку отходов нефтяной и угольной промышленности.

Аналогичным образом оценивались потери, связанные с обработкой и удалением вскрышных пород, для всех нетопливных минералов и металлов. В отчете приводится количественная оценка почв, перемещенных в результате строительных работ, например, строительства дорог, возведения государственных и частных зданий, а также проведения дноуглубительных операций, потерь в результате эрозии почвы в сельском хозяйстве, а также отходов органического синтеза и фармацевтической промышленности. Но в отличие от оригинального исследования, в отчет 2000 года также вошли данные по некоторым другим исходным материалам (кислород, затрачиваемый в процессе горения и при дыхании), а также иным отходам, включая общее количество производимого при дыхании углекислого газа и водяного пара, образующегося в результате горения.

Отходы были разделены на три основные категории по среде, в которую они выбрасываются: воздух, почва, вода. В количественную оценку отходов, попадающих

¹ Вскрышные породы – горные породы, покрывающие и вмещающие полезное ископаемое, подлежащие выемке и перемещению как отвальный грунт в процессе открытых горных работ. (Источник: ГОСТ 17.5.1.01-83 «Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения»). – Прим. пер.

в воздух, вошли выбросы газов (CO_2 , CO , SO_x и NO_x , а также летучие органические углеводороды), включая кислород, вырабатываемый при сгорании, в оценку выбросов в почву включены твердые бытовые отходы, отходы предприятий и рассеиваемые субстанции, такие как навоз, удобрения, соль, которой покрывают дороги, стирающаяся с шин резина и испаряемые растворители, в составе выбросов в воду учитываются органические микропримеси, а также общая азотная и фосфатная нагрузка.

С 2000 года Евростат публикует ежегодные отчеты о внутреннем потреблении материалов во всех странах ЕС, при этом материалы дезагрегируются² на следующие категории: ископаемые виды топлива, биомасса (посевы и лесохозяйственная продукция), металлические руды и нерудные полезные ископаемые (European Commission, 2001; Eurostat, 2013). Методологические руководства Евростата по расчету потоков материалов в рамках национальной экономики подробно описывают методику расчета биомассы (продовольствия, корма и кормовых культур, фитомассы с пастбищ, древесины, рыбы, продуктов охоты и собирательства), металлических руд и нерудных полезных ископаемых. В руководствах также рассматриваются все ископаемые виды топлива и все рассеиваемые продукты, включая органические и минеральные удобрения, ил сточных вод, компост, пестициды, семена, дорожную соль и растворители (Eurostat, 2009; Schoer и соавт., 2012). Агрегированные³ данные Евростата затрагивают также и неиспользованные материалы (вскрышные породы, потери при производстве фитомассы, выемку грунта, дноуглубительные работы и морской прилов). Евростат производит количественную оценку выбросов (углекислый газ, выбросы в воду, отходы на свалках), но не учитывает кислород и воду.

В 1882 году Конгресс США обязал проводить ежегодный сбор статистики по минеральному сырью, вырабатываемому и используемому в стране. Сначала этим занималась Геологическая служба США, затем — Бюро шахт, а с 1995 года сбор статистики снова стал задачей Геологической службы (далее — ГС). На ее основе был подготовлен первый обзорный отчет о потоках материалов в Америке. Данные в отчете были агрегированы по категориям и охватывают период с 1990 по 1995 год (Matos and Wagner, 1998). В 2009 году был опубликован обновленный отчет с представлением данных по агрегированным категориям за период по 2006 год включительно; данные по отдельным элементам, соединениям и материалам обновляются ежегодно (USGS, 2013).

Пункты, включаемые ГС в ее отчеты по материалам, выбираются по принципу включения только третьего из вышеназванных классов материалов; топливо и продовольствие исключены из анализа. Агрегируются, таким образом, только те материалы, которые используются всеми отраслями внутренней экономики США. В данной серии отчетов приводятся итоговые годовые показатели внутреннего производства и потребления, экспорта и импорта. Исключены вода, кислород, скрытые потоки материалов, а также все ископаемые виды топлива, при этом включено сырье, производимое всеми видами сельскохозяйственной деятельности: хлопок, се-

² Вскрышные породы – горные породы, покрывающие и вмещающие полезное ископаемое, подлежащие выемке и перемещению как отвальный грунт в процессе открытых горных работ. (Источник: ГОСТ 17.5.1.01-83 «Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения»). – Прим. пер.

³ Агрегирование — соединение отдельных единиц или данных в единый показатель. Большой экономический словарь. — М.: Институт новой экономики. А. Н. Азрилиян. 1997. – Прим. пер.

мена, из которых получают промышленное масло, шерсть, мех, кожа, шелк и табак. Кроме того, отчеты содержат данные по лесохозяйственным материалам (все виды древесины, фанера, бумага и картон), металлам (от алюминия до цинка) и исчерпывающему списку нерудных минералов независимо от того, добываются ли они в их природном виде (гипс, графит или торф), обрабатываются перед дальнейшим использованием (измельченный камень или цемент) или синтезируются (аммиак). Также отчеты охватывают невозобновляемые органические материалы, получаемые из ископаемых видов топлива: асфальт, жидкий битум, воски, масла и смазочные материалы, а также любые разновидности твердого, жидкого или газообразного ископаемого топлива, используемого в качестве сырья в химическом синтезе.

Лишь немногие из этих исходных материалов используются в их первоначальном виде, так как практически все проходят какую-либо обработку: хлопок необходимо прясть, древесину — вываривать, руду — плавить, камень — крошить или резать и полировать. В свою очередь, обработанные материалы становятся исходными при производстве промежуточной и конечной продукции: хлопок превращается в швейные изделия, целлюлоза — в бумагу, плавленные металлы — в детали машин, а измельченный камень смешивают с песком и цементом, чтобы получить бетон. Такая подборка сведений о сельско- и лесохозяйственной продукции, металлах, промышленных минералах и невозобновляемой органике дает достаточно точное представление о годовых значениях потоков материалов в стране и долгосрочных изменениях в них. Несмотря на учет импорта и экспорта сырья, в описываемых отчетах не рассматриваются материалы, содержащиеся в конечной продукции, продаваемой и покупаемой Соединенными Штатами: ввиду их количества и разнообразия, сбор таких сведений сильно затруднен.

Что мы имеем в итоге? Когда потоки материалов исследуются *sensu lato* (в широком смысле, то есть учитывается практически любое используемое человеком вещество), анализ охватывает все, кроме важного исключения воды: не только биоматериалы, используемые в производстве товаров, все металлы и нерудные полезные ископаемые, все органическое сырье, но также и сельскохозяйственную фитомассу (урожай пищевых и кормовых культур, их остатки, фураж и трава на пастбищах), все виды топлива (полученные из биомассы и ископаемые) и кислород, необходимый для горения. Из исследований с более ограниченным охватом исключен кислород, а также все пищевые и кормовые культуры; в них рассматривается только сельскохозяйственное сырье, которое проходит дальнейшую обработку и становится товаром, при этом к объектам таких исследований также относятся вся фитомасса и ископаемые виды топлива. Отчеты Геологической службы США, например, являются примером исследования *sensu stricto* — в узком смысле: в нем рассматривается только биологическое сырье, подвергающееся дальнейшей обработке, и не рассматриваются кислород, вода, любые виды топлива (полученные из фитомассы или ископаемые), а также скрытые потоки материалов, оценка которых всегда затруднена. Мои предпочтения при определении границ анализа почти идеально совпадают с охватом исследований ГС, но вместо того, чтобы просто сослаться на эту авторитетную организацию, я вкратце объясню, почему я исключаю некоторые материалы.

Кислород, требуемый для сгорания топлива, исключается по простой и легко объяснимой причине: он входит в состав атмосферы, практически неисчерпаем и

«поставляется» бесплатно. Заявления об опасности истощения запасов O_2 за счет сгорания были опровергнуты очень давно (Vroesker, 1970). На полное сгорание 1 килограмма угля требуется 2,67 кг кислорода, на сжигание 1 кг углеводородов — 4 кг O_2 . На сжигание по всему миру порядка 8 миллиардов тонн ископаемого углерода в 2010 потребовался бы примерно 21 миллиард тонн O_2 , или порядка 0,0014% кислорода, содержащегося в атмосфере (количество, оцениваемое в 1,5 петатонны (1015 тонн)). И даже полное сжигание (что, очевидно, невозможно) всех мировых запасов ископаемых видов топлива по самым щедрым оценкам снизило бы содержание O_2 в атмосфере не более чем на 2%.

Таким образом, человечеству не грозит опасность сколь-либо значимого «сокращения поставок» кислорода, не говоря уже об исчерпании его запасов. Тем не менее если включить его в расчеты потоков материалов, он займет лидирующую позицию как в агрегированной статистике по отдельным странам, так и в общемировой. Например, по расчетам сравнительного исследования ИМР, в 1996 г. в США кислород составил 61% всех отходов непосредственной обработки материалов, в Японии в том же году — 65% (Matthews и соавт., 2000). Поэтому количественные значения потоков материалов в конкретных странах при учете потребностей в кислороде примерно соответствовали бы количеству сжигаемого в них ископаемого топлива.

Причины исключения скрытых потоков из отчетов по странам не менее убедительны: после исключения кислорода именно на них пришлась бы большая часть отходов внутреннего производства в тех странах, где ведется крупномасштабная добыча полезных ископаемых (особенно касается поверхностной добычи угля и руд) или имеются большие площади пахотных земель, подвергающихся значительной эрозии. Поэтому неудивительно, что после исключения кислорода в анализе ИМР на данные скрытые потоки пришлось 86% отходов внутреннего производства в США и Германии, и только 71% — в Японии, где добыча руд и выращивание сельхозкультур сильно ограничены (Matthews и соавт., 2000). Экологический эффект таких побочных потоков нельзя игнорировать при анализе конкретной сельскохозяйственной или добывающей деятельности; тем не менее точная количественная оценка в таких случаях невозможна. Основная доля в нем приходится на непригодные земляные и скальные породы, шахтные отвалы, отходы переработки и эродированную почву. Грунт и скальные породы, перемещенные в рамках строительных работ, составляют относительно малую часть.

Однако основной проблемой, возникающей при попытке включить в анализ скрытые потоки, является не главенствующее положение отходов внутреннего производства крупных и диверсифицированных экономик — в этом как раз нет ничего удивительного — а, скорее, неизбирательное включение нескольких категорий, которые качественно не сопоставимы. Неиспользованный камень, оставшийся в карьере по окончании его эксплуатации, не несет экологической нагрузки и даже не портит вид своим присутствием; а когда карьер заливают водой, чтобы создать искусственное озеро, данный материал действительно станет скрытым как часть нового и весьма приятного глазу пейзажа. А вот в результате обработки бокситов при добыче глинозема (в качестве одного из очень многих распространенных примеров) остаются большие объемы токсичных отходов (включая тяжелые металлы); нередко такие отходы бывают несколько радиоактивны и очень едки (то есть с высоким pH).

Не менее важной является разница между скрытыми потоками, возникающими *in situ* (на месте) в результате добычи ископаемых (оставленный камень, песчаные и щебневые карьеры, угольные и рудные шахты, где остались кучи, свалки, слои, глубокие ямы или впадины, заполненные неиспользуемыми ископаемыми и отходами переработки), и эрозией почвы, обусловленной дождями и ветрами, которые смещают ценные верхние слои почвы даже не на десятки или сотни, а на тысячи километров в направлении ветра или течения воды. В первом примере отходы могут быть весьма неприглядны, но далеко не токсичны, и их влияние на экологию за пределами непосредственной близости оказывается незначительным, если вообще есть; а вот эрозия имеет общемировое значение, представляет серьезную угрозу в отдельных регионах и может быть весьма разрушительна для них, так как значительно снижает урожайность полей и потоки ила, способствует эвтрофикации⁴ пресных и прибрежных вод, а также приводит к продолжительной деградации экосистемы и значительным экономическим потерям.

Я исключил воду из анализа по нескольким соображениям, основывающимся на том, что этот незаменимый исходный материал лучше исследовать отдельно, а не включать в общие материальные потребности современной экономики. Первая и самая очевидная причина связана с количественной оценкой: во всем мире, за исключением пустынных регионов, вода составляет большую часть материальных потоков, поэтому исследование ее потребления привело бы к ошибочному занижению показателей тех исходных материалов, годовые статистические показатели по которым малы по сравнению с расходом воды, несмотря на их незаменимость. Так, в 2005 году суммарный водозабор превысил 5 миллиардов тонн (Kenney и соавт., 2009), в то время как масса всех материалов, непосредственно используемых в экономике страны (большую часть которых составляют песок, гравий и камень, используемые в строительных работах), суммарно не превысила 3,8 миллиарда тонн (USGS, 2013).

Более того, имеются фундаментальные качественные различия между этими двумя статистическими показателями. Наиболее объемная доля водозабора — порядка 60% от общей массы воды — приходится на охлаждение тепловых электростанций. Такая вода практически не расходуется, так как почти сразу же — за вычетом небольшой доли испарившейся воды — может использоваться в других целях. А вот материалы, ставшие частью многолетних сооружений и изделий длительного хранения и эксплуатации, практически никогда не используются повторно или лишь частично перерабатываются после долгого отсутствия в обращении. На втором месте в структуре расхода воды стоит орошение, на которое пришлось порядка 30% общего водозабора в США в 2005 году. Однако де-факто орошение тоже не является значительной статьей расхода, так как практически вся вода испаряется из растений, вновь попадает в атмосферу, постепенно конденсируется и выпадает в виде осадков.

⁴ Эвтрофикация (от греч. *eutrophia* — хорошее питание) — обогащение рек и озер биогенными элементами, сопровождающееся повышением продуктивности вод. Эвтрофикация может быть результатом естественного старения водоема, внесения удобрений или загрязнения сточными (в том числе с полей) водами. Искусственно несбалансированная эвтрофикация может приводить к бурному развитию водорослей («цветению» вод), дефициту кислорода и гибели рыб и других животных. (Источник: *Большой Энциклопедический словарь*. 2000). — Прим. пер.

Если же включение воды в спектр такого анализа обосновывается вопросами нехватки ресурсов, то важно различать воду, источником которой являются обильные осадки, и воду, забор которой несет огромные материальные затраты и осуществляется из иссякающих водоносных горизонтов, восполнение которых невозможно за период существования цивилизации.

На данный момент было бы лучше обратить внимание на иную — относительно менее значимую — проблему агрегированных показателей таких материальных потоков, которые, насколько мне известно, никак не рассматривались организациями, занимающимися сбором статистики на уровне отдельных стран или всего мира. Речь идет о содержании воды в песке и собранной биомассе. Даже при рассмотрении только тех биоматериалов, которые используются в производстве в качестве исходных, содержание воды в них варьируется от менее 15% в невытой шерсти до 50% в свежесрубленных деревьях. Разброс еще более значителен для урожайных культур: от 5% в сухих семенах до более 90% в свежих овощах.

Песок, который только что был извлечен из карьера, более чем на 30% состоит из воды, в очищенном песке ее остается 15–25%, хранение в обезвоживающих бункерах уменьшает этот уровень до 6%, а дальнейшая сушка во вращающихся барабанах или сушилках с кипящим слоем снижает содержание влаги в песках, которые будут использоваться в сталелитейном производстве или гидравлическом фракционировании под давлением, до 0,5%. Очевидно, что наилучшим решением является сбор данных по сухой массе влагосодержащих материалов: только так их можно сравнивать с материалами, которые влагу не содержат. Однако на практике такой сбор статистики не проводится, и поэтому доля воды в страновых агрегированных данных по материалам весьма значительна.

Продукты питания и топливо совершенно незаменимы для выживания любой цивилизации, и их объемы стали особенно значительными в современных высокоэнергетических обществах, члены которых питаются очень обильно и разнообразно, в то время как традиционные виды биотоплива остаются важными в странах с низким уровнем дохода. Кроме того, в отличие от воды и кислорода, включение продуктов питания и топлива в анализ ничуть не умалит значения других материальных потоков: так, даже в богатых топливом Соединенных Штатах годовой расход угля, сырой нефти и природного газа составляет около 50% расхода всех ископаемых, не являющихся энергоносителями. Тогда зачем я их исключаю? Исключение продовольствия и топлива оправданно не только потому, что эти две основные категории потребления традиционно изучаются по отдельности, благодаря чему можно найти немало литературы, научных достижений и перспектив в отношении их исследования, но еще и потому, что они не являются материалами *sensu stricto*⁵, то есть веществами, многократно используемыми в их первичном виде или преобразуемыми в конечную продукцию, подлежащую более-менее длительной эксплуатации.

В отличие от биологического сырья (древесины, шерсти, хлопка, кожи и шелка), металлов и нерудных полезных ископаемых, а также невозобновляемой органики (асфальта, смазочных материалов, восков, углеводородного сырья), продукты питания и топливо не используются в строительстве долговременных сооружений, не

⁵ *sensu stricto* — в буквальном смысле (лат.). — Прим. пер.

преобразуются ни в один из промышленных, транспортных и потребительских продуктов как кратковременной, так и долговременной эксплуатации из их все расширяющегося списка. Пища быстро метаболизируется для получения энергии и питательных веществ, затрачиваемых на рост и деятельность человека; топливо быстро окисляется (сгорает) для прямого или опосредованного производства разных видов полезной энергии (тепла, движения, света). Ни то, ни другое не увеличивает материальные запасы современного общества.

Наконец, я должен высказаться в защиту концептуального изменения, касающегося обработки материалов, которые в материальных балансах Евросоюза отнесены к категории рассеиваемых. По определению ЕС имеется восемь категорий потерь при рассеивании и все они представляют собой качественно несопоставимые отходы: некоторые из них можно суммировать и рассматривать как незначительный общий поток материалов (например, растворители, остающиеся после сухой чистки, или следы от резиновых шин на дорогах); другие более существенны (например, навоз, ил сточных вод, а также компост, разбрасываемый на пахотных землях); однако мониторинг ни по одной из этих категорий не ведется, что затрудняет их количественную оценку. Геологическая служба США учитывает самый значимый поток материалов в данной категории (соль и другие снегоплавильные реагенты, включая песок и абразивы, которыми покрывают дороги зимой, а также азотные, фосфатные удобрения и хлористый калий, применяемые для сельхозкультур и газонов) путем включения его в группу промышленных минералов.

В то время как запасов соли и песка предостаточно и производство этих материалов не является энергоемким, неорганические удобрения являются критически важными исходными материалами в любом современном обществе. Игнорировать их нельзя, и поэтому, рассматривая прогресс в производстве синтетических материалов, я уделю им внимание. Тем не менее хотелось бы подчеркнуть, что количество оставшихся рассеиваемых материалов относительно невелико, и его заведомо неточная оценка, скорее, перечеркнет всю пользу включения подобных материалов в общую статистику потребления. В то время как объемы навоза и ила сточных вод достаточно велики, они, скорее, относятся к переработке воды, нежели к биомассе: ил как минимум на 80% состоит из воды, свежий навоз — на 70–85%; более того, во многих (возможно, даже в большинстве) случаях ил сточных вод не подлежит переработке, так как содержит тяжелые металлы, патогенные микроорганизмы, остатки пестицидов и химических препаратов, стероиды и гормоны.

Таким образом, я бы хотел добавить к списку Геологической службы только 1 категорию: промышленные газы. В то время как воздух (кислород) необходим для сгорания ископаемых видов топлива, которые являются основным источником энергии в современной цивилизации, учет воздуха в суммарном объеме исходных материалов, как я уже объяснял выше, внесет путаницу и неясность аналогично учету всех вариантов использования воды; однако учет газов, выделенных из воздуха с целью их применения в промышленности, — уже совершенно иной вопрос. Если рассматривать только количественные показатели, то общемировые объемы использования кислорода, водорода, азота и редких газов, таких как аргон или ксе-

нон, относительно невелики; однако с качественной точки зрения они незаменимы во многих отраслях: от сталеплавильного производства (кислородно-конвертерные печи являются основным средством производства металла) до синтеза аммиака (используются азот, выделенный из воздуха, и водород, высвобожденный из метана) и энергосберегающего освещения.

Как мы к этому пришли

Биосфера Земли полна организмов, которые используют материалы не только в процессе обмена веществ. Более того, совокупные объемы материалов, которыми распоряжается человечество, не кажутся исключительно высокими по сравнению с работой морских биоминерализаторов (например, панцирных и двустворчатых моллюсков, ракообразных, кораллов и проч.). Однако уникальной чертой человечества является сочетание объема, конкретных особенностей и возрастающей сложности способов взаимодействия с материалами: добычи, обработки и превращения их в конкретное исходное сырье, предназначенное для создания инфраструктуры и большого количества различной продукции. Чтобы рассмотреть данный вопрос с более широкой эволюционной точки зрения, я бы сначала хотел описать некоторые наиболее примечательные способы взаимодействия живых организмов с материалами, начиная от морского фитопланктона и заканчивая приматами. Такие способы интересны либо масштабами материальных потоков, либо своими уникальными качественными характеристиками.

Затем я вкратце опишу историю использования материалов человеком: сначала расскажу о важных вехах доисторического периода, где основное внимание уделю до сих пор не изученным до конца подвигам возведения мегалитов, строители которых были вынуждены добывать, транспортировать и затем удивительно точно размещать огромные камни. Затем я проведу анализ и количественную оценку наиболее примечательных примеров использования традиционных материалов (камня и дерева) в эпоху Античности, в Средневековье и раннее Новое время (1500–1800), уделяя основное внимание прогрессу в дорожном строительстве, возведении акведуков, церемониальных и религиозных сооружений, а также кораблестроению; расскажу о происхождении и развитии металлургии, а также о материалах, используемых в быту.

Глава закончится двумя тесно связанными разделами, описывающими создание современной цивилизации материалов в девятнадцатом веке, а также ее пространственное расширение и постоянное усложнение после 1900 года. Я сосредоточусь

на ключевых количественных и качественных изменениях в использовании материалов; именно на тех изменениях, что упростили добычу ископаемого топлива, способствовали развитию промышленности и городов, эволюции современных видов наземного, водного и воздушного транспорта и создали основу для общества двадцатого века. Основой прогресса в данном случае стали материалы, производство которых требует больших энергозатрат и чье появление и использование динамически связано с достижением новых научных и технических высот. В свою очередь, новые материалы послужили основой наращивания объемов пищевого производства и позволили улучшить санитарные условия, что весьма положительно сказалось на качестве жизни. Новые материалы также помогли расширить возможности механизированного и автоматизированного производства, перемещения на большие расстояния, обмена информацией и телекоммуникаций.

2.1 Материалы, используемые организмами

Все организмы используют какие-либо материалы: на этом основывается метаболизм. Глобальный фотосинтез — основа жизни в биосфере — создает новую биомассу, затрачивая на это ежегодно более 60 миллиардов тонн углерода, поглощаемого листьями в виде CO_2 из атмосферы (Smil, 2013), а также миллионы тонн других ключевых макроэлементов — азота, фосфора и калия, поглощаемых корнями. Из этих элементов образуются сложные соединения, служащие основой формирования растительных тканей и органов. Однако метаболические потребности, отражающиеся в пищевых потребностях гетеротрофов, будь то плотоядные, травоядные или всеядные организмы, обычно не считаются использованием материалов: данное понятие охватывает только активную экstrasоматическую⁶ деятельность.

Способы использования материалов можно разделить на пять основных категорий. Самым редким (и наименее значимым с точки зрения совокупного объема материалов) является использование собранных природных материалов в качестве инструмента. Ко второй категории — также с очень ограниченным совокупным воздействием — относится использование секретлируемых материалов для защиты или охоты (последнее очень впечатляюще делают пауки). Следующая категория — удаление материалов биомассы (в настоящее время в том числе и антропогенных) и их целенаправленное размещение в ином месте с целью возведения подчас довольно сложных сооружений — от бобровых плотин до замысловатых птичьих гнезд. Еще одним способом применения материалов является перемещение почвы и глины (термитники, норы и подземные ходы грызунов). Наконец, к самой масштабной категории относится выделение минералов из воды, как правило, для формирования экзоскелета; в этом процессе преобладают морские биоминерализаторы, в том числе фитопланктон, кораллы и моллюски.

Использование инструментов отмечалось и подробно описано у таких разнообразных видов, как выдры и чайки, слоны и вьюрки (Shumaker и соавт., 2011); одна-

⁶ Экstrasоматический — (от лат. *extra* — «сверх», «вне» и греч. *soma* — «тело») — находящийся вне организма, внетелесный. — *Прим. пер.*

ко наибольшей сложностью и развитостью использование инструментов отличается у шимпанзе, которые с помощью листьев, травы и стеблей собирают термитов или вскрывают орехи каменными наковальнями. Инструментальные навыки у шимпанзе стали столь сложны, что привели к появлению различных культур (Wrangham и соавт., 1996; Boesch and Tomasello, 1998; Whiten и соавт., 1999). Паучий шелк можно определенно назвать самым примечательным секретлируемым материалом, ведь по прочности на разрыв он сравним с качественной сталью (Brunetta and Craig, 2010). Противоположностью им можно назвать пенообразные гнезда из секрета личинок церкопидных.

Использование собираемых материалов является довольно распространенным явлением среди гетеротрофов. Даже одноклеточные амобы могут строить передвижные, замысловатые и украшенные домики из песчаного зерна, диаметр которых не превышает 150 мкм (Hansell, 2007). Пожалуй, самым интересным примером собирательства среди насекомых является деятельность муравьев-листорезов из рода *Atta*, которые собирают листья, тащат их в свои искусно вырытые гнезда, в камерах которых они выращивают грибы (Hölldobler and Wilson, 1990). А бобры активно собирают древесину и строят из нее свои плотины. Однако наибольшим разнообразием отличаются птичьи гнезда, порой весьма впечатляющие. Они варьируются от простых и довольно беспорядочных куч веток и стеблей до весьма замысловатых строений птиц семейства ткачиковых, в строительстве гнезда, которых может быть использован один вид собираемого материала или же целое множество таких материалов (Gould и соавт., 2007; Burke, 2012).

Птицы используют не только широкий ряд собранных растительных тканей (от тонких листьев травы до тяжелых стеблей, которыми пользуются аисты и орлы), но и перья других видов птиц и паучий шелк, что характерно для многих представителей семейства воробьиных. Некоторые гнезда состоят из тысяч отдельных частей. Использование грязи (например, ласточками) – сравнительно редкое явление, однако многие птицы, гнездящиеся на земле (включая пингвинов), собирают мелкие камешки для своих гнезд. Некоторые шалашники Австралии и Новой Гвинеи строят весьма сложные конструкции, чтобы привлечь самок, и украшают свои строения не только яркими и цветастыми природными объектами вроде ракушек, ягод или листьев, но и выброшенными предметами из пластика, металла или стекла. Некоторые особи даже устраивают своего рода площадки для спаривания, и самка, принимающая ухаживания, оказывается в очень яркой визуальной среде (Endler и соавт., 2010). Гнезда из собранных материалов встречаются и у насекомых: бумажная оса нарежет тонкие кусочки дерева и смешивает их со своей слюной; пилюльная оса строит цилиндрические гнезда из грязи. А вот приматы, наши ближайшие родственники среди животных, строят только примитивные временные конструкции из веток и листьев, располагающиеся на земле или в деревьях.

Землеройные виды чаще занимаются рытьем туннелей, нор и гнезд; однако они также могут строить наземные конструкции из почвы и глины. Считается, что первые норы появились еще в океанах докембрийского периода 650–700 млн лет назад, что совпало с появлением крупных хищников. Как показал Дарвин в своей последней опубликованной книге, дождевые черви могут столь эффективно перемещать землю, пропуская ее частички через свой кишечник и выбрасывая их комками на

поверхность, что за очень короткое время могли бы буквально похоронить памятники человеческой деятельности (Darwin, 1881). Грызуны также являются весьма трудолюбивыми строителями и создают обширные подземные сети туннелей и гнезд, помогающие контролировать температуру и вентиляцию, а также спастись в случае опасности.

С точки зрения совокупного объема перемещения и использования почв в субтропических и тропических лесах абсолютным рекордсменом являются термиты. Они строят впечатляюще высокие и объемные термитники, которые не только служат укрытием огромным колониям, но также обеспечивают принудительную вентиляцию за счет разности давлений (Turner, 2000).

Плотность биомассы этих бесчисленных теплолюбивых насекомых варьируется от 2 г/м² в тропических лесах Амазонии (Barros и соавт., 2002) до примерно 5 г/м² в австралийском штате Квинсленд (Holt and Easy, 1993); и до 10 г/м² в Атлантических лесах северо-восточного бразильского штата Сан-Паулу, а также в сухих вечнозеленых лесах северо-восточного Таиланда (Vasconcellos, 2010); в саваннах Африки их суммарная биомасса в сыром весе может быть в два раза больше биомассы слонов (Inoue и соавт., 2001). Виды, принадлежащие роду *Macrotermes*, строят конические термитники из частиц глины. Высота таких термитников обычно составляет 2–3 метра, но может достигать 9 метров при диаметре основания 2–3 метра, но нередко встречаются и более широкие термитники.

Масса термитника составляет (вместе со стенами и гнездовьем) от 4 до 7 тонн, а вот плотность термитников сильно варьируется от 1–2 до 10 на гектар (Fleming and Loveridge, 2003; Abe и соавт., 2011; Tilahun и соавт., 2012). Таким образом, общая масса термитников составляет от 4–8 т/га до 15–60 т/га. По наиболее консервативным оценкам, на строительство термитников затрачено 5 миллиардов тонн глины (порядка 5 тонн на гектар при 10 млн кв. км общей площади тропических и субтропических лугов, где проживают насекомые, строящие подобные сооружения). Однако фактическое значение может быть в несколько раз больше. В любом случае ежегодный расход материалов такими маленькими гетеротрофами сравним с общемировой добычей человеком металлических руд и нетопливных ископаемых по состоянию на начало двадцать первого века.

Совокупная масса материалов, собираемых позвоночными для строительства, а также масса почвы, перемещаемой роющими гетеротрофами, например, дождевыми червями и термитами, ничтожна по сравнению с массой веществ, выделяемых видами, способными к биоминерализации, прежде всего фитопланктоном, простейшими и беспозвоночными. Более 30 биогенных минералов (две трети из которых – карбонаты) продуцируются небольшим числом мхов и сосудистых растений, а также животными от губок до хордовых, некоторыми грибами, многими прокариотами и отдельными видами бактерий (Lowenstam, 1981; Boskey, 2003). Некоторые организмы, способные к биоминерализации, откладывают минералы на органических матрицах, однако в большинстве своем такие организмы продуцируют внеклеточные кристаллы, похожие на те, что выпадают при кристаллизации неорганических растворов.

Большая доля массы потребляемых природных материалов приходится на морские биоминерализующие организмы, способные выделять неорганические соеди-

нения из химических веществ, поглощаемых из воды. Такие организмы создают кальцитовые или арагонитовые раковины из углекислого кальция CaCO_3 . Кальцит и арагонит практически идентичны, они различаются только кристаллической структурой ($2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+} = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$). Наиболее впечатляющими колониальными биоминерализующими организмами являются рифообразующие кораллы (класс коралловые полипы, тип стрекающие), в то время как кокколитофориды (морской известняковый планктон типа *Prymnesiophyceae*) прячутся в сложных кальцитовых микроструктурах размером менее 20 мкм, а фораминиферы (амебовидные простейшие одноименного типа) создают пористые микроараковины. Одноклеточные кокколитофориды водятся в изобилии на глубинах, куда проникает свет, практически во всех морских средах Северного полушария, а также вплоть до 50 градуса южной широты в Южном океане (O'Brien и соавт., 2012). Именно они вызывают цветение океана, которое может длиться неделями и покрывать площадь около 105 км² поверхности океана и легко обнаруживается на спутниковых снимках.

Кокколитофориды укрываются кокколитами, которые формируются внутри клетки и затем выдавливаются из нее, образуя защитный слой; нередко кокколиты отделяются от клеток и свободно плавают в воде. В «цветущих» таким образом прибрежных водах соотношение кокколитов к числу кокколитофоридовых клеток составляет порядка 200–400; в открытых водах оно гораздо ниже: от 20 до 40. Роды *Syracosphaera*, *Umbellosphaera* и *Gephyrocapsa* встречаются довольно часто, а вот *Emiliana huxleyi* является ведущим продуцентом кальцита в биосфере (Stanley и соавт., 2005; Eoekel and Baumann, 2008). Этот вид необычен еще и тем, что быстро продуцирует достаточно крупные кокколиты, причем половину из них сбрасывает. Кроме того, в отличие от многих других видов планктона, этот вид сравнительно молод: он возник всего лишь около 270 тысяч лет назад.

Глубина зоны, куда проникает свет и возможен фотосинтез (ее называют фотической зоной), может составлять от нескольких метров до примерно 200 м; плотность кокколитофоридов варьируется от нескольких тысяч клеток на литр до более 100 000 клеток на литр в момент цветения. Темпы кальцификации также разнятся от 10 до 80 пикограммов кальцита на клетку в день; площадь крупнейших зон цветения может достигать 105 км² в течение нескольких недель, а за год разрастаться до 1,5 млн км² (Lampert и соавт., 2002; Eoekel and Baumann, 2008). Ввиду такой естественной вариативности невозможно дать сколько-нибудь достоверную оценку мирового годового уровня кокколитофорид-опосредованной кальцификации в океане, однако, исходя из наиболее консервативных предположений, можно представить себе хотя бы порядок этой величины.

Если принять, что кокколитофоридная кальцификация идет непрерывно на 60% площади Мирового океана на глубинах не более 50 м, при этом средняя концентрация составляет 25 тыс. кл./л, а скорость кальцификации — 10 пг кальцита на клетку в день, то ежегодно они перерабатывают по всему миру примерно 900 миллионов тонн кальцита. При менее консервативной оценке (50 000 кл./л, 20 пг/клетко-день) годовой выход составит порядка 3,7 миллиарда тонн кальцита. По сравнению с этим процессом, постоянно протекающим во всем океане, периодическое цветение, хоть и выглядит впечатляюще, не вносит сколь-либо значительного вклада. Цветение площадью 250 000 км² в Северо-Восточной Атлантике в июне 1991 года демонстри-

рвало скорость кальцификации до 1,5 мг углерода на м³ в час, благодаря чему менее чем за месяц из кальцита было извлечено порядка 1 миллиона тонн углерода (Fernández и соавт., 1993). Следовательно, они переработали немногим более 8 миллионов тонн кальцита; если применить аналогичные показатели ко всем цветениям кокколитофоридов, которые ежегодно покрывают порядка 1,5 млн км², то суммарный объем составит всего лишь около 50 миллионов тонн кальцита.

Величину того же порядка получим, если примем глубину высокопродуктивной фотической зоны за 50 м, плотность за 150 000 кл. /л, а скорость кальцификации за 70 пг на клетку в день при средней продолжительности цветения 30 дней; соответственно, в течение года кокколитофоридами в периоды цветения перерабатывается порядка 25 миллионов тонн кальцита. Таким образом, объем кальцификации с помощью кокколитофоридов по наиболее консервативным оценкам составляет несколько миллиардов тонн в год, что относительно немного с геологической точки зрения, так как высокое соотношение магния и кальция и низкая абсолютная концентрация кальция в нынешнем океане ограничивают продуктивность большинства существующих видов (Stanley и соавт., 2005). Наиболее очевидным свидетельством высокой продуктивности кокколитофоридов в прошлом являются огромные объемы переработанного кальцита в меловых отложениях мелового и третичного периодов (включая белые скалы Дувра).

Кремний – еще один минерал, который массово усваивается морскими микроорганизмами, прежде всего диатомовыми водорослями, силикофлагеллятами и радиоляриями. С помощью кремниевой кислоты (Si(OH)₄) они создают свои сложные структуры из опала (гидратированного аморфного биогенного диоксида кремния SiO₂·0.4H₂O). По оценкам Tréguer и соавт. (1995), такими организмами поглощается около 7 миллиардов тонн кремния в год. Это означает, что общая масса известняковых и кремниевых материалов, поглощаемых ежегодно морским фитопланктоном, составляет десятки миллиардов тонн в год, что превышает общую добычу всех металлических руд и примерно равняется массе ежегодно добываемого ископаемого топлива (угля, сырой нефти и природного газа).

По сравнению с переработкой кальция и кремния морскими микроорганизмами, объемы совокупного потребления этих элементов иными живыми существами на порядок меньше, однако продукты их деятельности зачастую не только отличаются сложностью и совершенством исполнения, но и необыкновенной красотой. Это относится к раковинам многих моллюсков: у некоторых они просты, но у других отличаются весьма интересной геометрией (Abbott and Dance, 2000). Карбонаты также выделяются рептилиями и птицами и входят в состав яичной скорлупы; а улитки формируют из этих материалов свои раковины. Любопытно, что ведущий исследователь, занимающийся изучением создаваемых животными структур, не включает такую деятельность в свой анализ: Ханселл (Hansell, 2007) признает, что Большой Барьерный риф, возможно (согласно общепринятому описанию), является самой большой структурой в мире, воздвигнутой живыми организмами, однако в своих книгах основное внимание уделяет только таким конструкциям, создание которых требует определенных действий, что не относится к коралловым полипам и кокколитофоридам, которые просто секретируют свой скелетный материал.

2.2 Материалы в доисторические времена

Эволюцию гомининов — человекообразных, отделившихся от предков шимпанзе более 5 миллионов лет назад и постепенно давших начало нашему виду, следует, скорее, рассматривать как динамичную параллельную эволюцию нескольких специфических признаков, сделавших нас людьми: прямохождение, выносливость при беге, коллективная охота, мясоедение, символическая коммуникация и изготовление орудий, то есть превращение природных материалов в объекты, которые простым, но практичным образом расширяют и приумножают физические возможности человека. Поэтому в археологической хронологии эволюции гомининов прогресс в изготовлении каменных орудий отслеживается практически так же четко, как и изменения в костной структуре, питании и общественном строе.

Считается, что старейшие каменные орудия нижнего палеолита, найденные в Восточной Африке (ущелье Олдувай в Танзании, Афарский треугольник и местность Кооби Фора на восточном берегу озера Туркана), были изготовлены около 2,6 млн лет назад, однако нельзя исключать и их более раннее происхождение (Davidson and McGraw, 2005). За миллионы лет совокупная масса камня, ушедшего на изготовление орудий эпохи палеолита (закончившейся примерно 10 тысяч лет назад), а затем и артефактов неолита, оставалась мизерной, так как популяция гомининов исчислялась десятками или сотнями тысяч и около полумиллиона лет тому назад не превышала 125 тысяч. Общее число современных людей (следы *Homo sapiens* однозначно идентифицируются в окаменелостях, возраст которых насчитывает около 190 000 лет) сократилось до примерно 10 тысяч в результате извержения супервулкана Тоба, произошедшего 74 тысяч лет назад (Harpending и соавт., 1998; Ambrose, 1998), но затем увеличилось до нескольких миллионов к моменту появления первых оседлых земледельческих обществ (примерно 10 тысяч лет назад).

Так как общая численность населения была невысокой, очевидно, что при изготовлении орудий из камня количество и массовое производство не играют роли, так как важны специфические качества и навыки, необходимые для получения нужных форм и остроты граней. Obsидиан (вулканическое стекло, образующееся в результате быстрого охлаждения магмы) и кремень (кристаллический кварц) были лучшими материалами для создания режущих кромок и острых наконечников путем скалывания; ударные и измельчительные орудия изготавливались из базальта, риолита и нефрита посредством заточки. Пожалуй, самой значимой инновацией стало изменение свойств камня путем нагревания: имеются неопровержимые доказательства, что уже 164 тысячи лет назад люди обрабатывали камень с помощью огня, чтобы он лучше расслаивался (Brown и соавт., 2009).

Как подтверждают многочисленные находки как в Старом, так и в Новом Свете, плодом труда древних ремесленников, сочетавших грамотный выбор камней и надлежащие методы обработки (термообработки и искусного отслаивания, дробления или шлифования), становились тёсла и топоры, молоты и шила, стрелы и наконечники копий, а также ножи. Все эти инструменты были хорошо проработаны, эргономичны, практичны и приятны на вид. А вот деревянных орудий с тех времен осталось немного; в основном сохранились те, которые были погребены в анаэробных слоях. Гоминины, несомненно, пользовались деревянными палками для выкапыва-

ния корней и дубинками для охоты на мелких животных, но искусно изготовленное оружие из дерева появилось намного позже. Хотя некоторых крупных травоядных можно было убить безо всякого оружия, например, тщательно спланировав панику среди буйволов и вынудив их прыгать со скал (самым известным примером является обрыв Хед-Смэшт-Ин-Баффало-Джамп неподалеку от Форта МакЛеод в канадской провинции Альберта (Frison, 1987)), то для охоты на представителей мегафауны, от мамонтов до антилоп канна, обычно требовалось стрелковое или метательное оружие.

Самыми древними — и, что удивительно, хорошо сохранившимися — примерами являются метательные копия, найденные в Германии в 1996 году: шесть копий длиной 2,25 м, изготовленных из древесины ели примерно 380–400 тыс. лет назад (Thieme, 1997), то есть почти за 200 тысяч лет до появления нашего вида (Trinkhaus, 2005). Новые данные с места раскопок Кэти Пэн 1 в ЮАР (типы переломов, изменения у насада и распределение повреждений на кромке) указывают на то, что уже 500 000 лет назад каменные наконечники насаживались на концы копий; таким образом выяснилось, что первые многокомпонентные инструменты, насаженные на рукоять, появились на 200 тысяч лет раньше, чем считалось до этого (Wilkins и соавт., 2012).

Другие конструктивные типы деревянных орудий, помогающих добывать пищу, появились намного позже. Точно определить дату появления первых луков (изготовленных из наиболее подходящей древесины, прежде всего тиса, белого ясеня, лже-акации и маклюры оранжевой) и стрел (заостренных деревянных или с каменными наконечниками) все еще не удастся, однако уже в позднем палеолите такое оружие использовалось повсеместно. Охотничьи палки из дерева или бивней мамонта использовались в Евразии задолго до появления австралийского бумеранга около 10 тысяч лет назад. Невозможно точно определить, когда люди начали пользоваться рыболовными сетями, так как они изготавливались из гибких стеблей или сучьев, которые быстро разлагались. Самой старой из найденных сетей, сделанной из тонких веточек ивы и найденной в финской Карелии, примерно 10 тысяч лет (Miettinen и соавт., 2008).

Охотники-собиратели, не имевшие постоянного жилища, не оставили никаких следов своих временных укрытий, строившихся из ветвей, травы, тростника или пальмового листа. Старейшими сохранившимися компонентами таких жилищ являются, конечно, упорядоченные камни, из которых сооружались защитные конструкции (стены и крыши), а также бивни и кости мамонта (из которых строились стены), лесоматериалы и шкуры. В отличие от исчезнувших жилищ охотников-собирателей (за исключением пещер, некоторые из которых украшены оставленной охотниками неолита великолепной настенной росписью с изображениями животных), археологами были найдены тысячи фундаментов домов, сараев и складских помещений многих доземледельческих и земледельческих обществ. Обычно полная реконструкция таких строений времен неолита не представляется возможной, и остается только догадываться о том, как на самом деле использовалось дерево (тонкие стволы небольших деревьев и ветви), тростник, солома и глина при возведении стен и потолков. Охотники-собиратели времен неолита строили также свои первые деревянные лодки: старейшим раскопанным экземпляром — канэ простейшей конструкции, вырезанным из цельного ствола дерева — около 10 тысяч лет.

Хотя доисторические общества обходились без металла, некоторым удавалось модифицировать свойства минералов, создавая обожженную керамическую посуду. На раскопках некоторых древнейших постоянных поселений обнаружены признаки того, что их жители пользовались негашеной известью. Процесс изготовления этого материала по сложности сравним с выплавкой руды. Чтобы извлечь негашеную известь (CaO) из известняка (CaCO_3), каменную породу сначала дробили вручную на осколки примерно одного размера (удаляя при этом слишком мелкие кусочки и пыль, чтобы сохранять пористость); обжиг сначала осуществлялся в ямах, устланных дровами и измельченным известняком, позднее стали пользоваться небольшими каменными сооружениями (печами для обжига), что позволило ограничить зону горения и сконцентрировать жар, необходимый для кальцинации.

После длительного обжига начиналась самая опасная операция, а именно удаление едкой негашеной извести, которая, вступая в реакцию с водой (включая влагу на коже, глазах или в легких), вызывает сильное раздражение и может загореться, в то время как попадание ее пыли в желудок вызывает боль в животе и рвоту. Путем контролируемого добавления воды к негашеной извести получают гидратную (гашеную) известь (Ca(OH)_2 , гидроксид кальция) — ключевой ингредиент белил, строительного раствора и штукатурки. Процесс производства извести, очевидно, весьма сложен и требует тщательного планирования (собрать достаточное количество дров, подготовить подходящую яму или печь) и контроля (температура внутри печи должна достичь как минимум 825°C и поддерживаться на этом уровне в течение долгого времени) — и тем не менее в Гёбекли Тепе (Турция) были найдены строения, созданные с применением извести, относящиеся примерно к 9600 г. до н. э. (Courland, 2011). Таким образом, печной обжиг известняка стал первым успешным производственным процессом, базирующемся на химической реакции, при этом его основная часть практически не менялась до девятнадцатого века.

Во многих общинах собирателей-охотников, работавших с деревом и камнем, люди также освоили обжиг формованной глины, научившись таким образом производить керамику; именно керамика стала первым примером изготовления утилитарных или декоративных объектов из общедоступных минералов (Cooper, 2000). Обжиг испаряет воду из формованной глины, закрепляя и упрочняя ее окончательную форму. Обжиг небольших глиняных изделий производится при относительно низкой температуре в $500\text{--}600^\circ\text{C}$. Древнейшим предметом керамики, изготовленным по такой технологии, является знаменитая Вестоничская Венера из Моравии — статуя обнаженной женщины высотой 11,1 см, изготовленная охотниками-собирателями времени палеолита 25–29 тысяч лет назад (Vandiver и соавт., 1989). Для изготовления более крупных утилитарных предметов простой керамики необходима температура порядка 1000°C , и хотя такой температуры можно достичь на короткое время в кострищах (ямах) или насыпях, каменные печи намного эффективнее. Самые ранние керамические изделия, несомненно, обжигались в ямах, при этом недавние находки — особенно сделанные в Азии — отодвигают их датировку все дальше и дальше.

Судя по артефактам, обнаруженным в пещере Сяньжэньдун (в северной части китайской провинции Цзянси), охотники верхнего палеолита на территории Китая обжигали небольшие сосуды уже 19–20 тысяч лет назад (Wu и соавт., 2012). Воз-

раст японских Дзёмон — керамических изделий с веревочным орнаментом (сначала это были разнообразные круглодонные чаши высотой до 50; затем — большие плоскодонные сосуды для хранения и приготовления пищи) — составляет до 12 тысяч лет (Набу, 2004). После 6000 года до н. э. керамические изделия — сосуды, чаши, кубки, вазы, тарелки, фигурки, многие из которых были искусно украшены, иные обжигались при высокой температуре, чтобы повысить прочность — стали широко использоваться по всей Европе, что подтверждают многочисленные находки керамических изделий, изготовленных после 5500 года до н. э., в Германии, Чехии и Австрии (где их называют общим термином *Bandkeramik*), на Ближнем Востоке (египетская керамика отличалась особым разнообразием как по форме, так по используемым материалам) и в Восточной Азии. Именно тогда появился и получил широкое применение гончарный круг, который в умелых руках позволял достичь идеальной требуемой формы.

Доземледельческие и протоземледельческие общества также оставили за собой практически неразрушимые мегалитические сооружения, начиная с примечательных каменных кругов с резным рельефом, изображающим животных, в Гёбекли-Тепе. Особенно высокая концентрация мегалитических памятников отмечается в Западной Европе от Пиренейского полуострова через Францию и Британию до Северной Германии. К таким памятникам относятся менгиры (одиночные камни, обычно расположенные вертикально, но некоторые из них лежат горизонтально), сгруппированные стоячие камни, как, например, знаменитые параллельные ряды в Карнаке (Южная Бретань), Стоунхендж и строения близ Эйвбери (возведение началось в позднем неолите ок. 2800 г. до н. э.); наиболее распространенным видом памятников (порядка 5000) являются гробницы со ступенчатыми крышами или сводами, под которыми нередко можно найти замковые камни (Daniel, 1980).

Несмотря на многовековую историю гипотез и десятки лет междисциплинарных научных исследований, до сих пор не удается окончательно объяснить, какими методами эти огромные камни были извлечены, как их перемещали по пересеченной местности и как они были установлены в соответствии с заранее определенной схемой, порой очень точно соответствующей положению небесных тел в определенные даты. Особенно много вопросов вызывает организация транспортировки этих камней, так как и масса груза, и расстояние по прямой зачастую были весьма значительными. Внутренний круг Стоунхенджа состоит из 80 четырехтонных монолитов песчаника, которые были добыты в горах Пресели юго-западного Уэльса примерно в 380 километрах от равнины Солсбери; следовательно, в их транспортировке были задействованы суда прибрежного плавания. Хотя камни для внешнего круга были добыты в Мальборо Даунс всего в 32 километрах от Стоунхенджа, их перемещение являлось еще более сложной логистической задачей, так как они весили по 50 тонн (Thorpe and Williams-Thorpe, 1991).

Наконец, нет никаких сомнений в том, что первые текстильные материалы появились еще в доисторические времена, но точную хронологию предложить невозможно, так как природные материалы, из которых изготавливалась одежда, плохо сохраняются (Ginsburg, 1991). Костяные швейные иглы, с помощью которых люди шили теплую одежду, необходимую для выживания при температурах ледникового

периода, были обычным явлением в Европе солютрейского периода верхнего палеолита (примерно 21–17 тысяч лет назад). Первые изделия, целенаправленно вырезанные из шкур животных и древесных материалов (листьев и волокон коры) и обработанные для придания им нужной формы, давно сгнили, поэтому определить дату их появления невозможно. Дубление кожи, позволяющее ей сохранять свою упругость при низкой температуре, также определенно возникло в доисторические времена, но определить технологии изготовления (применение минералов или растительных материалов) удалось только для месопотамского и египетского наследия. Лучшим примером качества и функциональности доисторических одеяний, изготавливавшихся собирателями времен неолита, являются *annuraangit* — кожаные и меховые одежды инуитов, обеспечивающие отличную защиту в условиях Арктики (Oakes, 2005). Лен начали ткать еще до того, как это растение было одомашнено на Ближнем Востоке более 10 тысяч лет назад; размер семян указывает на то, что уже к третьему тысячелетию до н. э. в Европе к северу от Альп выращивались разные виды льна — для получения масла и для изготовления волокна (Zeist and Bakker-Heeres, 1975; Karg, 2011). Хлопок начали выращивать в Азии примерно 7000 лет назад, значительно позже этим занялись в Мезоамерике; филогенетические исследования показывают, что его афро-азиатские и американские виды независимо друг от друга развились из своих диких прародителей, но в результате одомашнивания стали морфологически схожими (Wendel и соавт., 1999). Прimitивные ткацкие станки, на которых изготавливалась грубая льняная ткань, появились примерно 6000 лет назад; грубую шерсть пряли и плели еще более 10 000 лет назад; шерстистые овцы были одомашнены примерно 8000 лет назад, однако понадобилось еще 2000 лет на то, чтобы изобрести первую шерстяную ткань (Broudy, 2000).

2.3 Античные и средневековые материалы

Материальный мир старейших оседлых общин, которые благодаря хорошим урожаям и росту населения смогли основать первые города и обосноваться в них, зависел от непосредственного окружения того или иного поселения. Поэтому жилища могли представлять собой пещеры, выкопанные в иле (в китайском Шэньси) или известняке (в Центральной Анатолии), легкие деревянные каркасы со стенами из бамбука и глины в Японии, строения из необожженного кирпича к югу от Сахары, кропотливо сложенные каменные дома в Средиземноморье и высокогорной Азии, из массивных бревен — в Скандинавии и России, из обожженного кирпича или цементированного камня — в континентальной Атлантической Европе.

Среда обитания была стратегически важной еще по одной причине. Как указывает Адсхед (Adshead, 1997), в Китае и в Восточной Азии в целом люди предпочитали легкие деревянные дома, а не прочные каменные и кирпичные строения европейского типа из-за частых и весьма разрушительных землетрясений; а я бы указал также на ежегодные тайфуны и крупные наводнения. Еще одной причиной было то, что китайцы предпочитали низкие первоначальные затраты при высокой стоимости обслуживания, что прямо противоположно европейскому подходу. Значимы здесь и исторические реалии: в Европе Средних веков и времен Возрождения люди восхи-

щались монументальными каменными строениями Римской империи и пытались им подражать.

Некоторые из первых оседлых общин быстро освоили строительство монументальных сооружений, для возведения которых требовались не только изобретательные методы добычи камня и его транспортировки к месту строительства, но и (что в корне отличает такие сооружения от доисторических мегалитов) тщательная, порой весьма детальная и точная резка камня и сборка массивных конструкций либо производство и кладка кирпича в огромных количествах. Некоторые из древних обществ также создали весьма сложную инфраструктуру для обслуживания своих растущих городов; лучшим примером можно назвать римские акведуки. Первые оседлые общества Ближнего Востока, Средиземноморья и Восточной Азии были также первыми цивилизациями, представители которых научились плавить металл. Поначалу это были только медь и олово, а плавильные работы не отличались большими масштабами, так как металл использовался только в военных и декоративных целях; но позже они также освоили производство цинка, свинца, железа, ртути, серебра и золота.

На Ближнем Востоке, в Индии и Европе железо стало основным металлом примерно после 1200 г. до н. э.; через некоторое время кустарное производство обеспечивало поставку этого металла в количествах, достаточных для производства гвоздей, используемых в строительстве и кораблестроении, изготовления подков, инструментов и деталей механизмов, а также многочисленных видов оружия. Такое развитие металлургии сподвигло Кристиана Томсена (1836) разделить историю эволюции материалов на три века: каменный, бронзовый и железный; однако такая последовательность была не повсеместной, так как в истории некоторых обществ — лучшим примером которых является, пожалуй, Египет до 2000 г. до н. э. — имелся и медный век, а другие общества перешли из каменного века сразу в железный, минуя бронзовый. В любом случае с точки зрения совокупных материальных потоков все доиндустриальные общества оставались в деревянном веке: в лесной среде именно древесина была повсеместным материалом, из которого изготавливались инструменты, посуда, принадлежности и механизмы.

Когда люди впервые стали применять древесину в качестве строительного материала, использовавшаяся ими древесная фитомасса представляла собой мелкие стволы, ветви, кустарники, и только когда появились каменные тёсла (а затем — хорошие металлические топоры), а люди приобрели необходимые навыки плотничества, стали появляться массивные бревенчатые дома из специально формованных и соединяемых пиломатериалов; еще позже возникли металлические пилы, с помощью которых изготавливались доски и иные элементы с точной нарезкой. Как правило, дома в доиндустриальные времена строились плохо и долговечностью не отличались; однако те из них, которые были построены надлежащим образом, оказывались на удивление прочными даже в муссонном климате, где они подвергались воздействию обильных дождей. Так, деревья, ушедшие на постройку пагоды Хорю-дзи в Японии — старейшей из сохранившихся деревянных построек, — были срублены 1400 лет назад.

Примечательно, что японские (а также корейские и китайские) дома строились без крепежей; вместо этого их каркасы, балки и крыши скреплялись очень точны-

ми врезными и пазовыми соединениями, что не только позволяло дереву свободно расширяться и сжиматься под воздействием колебаний атмосферной влажности, но и выдерживать частые землетрясения. Более того, высокие пагоды, по сути, были неуязвимы для землетрясений благодаря *синбасира* (心柱)— центральному столбу, который не использовался в качестве опорного, а действовал, скорее, как массивный стабилизирующий маятник (Atsushi, 1995). Аналогичный принцип используется при строительстве современных небоскребов, в верхних частях которых подвешиваются огромные бетонные или стальные блоки.

Дерево также было единственным материалом, использовавшимся в античные времена и средневековые для изготовления корпусов и мачт океанских судов. Маленькие речные лодки изготавливались из ствола одного дерева; согласно Гомеру, Одиссей срубил 20 деревьев, чтобы построить свой корабль (*Одиссея* 5:23). Масса этих деревьев составила 10–12 тонн. Египетские суда, на которых переправлялись каменные обелиски, были значительно тяжелее, а вот корабли, впервые пересекшие Атлантический океан, — удивительно легкими: на строительство одного судна викингов (если исходить из данных хорошо сохранившегося гокстадского судна, построенного примерно в 890 г. н. э.) требовалась древесина 74 дубов (включая 16 пар весел). Типичное средиземноморское судно было небольшим и в течение тысячелетия со времен падения Римской империи до начала первых больших межконтинентальных морских экспедиций конца пятнадцатого века практически не менялось в размерах.

Благодаря своей прочности камень был наиболее предпочтительным материалом при строительстве постоянных конструкций (акведуков и дорог), погребальных (пирамид и гробниц), а также религиозных и церемониальных сооружений (храмов, порталов, дворцов, башен, обелисков и статуй). Многие каменные строения впечатляют своим размером, но особенно выделяются египетские пирамиды в Гизе: пирамида Хеопса остается крупнейшим когда-либо воздвигнутым сооружением из камня (при высоте 195 метров на ее возведение потребовалось 2,5 миллиона камней средней массой 2,5 тонны), при этом более шести миллионов тонн камня были уложены с вызывающей восхищение точностью. На ее фоне великие мезоамериканские пирамиды (Теотиуакана и Холула) кажутся менее впечатляющими, и не только потому, что Пирамида Солнца с плоской крышей в Теотиуакане немногим выше 70 метров (вместе с храмом), но и потому, что изнутри она в основном состоит из почвы, щебня и сырцового кирпича и только снаружи отделана камнем и оштукатурена известковым раствором.

Другие каменные строения примечательны широкой распространенностью, некоторые — сложностью и кажущейся воздушностью, которая контрастирует с тяжестью материала (средневековые соборы), некоторые представляют собой пример невероятно точной подгонки и размещения камней. Во времена Римской империи большая часть камня уходила на строительство грамотно сконструированных акведуков (включая эстакадные мосты, дюкеры (напорные водоводы), а также распределительные сети в городах) и обширной дорожной сети (*cursus publicus*); а вот монументальные сооружения, за исключением триумфальных арок, строились из кирпича, облицованного мрамором. Каменные памятники весьма замысловатой конструкции часто встречаются в Южной и Юго-Восточной Азии (включая Ангор-

Ват – крупнейший в мире индуистский храм в Камбодже и Борободур – крупнейший в мире буддийский памятник на о. Ява), а также в Мезоамерике и Южной Америке (памятники цивилизации майя, ацтеков и инков, включая камни очень точной резки, из которых состоит комплекс Пума Пунку близ Тиауанако в Боливии). Самым большим каменным сооружением Африки является овальная стена города Большой Зимбабве; на ее строительство, начавшееся после 1100 года н. э., потребовалось около 1 миллиона каменных блоков (Ndogo, 1997).

В средневековой Европе каменная архитектура достигла беспрецедентных высот как в прямом, так и в переносном смысле: европейцы начали строить весьма смелые и сложные сооружения, такие как огромные соборы с арочными сводами, арочными контрфорсами и высокими шпилями (Fitchen, 1961; Schutz, 2002). Прак (2011) пишет, что такого прогресса удалось достичь благодаря удивительно простым основополагающим принципам модульных конструкций (лично передаваемым конструкторами и строителями друг другу), которые на месте дополнялись некоторыми экспериментальными решениями. Наиболее очевидным общим элементом каменной строительной индустрии является добыча камня в карьерах (эта задача была наиболее сложна для древних строителей; например, в распоряжении каменщиков Древнего Египта имелись только медные стамески и долеритовые молоты), очень точная отеска, нередко — необходимость в транспортировке материала по суше и воде на большие расстояния, а также весьма изобретательные способы размещения массивных компонентов. Даже сегодня мы поражаемся изобретательности и мастерству тех, кто занимался добычей, транспортировкой и обработкой этих огромных камней, продумывал схемы и организацию их укладки, часто с очень малыми допусками.

Это в особенности относится к монолитам (использовавшимся для создания статуй, стел или обелисков: восемь из них римляне привезли из Древнего Египта), оставшимся от древних цивилизаций: нам по-прежнему остается только догадываться, какие технологии и какие методы организации строительных работ понадобились для возведения пирамид на плато Гиза или для точнейшей подгонки многоугольных камней, составляющих массивные стены Саксайуамана и Ольянтайтамбо – памятников архитектуры инков. Мы также не знаем точно, как древним египтянам удалось организовать перевозку тысячетонной каменной статуи кораблем по Нилу на расстояние 270 км от Асуана до Фив. Неудивительно, что точные детали хода строительства этих сооружений остаются неизвестными: единственное, в чем мы можем быть уверены, так это в том, что это потребовало тщательного планирования и весьма эффективного управления поставками материалов и строительными работами, что особенно верно для тех строений, которые были завершены в, как нам сейчас представляется, невероятно короткие сроки.

Так, на возведение крупнейшей из египетских пирамид ушло всего 20 лет (2703–2683 г. до н. э.). Парфенон, хоть и отличается простой стоечно-балочной конструкцией, может похвастаться лучшими пропорциями в истории, при этом он был построен всего за 15 лет (447–432 г. до н. э.). Великолепный собор Святой Софии в Константинополе — относительно «легкое» строение, впечатляющее в основном своими огромными сводами — и вовсе удалось построить менее чем за пять лет (527–532). При этом от закладки фундамента и до освящения некоторых европей-

ских соборов проходили столетия: так, строительство Нотр-Дама длилось почти два столетия, с 1163 по 1345 год; собор Святого Вита, сейчас являющийся главной достопримечательностью Пражского Града, был начат в 1344-м и закончен только в 1929 г.

Очевидно, что мы не можем количественно оценить ежегодный расход объема или массы строительного камня в античных или средневековых обществах; однако можно рассчитать расход материалов в некоторых из наиболее масштабных проектов. Так, порядок величины расхода материалов на дороги древних римлян можно определить следующим образом: возьмем за среднюю ширину дороги 4 метра (ширина сохранившихся итальянских *via* составляет от 2,4 до 7,5 метра), за минимальную глубину — 1 метр (дороги состояли из брусчатки поверх слоев гравия, гальки, глины и песка). Если не учитывать последующие ремонтные работы, на первоначальное строительство 85 тысяч километров основных дорог потребовалось бы 425 млн м³ заполнителя (песка и гравия) и карьерной породы. На аллювиальных (наносных) равнинах основным строительным материалом стал глиняный кирпич: зиккураты, дворцы и стены в царствах Месопотамии строились как из самана (сырцового кирпича), так и из более качественного обожженного. Кирпич был необходим для строительного бума в имперском Риме, когда для строительства массивных сооружений потребовался относительно недорогой и быстрый в изготовлении материал, который к тому же можно было производить на месте. Внешняя же отделка таких зданий была мраморной. Поначалу кирпичи делались из трамбованной глины — обычной смеси глины, воды, песка, рубленой соломы или навоза, которая укладывалась в деревянные формы, а затем высушивалась на солнце.

Шумеры, вавилоняне и ассирийцы изготавливали такие кирпичи в огромных количествах; так, в Вавилоне был даже принят стандартный формат кирпича: квадратные призмы 40 × 40 × 10 см, из которых строились дома, дворцы и башни. Поскольку такие кирпичи не отличаются хорошим качеством, даже самые массивные сооружения со временем превратились в кучи глины. Исключения весьма немногочисленны, и среди них прежде всего необходимо отметить Чога Занбиль — частично сохранившийся памятник эламской архитектуры в иранском Хузестане: три этажа из пяти все еще стоят (Porada, 1965). Остальные же ступенчатые храмовые башни с плоскими крышами — знаменитые месопотамские зиккураты, — построенные после 2200 г. до н. э., сейчас являют собой лишь небольшие насыпи на пустошах. Кирпичи, обожженные в дровяных или угольных печах, впервые начали использовать в Месопотамии; они также были широко распространены в античной Европе и Азии, оставаясь важнейшим повсеместным строительным материалом для многих народов Старого Света до появления бетона и конструкционной стали.

Узкие и продолговатые римские кирпичи (45 × 30 × 3,75 см) облицовывались мрамором во всех монументальных строениях; однако даже после того, как этот защитный слой разрушился, они хорошо сохранялись в сухом средиземноморском климате, где их низкая теплопроводность помогала поддерживать прохладную температуру в помещениях жарким летом. Из кирпича римляне также строили здания с удивительно широкими сводчатыми потолками. У римлян было множество разных способов кладки кирпича и использования его в сочетании с камнем и деревом (наиболее распространенными технологиями были *opus reticulatum*, *vittatum*, *mixtum*, и

testaceum). Все эти способы хорошо видно на руинах древних строений, лишившихся мраморной облицовки.

Строения из обожженного кирпича оказались более прочными (хотя, естественно, нуждались в некотором ремонте) даже в тропическом климате Азии. Так, многие ступы (*stūpa* в переводе с санскрита означает буквально «куча земли») — огромные конструкты, схожие с курганами и предназначенные для хранения буддийских реликвий, — сохранились в течение более тысячи лет (Longhurst, 1979). К наиболее замечательным примерам таких массивных сооружений из обожженного кирпича относятся ступа Махабодхи (храм Бодхгая), построенная на месте просветления Будды 2500 лет назад, облицованная песчаником великая ступа в деревне Санчи близ Бхопала (диаметр основания — 36 метров, высота — 15 метров), ступа Пхра Патхом Чеди в Таиланде и 122-метровая Джетаванарама в Анурадхапуре, Шри-Ланка, построенная примерно 1700 лет назад (Bandaranayake, 1974; Pant, 1976). На строительство Джетаванарамаи ушло, по разным оценкам, от 93 до 200 миллионов кирпичей, на 60% состоящих из мелкозернистого песка и на 35% из глины (Leach, 1959).

Обожженная керамика и каменная керамика (последняя после обжига отличается гораздо более низким водопоглощением) также использовались для изготовления кровельной, напольной и декоративной плитки. Керамическая кровельная плитка или черепица широко использовалась в средиземноморских регионах, начиная с античных времен, хотя наиболее ранние экземпляры глазурованного кирпича и декоративной плитки можно найти даже в еще более древних месопотамских строениях. Некоторое время спустя напольную и стенную плитку стали производить с весьма разнообразной отделкой (глазурованная и неглазурованная, мозаичная и с ручной росписью); особо замысловатым и интересным плиточным орнаментом отличались работы средневековых строителей мусульманского мира, которые хорошо умели подбирать цвета и форму. Несколько менее красочная древняя традиция использования плитки также наблюдается в некоторых европейских странах, в особенности в Италии, Испании и Португалии.

В морской торговле средиземноморских стран основным видом контейнеров были глиняные амфоры (Twede, 2002). В этих керамических кувшинах люди перевозили вино, оливковое масло, а также обработанные пищевые продукты, например, римский рыбный соус под названием *garum*. Римляне также пользовались деревянными бочками; умелые ремесленники-бондари изготавливали такие бочки из клёпок из твердых пород древесины, стянутых железными обручами; на одну типичную бочку уходило около 50–60 кг древесины (Twede, 2005). В Средние века именно в таких бочках европейцы хранили и перевозили жидкости, а также маринованные и соленые продукты. Фарфор является самым качественным материалом, производимым из обожженной глины, а именно из каолина — мягкой белой каолиновой глины, незаменимой в изготовлении изысканных керамических изделий. Этот материал был изобретен примерно в шестнадцатом веке до н. э. (во времена династии Шан) в Китае; вскоре его начали производить также в Японии и Корее. Нарушить восточноазиатскую монополию удалось только в начале восемнадцатого века, когда настоящий фарфор начали производить и в Европе: сначала в Германии и Франции, затем и в Великобритании (Atterbury, 1982).

Возведение прочных сооружений из кирпича и плитки требовало хорошего связующего материала. Первые глино-грязевые растворы были слабыми; превосходный цементирующий материал удалось создать благодаря кальцинации известняка (CaCO_3), в результате которой получается негашеная известь CaO , из которой, в свою очередь, делается гашеная известь Ca(OH)_2 . Как уже было сказано ранее, сушка известняка предшествовала эпохе древнейших централизованных империй, а гашеная известь повсеместно использовалась уже в Древнем Египте. Давидовиц (2002) вызвал немало споров своими утверждениями о том, что блоки, из которых построены пирамиды в Гизе, не были карьерным камнем. По его мнению, они состоят из смеси гранулированного известнякового заполнителя и щелочного связующего соединения на алюминиево-силикатной основе; заливка блоков осуществлялась на месте. Хотя эта гипотеза отвергнута большинством египтологов, она до сих пор находит своих сторонников даже среди материаловедов.

Римлянам приписывают изобретение бетона, но это не совсем так. Бетон является смесью цемента, наполнителей (песка и гальки) и воды. В свою очередь, цемент является тонкоизмельченной смесью известняка, глины и металлических оксидов, обожженных в печах при высокой температуре. В римском *opus cementitium* не было цемента; эта смесь, достаточно прочная для применения в строительстве огромных сводов и куполов, не являлась тем, что мы сейчас называем бетоном. *Opus cementitium* содержал наполнители (песок, гравий, камни, обломки кирпичей и плитки) и воду, однако связующим компонентом был известковый раствор (Adam, 1994). Смесью гашеной извести и вулканического песка, добытого вблизи ПUTEОЛИ около горы Везувий (*pulvere puteolano*, позже стала известной как пуццолан), обладала превосходными свойствами, могла затвердевать даже под водой и использовалась в строительстве не только массивных и прочных стен, но и великолепных сводов. Кессонированный потолок Пантеона (118–126 г. н. э.) с пролетом купола 43,2 м оставался непревзойденным в течение почти двух тысячелетий (хотя купол Сан-Пьетро, спроектированный Микеланджело и завершенный в 1590 году, приблизился к этому рекорду: ширина его пролета составила 41,75 метра).

Последним изобретенным в древности материалом, для производства которого требовалась температурная обработка, стало стекло (Macfarlane and Martin, 2002). Древнейшим осколком месопотамского стекла порядка 5000 лет. Искусство изготовления стеклянных изделий стремительно развивалось в эпоху Нового царства в Древнем Египте, стеклянные предметы нередко находят на местах раскопок римских поселений, однако только в Средние века стекло стало действительно важным материалом как для строителей (что подтверждается многоцветными соборными окнами с их замысловатым рисунком), так и для повседневного использования, отличным примером которого являются искусно изготовленные кубки из венецианского и чешского стекла. До середины девятнадцатого века единственным широко распространенным способом изготовления стекольных панелей ограниченных размеров было так называемое «лунное стекло», или кронглас. Мастер-стеклодув надувал большой пузырь из расплавленного материала воздухом из своих легких; затем этот пузырь скручивали в диск с кругом посередине, диаметр диска мог достигать одного метра. После охлаждения диск нарезали на панели. Такое стекло было слишком дорогим,

и простые люди не могли позволить себе остекление своих домов. Повсеместным явлением стеклянные окна стали только в начале современной эпохи.

Однако наиболее значимым достижением античного мира в сфере использования материалов стало не широкое применение в повседневной жизни самых разнообразных органических (дерева, костей, шкур, текстиля животного и растительного происхождения), строительных (камни, глина, песок, бетон) или декоративных материалов (плитка и стекло), а создание методов выплавки и производства изделий из постоянно расширяющегося списка металлов. Добыча руды и выплавка металлов стали важным шагом вперед, начавшимся с применения меди и ее сплавов, а затем и железной руды. Железо стало основным металлом в Древней Греции и Древнем Риме — в двух великих средиземноморских цивилизациях, чьи достижения столь сильно повлияли на историю Европы и всего мира.

Чистая медь отличается мягкостью и ковкостью, из нее легко получить сплавы, поэтому медь была первым металлом, которым люди каменного века начали пользоваться еще 10 000 лет назад. Поначалу работа с медью не включала плавку, так как люди брали кусочки выходящего на поверхность самородного чистого металла и формовали их холодным способом либо подвергали многократному нагреву и ударам молота (отжигу). Плавкой и литьем меди начали заниматься более 6000 лет назад, сначала в Месопотамии. В сказании о Гильгамеше — величайшем эпосе шумеров, созданном примерно две с половиной тысячи лет до нашей эры — упоминаются медная шкатулка и бронзовый стержень; кроме того, на местах раскопок на территории древних империй этого региона находили медные ножи, топоры и копья. Тысячу лет спустя эту технологию освоили в Египте, примерно 3500 лет назад она распространилась и в Китае. Благодаря обилию руд, содержащих сульфиды меди, она была самым широко применимым металлом в период с 3000 по 1000 год до н. э.

Восстановление руды (температура плавления Cu довольно высока — 1083°C) сначала производилось с помощью дров и угля в обложенных глиной ямах, затем в небольших глиняных печах; металл очищали посредством дальнейшего нагрева. Производство меди из повсеместно встречавшихся сульфидов (колчедана) было несколько сложнее: руда измельчалась вручную, позднее для этого стали использовать запряженных лошадей и молоты, приводимые в движение водяными колесами; затем ее обжигали, чтобы удалить примеси серы и различные сопутствующие металлы (As , Fe , Pb , Sn , Zn). Обоженную руду плавили в шахтных печах, затем выплавляли еще раз, чтобы получить медь со степенью чистоты 95–97%. Древесина уходила в огромных количествах, и именно выплавка меди стала основной причиной исчезновения лесов в Средиземноморье, в особенности в Испании и на Кипре.

Однако отожженная медь была слишком мягким металлом и не отличалась высокой прочностью на растяжение. Поэтому более прочная и твердая бронза стала первым практичным сплавом в истории, и именно ее Кристиан Томсен использует в своем теперь уже классическом делении истории человечества на каменный, бронзовый и железный век (Thomsen, 1836). Бронза — это медный сплав, на 5–30% состоящий из олова (обычно на 10%). Его прочность на растяжение в 4 раза выше, чем у отожженной меди, а твердость — почти в шесть раз, поэтому бронза была хороша в качестве материала для ножей, мечей, топоров и медалей, а также для колоколов и

музыкальных инструментов. Латунь — сплав меди (от 50 до 85%) и цинка; его начали плавить только в первом веке до н. э., а широкое распространение он и вовсе получил не раньше позднего Средневековья. Благодаря цинку прочность и твердость сплава становятся примерно в 1,7 раз выше, чем у холодноотянутой меди, при этом сохраняются ковкость и устойчивость к коррозии. Пьютер — сплав, в основном состоящий из олова (около 90%) с добавлением сурьмы и меди.

Помимо меди, олова, бронзы и латуни, древние металлурги научились работать и с другими цветными металлами: цинком, свинцом, ртутью, серебром и золотом. Анализ свинца, найденного в гренландском ледяном керне, сделал возможным реконструкцию самой длинной в мире последовательности данных о производстве металла. По оценкам Hong и соавт. (1994), масштабная выплавка свинца и серебра древними греками и римлянами увеличила производство свинца с 250 тонн в год в 750 г. до н. э. до практически 80 тысяч тонн к 50 г. н. э. Именно свинец, благодаря низкой температуре плавления и хорошей ковкости, рассматривался в качестве основного материала для водопроводных труб в римских городах; однако в основном этот металл использовался в напорных дюкерах (обратных сифонах) — трубах U-образной формы, связывавших напорный резервуар с приемным резервуаром, расположенным несколько ниже на противоположном берегу реки или оврага. Римские инженеры предпочитали использовать такие сифоны там, где для соединения двух краев впадины потребовался бы каменный мост высотой более 50–60 метров. Тысячу лет спустя, во времена упадка и застоя, царивших после краха Римской империи, производство свинца застряло на уровне примерно 12,5 тысячи тонн; и только в середине восемнадцатого века общемировое производство этого металла побило рекорды Античности.

В Античности и в Старом, и в Новом свете из золота и серебра изготавливались ювелирные изделия и декоративные предметы, самым знаменитым из которых является, пожалуй, погребальная маска Тутанхамона, сделанная примерно в 1320 г. до н. э. Кроме того, из этих металлов чеканились монеты; их качество и ценность нередко понижались за счет добавления более дешевых металлов. Самый известный пример такой девальвации — история снижения ценности римского денария (Salmon, 1999). Patterson (1972) дает следующую приблизительную оценку ежегодного производства серебра у древних греков и римлян: по 25 тонн в год между 350 и 250 гг. до н. э., по 200 тонн между 50 г. до н. э. и 100 г. н. э. и вновь по 25 тонн в четвертом веке н. э. Ртуть была компонентом мазей и косметических средств (худшего применения ей, пожалуй, и не придумаешь), затем стала ключевым элементом в экспериментальной алхимии.

Железные руды были широко распространены; многие ранние находки изобиловали металлом (чистый магнетит содержит 72% железа): на многих участках его можно было добывать без проходки шахт, однако для выплавки этого металла требуется более высокая температура, чем для производства меди или свинца. Первые железные артефакты датируются примерно 5000 годом до н. э., однако повсеместно этот металл стали использовать менее 3000 лет назад, причем как в Древнем Египте, так и в Азии. Чугун — сплав железа с углеродом — был первым черным металлом, но по прочности на растяжение он не превосходил холодноотянутую медь, а по твердости лишь незначительно превосходил бронзу. Однако обилие железных руд и мед-

ленный прогресс в плавке металлов постепенно привели к тому, что железо стало самым важным металлом античных времен — и остается таковым до сих пор, если судить по его доле в совокупной массе. В третьей главе я подробно расскажу о том, почему мы все еще живем в железном веке: суммарный расход прочих металлов равен лишь малой доле расхода железа.

Ввиду относительно высокого содержания углерода (от 2 до 4,3%) чугуна демонстрирует низкую прочность на растяжение (ниже, чем у бронзы и латуни), низкую ударопрочность и очень низкую пластичность. Однако этот сплав отличается хорошей прочностью при сжатии, благодаря чему подходит в качестве материала для множества различных инструментов, посуды и иных предметов: от гвоздей до подков, от горшков до каминных решеток и оружия, включая тяжелое огнестрельное оружие и пушечные ядра. Но там, где металл подвергается большим нагрузкам, чугун использовать бы не получилось: колонны из железа со своей задачей справляются, но вот железные балки не смогли бы выдержать вес высотных зданий. Поначалу железо выплавляли в простых частично закрытых горнах, в которых получались относительно небольшие (примерно по 50 кг) куски металла, загрязненного шлаком.

Кричные горны постепенно превратились в небольшие шахтные печи, которые затем стали основой для первых доменных печей, изобретенных в четырнадцатом веке в регионе Рейн-Маас; при плавке металла в столбчатом корпусе такой печи, насыщенные монооксидом углерода, горячие газы движутся вверх, за счет чего при температуре свыше 1600°C происходит восстановление железа из железных оксидов. В течение последующих пяти столетий размеры доменных печей были ограничены, так как энергии угля было недостаточно для обработки больших объемов шихты, состоящей из железной руды и известняка (использовавшегося для удаления примесей). Фундаментальные инновации, ставшие предпосылкой массового производства недорогого железа, возникли только в конце восемнадцатого века, когда на смену углю пришел металлургический кокс.

Старейшим способом получения стали является науглероживание (диффузионное насыщение), то есть добавление углерода к практически безуглеродному губчатому железу — малым пористым массам железа и шлака из кричных горнов путем длительного нагрева в угле. Так получали верхний слой закаленной стали с равномерным распределением углерода, необходимого для оружейных сталей; достичь нужного эффекта можно было только повторной ковкой (Birch, 1968). Обезуглероживание (удаление углерода путем оксигенации) чугуна впервые произвели в Китае эпохи Хань, где с помощью данной технологии получали прочный сплав, пригодный для изготовления из него цепей подвесных мостов через глубокие ущелья. Но такое применение металла было, скорее, исключением, так как сталь оставалась очень дорогой и потому ограниченной в использовании до девятнадцатого века.

2.4 Материалы раннего Нового времени

Раннее Новое время я определяю несколько упрощенно как период с 1500 по 1800 год; при необходимости указать более точные границы этой эпохи, я бы выбрал по понятным причинам 1492 и 1789 годы. Это было замечательное время, в котором

смешались остаточные реалии Средневековья и революционные — как мы их сейчас видим — фундаментальные изменения, ставшие основой современного мира. С точки зрения использования материалов по сравнению с прежними годами данная эпоха претерпела некоторые качественные и значительные количественные изменения. В строительстве, как и в ремесленном производстве (все еще главенствующем) новых материалов не появилось; однако постоянно растущие города и увеличивающиеся в размерах океанские суда, все более частое обращение к водяным колесам и ветряным мельницам как источнику энергии, строительство больших крепостей и искусное проектирование и возведение новых каналов, портов и дорог, а также развитие шахтной добычи угля (сначала в Англии и Уэльсе) привели к резкому увеличению спроса на два основных высококачественных строительных материала — дерево и железо; кроме того, возникла необходимость в перемещении еще больших объемов почвы, песка, гравия и камня.

В начале Нового времени наблюдались более высокие темпы роста численности населения, начинались процессы урбанизации и протоиндустриализации; именно эти процессы поспособствовали изменениям в картине потребления материалов. Наиболее детальные из доступных реконструкций указывают на то, что за 500 лет с 1000 по 1500 годы население всего мира увеличилось менее чем на 60%, а после этого более чем удвоилось (с 460 миллионов до почти миллиарда) к 1800 году; и тем не менее состояло в основном из сельских жителей, так как в городах проживало менее 5% всего человечества (Klein Goldewijk и соавт., 2010). Во времена протоиндустриализации люди полагались в основном на дешевый труд селян и городских ремесленников; плоды этого труда попадали на национальные или даже международные рынки. В Европе этот процесс затронул некоторые регионы Британских островов (Котсволдс, Ольстер), Франции (Пикардия), Германии (Вестфалия, Саксония и Силезия); в Азии крупномасштабные ремесленные производства были сосредоточены в береговых районах Китая под властью династии Цин, подконтрольной Моголам Индии, а также в городах сёгуната Токугава. Доля товаров производства мануфактур из этих регионов постоянно увеличивалась и на других рынках Азии и Европы. Крупномасштабное ремесленное производство предполагает значительный уровень расхода материалов. Как показывает Мукерджи (1983), вещизм не был следствием индустриализации, так как в некоторых частях атлантической Европы он был вполне очевидным уже в шестнадцатом столетии.

На картинах голландских художников золотого века (1581–1701, или попросту весь семнадцатый век) мы видим аккуратные и просторные домики Амстердама, Харлема и Делфта, небольшие, но ухоженные дворики, чистые кафельные полы, большие застекленные окна, стены, украшенные картинами и картами; видим музыкальные инструменты и много хорошо сделанной мебели и качественных постельных принадлежностей. Интерьеры на полотнах Яна Моленара, Питера де Хоха и Яна Вермеера однозначно говорят о комфорте и зарождающемся богатстве голландских бюргеров; все это возникло задолго до того, как европейская индустриализация дала начало массовому потреблению. Более того, владельцы этих домов весьма охотно покупали широкий спектр потребительских товаров: от качественной посуды для приготовления пищи до изысканных одежд, от гравюр до китайского и японского фарфора (у голландцев была монополия на торговлю с сёгунатом Токугава).

Главным источником информации о достижениях раннего Нового времени является первая в мире энциклопедия, изданная в период с 1751 по 1777 год под редакцией Дени Дидро и Жана ле Рона Даламбера. В ней содержатся описания и гравюры множества машин, включая сложные замысловатые конструкции, предвещавшие прогресс, достигнутый в девятнадцатом веке благодаря индустриализации (Diderot, D'Alembert, 1751–77). В то же время жилищное строительство оставалось примитивным и неадекватным: даже во Франции шестнадцатого века многие деревенские дома были обычными землянками, покрытыми соломой или камышом, а в городах жилые помещения нередко служили также и рабочими (мастерскими или лавками) или примыкали к ним, как, например, в длинных киотских домах-*machiya*. Здания также характеризовались плохим отоплением и освещением: основным источником и того, и другого служили камины, которые были неудобными и неэффективными; более эффективные печи (прежде всего немецкие *Kacheloffen* и голландские/скандинавские плиточные конструкции) за пределами мест своего происхождения распространялись очень медленно.

В результате из-за чрезмерного расхода топлива каминами и жаровнями возник огромный спрос на древесину и уголь, необходимые для обогрева растущих городов доугольной эпохи. В Париже спрос на древесину возрос с 400 тыс. лоудов⁷ в 1735 до более чем 750 тыс. (порядка 1,6 миллиона кубометров)⁸ в 1789 году; уголь тратился в таких же количествах, таким образом, расход топлива на душу населения превышал одну тонну (Roche, 2000). Тесные комнатки сельских домов были нередко захламлены различным инструментарием, и даже в городских жилищах меблировка зачастую была минимальна. Стул, которого в Средневековье в большинстве домов не было (люди сидели на полу, на скамейках, на подушках или ступеньках), стал повсеместным предметом мебели, а вот хорошие кровати все еще были очень дороги: незадолго до 1700 года во Франции стоимость кровати составляла 25% стоимости всей мебели, принадлежащей небогатой семье, и почти 40% всей мебели слуги (Roche, 2000).

Даже в семнадцатом веке люди обычно ели пищу из той же посуды, в которой она была приготовлена. Людовик XIV в начале своего царствования (в 1660-х гг.) ел руками, но уже век спустя даже у горожан среднего класса на столах имелось множество разнообразных предметов, предназначенных для конкретных целей, от подставок под яйцо (пашотниц) до чайников. Такой прогресс сопровождался сокращением использования благородных материалов (все меньше и меньше предметов изготавливалось из серебра или хрусталя) и распространением дешевых изделий из повсеместно встречающихся металлов, фарфора и дутого стекла. С этого изменения и начинается история недолговечных товаров и изменчивой моды. Нищета все еще была обыденным явлением, однако появлялось все больше людей, чей доход позволял удовлетворять не только самые базовые потребности. Как отмечает Роше (2000, с. 77), «новая модель культурного поведения, что зиждется на стремлении к благополучию и достойной жизни, дала о себе знать».

⁷ Лоуд – британская единица измерения объема древесины, один лоуд равен 1,138 кубометра круглого леса или 1,416 кубометра брусьев. – *Прим. пер.*

⁸ Вероятно, ошибка в расчетах или опечатка: если 1 лоуд равен 1,138 кубометра круглого леса или 1,416 кубометра брусьев, то 750 тыс. лоудов составляет 853,5 тыс. кубометра круглого леса или 1,06 млн кубометров брусьев. – *Прим. пер.*

В некоторых странах стали появляться более основательные жилые постройки, однако принципы деревянного строительства все также соответствовали условиям окружающей среды: в сейсмоопасных регионах люди предпочитали легкие строения, в некоторых частях атлантической Европы и на востоке Северной Америки строили прочные дома из бревен. Японские *minka* (традиционные дома крестьян, купцов и ремесленников) строились на каркасе из столбов и балок, имели глиняные или бамбуковые стены, раздвижные двери, бумажные перегородки и земляной пол. В результате на строительство *minka* площадью 100 кв. м зачастую уходило не более 8 кубометров сосны, кедра или кипариса (Kawashima, 1986), в то время как на такой же небольшой скандинавский бревенчатый дом (*stock hus*) требовалось сто кубометров древесины на стены, двери, потолки, и крышу; на большую немецкую или швейцарскую ферму обычно уходило порядка 1000 кубометров дерева (Mitscherlich, 1963). Древесина также расходовалась на частые ремонты и восстановительные работы.

Дерево оставалось незаменимым материалом не только в жилищном строительстве и изготовлении транспортных средств (тележек, повозок, карет, лодок, кораблей), но и — на фоне роста объема выплавки железа в некоторых регионах Европы — в производстве древесного угля для доменных печей (его начали менять на кокс только во второй половине восемнадцатого века и только в Великобритании). Борьба европейских морских держав — Испании, Португалии, Англии, Франции и Голландии — за господство над океаном и сопутствующее этому строительство больших океанских судов, как торговых, так и военных, а также постоянно увеличивающиеся размеры этих судов привели к возникновению беспрецедентного спроса на качественную древесину для корпусов, палуб и мачт. Водоизмещение корабля «Санта-Мария» из экспедиции Колумба составляло примерно 110 тонн, тот же показатель магеллановской «Виктории» — первого в мире корабля, совершившего кругосветное плавание — составил 85 тонн. 70% общей массы этих кораблей приходилось на деревянный корпус, мачты и рангоуты (остальную массу составляли балласт, припасы, паруса, вооружение и экипаж), соответственно, данные суда содержали примерно 60–75 тонн пиленого леса (Fernández-González, 2006).

В конце восемнадцатого столетия длина больших двухпалубных военно-морских кораблей (изначально сконструированных во Франции) составляла 54 метра; каждый такой корабль вмещал до 74 пушек и до 750 человек экипажа (Watts, 1905). На строительство такого корабля уходило около 3700 лоудов дуба, то есть порядка 3,4 тысячи тонн древесины при плотности 650 кг/м³, что примерно в 50 раз больше массы дерева, ушедшего тремя веками ранее на первые парусные корабли, совершившие межконтинентальное плавание. Но так как 60% древесины, привезенной кораблестроителями, расходовалось по дороге (работники верфей забирали себе немного дерева на отопление, на изготовление простой мебели, а то и просто на продажу, см. Linebaugh, 1993), фактически для строительства одного корабля требовалось заготовить более 5 тысяч тонн древесины.

Военно-морские корабли раннего Нового времени также прекрасно иллюстрируют все более массовое производство вооружения. В начале шестнадцатого века у типичного корабля было менее 10 орудий; в 1588 году у английских кораблей, разгромивших испанскую Армаду, было в среднем по 12 орудий; к концу семнадцатого

века у большого боевого корабля могло быть уже до 100 орудий; в ходе сражения при Ла-Хог в распоряжении британского и голландского капитанов было 6756 орудий (Anderson и Anderson, 1926). Изготовление морских орудий из железа было далеко не единственной причиной возросшего расхода металлов. Спрос на них возрос благодаря увеличивающимся объемам добычи, а также производству все большего количества гвоздей, проволоки, подков и оружия для сухопутных войск. Статистика по Англии дает следующие цифры: в 1700 году было произведено всего около 10 000 тонн чугуна, в 1750 году — уже 26 000 тонн, а в 1800-м — 156 000 (Bell, 1884).

На производство железа в небольших домнах уходило огромное количество древесного угля; вкупе с неэффективными технологиями получения угля из древесины это привело к обезлесению тех регионов, где велись работы по выплавке железа. К 1700 году для работы одной типичной английской домны требовалось 12 000 тонн древесины в год (Hyde, 1977). Некоторую передышку леса получили лишь с медленным внедрением металлургического кокса: впервые им воспользовались для растопки доменной печи в 1709 году, но даже в Великобритании он стал основным печным топливом лишь век спустя. Сталь оставалась дефицитным товаром даже в середине XVIII века. В конце 40-х гг. XVII века Бенджамин Хантсман (1704–1776) начал производить литую тигельную сталь путем науглероживания кованого железа, однако тогда этот металл использовался только в очень ограниченных специализированных производствах, например, для изготовления дорогого оружия (знаменитые дамасские и японские мечи), бритв, столовых приборов, часовых пружин, инженерных инструментов (прежде всего — для резки по металлу); качество таких изделий оправдывало высокую цену (Bell, 1884). В Европе продолжали расширять добычу руд всех видов; наиболее значимыми нововведениями в этой сфере отличались Германия, Франция и Италия.

Однако самые значительные изменения были связаны с металлами Нового Света, где добыча золота и серебра велась в беспрецедентных масштабах. Высадившись в Америке, Колумб первым делом расспросил местных о золоте, однако по-настоящему судьба улыбнулась испанцам тогда, когда они обнаружили залежи и золота, и серебра в Мексике (Сакатекас), Перу и Боливии (Potosí, 1545). В течение следующих 250 лет испанская монархия обогащалась за счет прямых поставок американского серебра; однако по-настоящему глобальная система обмена возникла благодаря кросс-тихоокеанской перевозке этого металла на Филиппины и затем в Китай (Frank, 1998).

Согласно оценкам Барретта (Barrett, 1990), ежегодный приток серебра в Европу вырос с 40 тонн в начале 1500-х гг. до 600 тонн в течение последних четырех десятилетий XVIII века. Ежегодный приток серебра в Азию через голландские и английские компании, торговые каналы Леванта и напрямую из Америки на кораблях, курсирующих по Тихому океану, увеличился с 75 тонн в первом десятилетии XVII века до практически 170 тонн в середине XVIII века. Флинн и Хиральдес (Flynn and Giráldez, 1995) заявляют, что день, когда в 1571 году был основан город Манила (с целью создать первый в истории маршрут для прямой и непрерывной торговли между Америкой и Азией), стал днем рождения настоящего глобального товарного обмена.

В XVIII веке также наметился рост текстильного производства, так как первой категорией потребительских товаров, расходы на которую очевидно и повсеместно

возросли, стала именно одежда. Эта тенденция зародилась в городах, но постепенно охватила и села, приведя к тому, что Роше (Roche, 2000) называет «унификацией портняжных обычаев». Вертикальные ткацкие станки использовались с античных времен; во многих традиционных обществах Азии и Америки люди пользовались мобильными станками, натяжение нити на которых осуществлялось за счет веса самих ткачей. В любом случае максимальная ширина получавшейся ткани не превышала размах рук ткача; над более широким полотном приходилось работать вдвоем. Ситуация изменилась в 1733 году, когда Джон Кей изобрел летающий челнок, который можно было гонять ударами запястья туда-сюда; самым важным изобретением, ставшим предпосылкой массового производства дешевых тканей, стал появившийся в 1785 году механический ткацкий станок Эдмунда Картрайта (изначально приводился в движение паром).

Не менее важным нововведением была и реакция на импорт ситца из Индии, где он производился в городе Каликут с XI века, в Европу. С 1650 года французские мастера стали перенимать индийскую технологию; еще до наступления 1700 года французские и английские мастерские научились производить эту ткань с устойчивой окраской, и технология постепенно распространилась в Нидерландах, Германии, Швейцарии и Австрии. Век спустя производство ситца в Ланкашире уже имело значительные конкурентные преимущества по сравнению с индийскими мастерскими, особенно после изобретения Томасом Беллом печатных валиков и их внедрения в 1785 году (Jenkins, 2003). Вскоре структура международной торговли претерпела значительные изменения: согласно британской статистике, в 1835 году Британия экспортировала в Индию в 169 раз больше окрашенной и неокрашенной ткани, чем импортировала оттуда (National Archives, 2012).

Наконец, надо рассказать немного о камне и иных строительных материалах раннего Нового времени. Тесаный камень оставался основным материалом монументальных сооружений, роскошных частных домов и религиозной архитектуры. Величие позднего Ренессанса и римского барокко, пожалуй, лучшим образом иллюстрирует использование камня в строительстве дворцов, базилик, церквей и колоннад по проектам таких мастеров, как Микеланджело Буонаротти, Карло Мадерно, Джан Лоренцо Бернини, Франческо Борромини и Джироламо Рейнальди. Возросшие темпы и масштабы строительства городского жилья открыли новые рынки тесаного камня. Наиболее ярким примером является, пожалуй, рост и застройка Парижа. На протяжении веков известняк лютетского яруса (*Pierre de taille*) добывался в подземных карьерах на окраинах города; однако постоянное расширение городских границ и застройка над выработанными проходами привели к обрушению тоннелей и проседанию грунта (Blanc и соавт., 1998).

Жан-Батист Кольбер, который при Людовике XIV был министром финансов Франции (с 1665 по 1683 год), организовал комиссию; которая выяснила, что известняк из карьеров Сен-Максимен в Валь д'Уазе в 40 километрах к северу от центра города практически идеально подходит по цвету основным каменным монументам столицы (Destination Oise, 2013). Этот мягкий камень легко поддается резке, однако довольно устойчив к атмосферным воздействиям, поэтому с конца XVIII века облик Парижа легко узнаваем благодаря массивным фундаментным блокам и тонким фасадным пластинам из известняка нескольких светлых оттенков: от белого до свет-

ло-желтого. Первая волна этого большого строительного проекта прошла с 1715 по 1752 г., когда в городе было воздвигнуто 22 тысячи новых капитальных строений, при этом практически каждое пятое новое здание имело *port cochère*⁹ (Grice, 1752). Такие темпы строительства удалось превзойти только столетие спустя, когда Осман, перекраивая облик Парижа, воздвиг в этом городе примерно 40 тысяч новых домов с 1853 по 1870 г. (Des Cars, 1988).

Но в некоторых частях Европы камень уступил свое доминирующее положение кирпичной кладке при строительстве более материалоемких крепостей, возникших в ответ на улучшившиеся характеристики дальнобойной артиллерии. Обычные средневековые укрепления располагались на небольших площадках, нередко на возвышениях, где строились высокие и толстые каменные стены. Новые крепости были совсем другими — звездообразными многоугольниками (шести- и восьмиугольниками), приспособленными к местности (нередко совершенно ровной), с относительно низкими кирпичными стенами и массивными земляными насыпями, предназначенными для поглощения энергии артиллерийских снарядов, для защиты и маскировки, и в то же время для установления четких секторов для оборонительного огня.

Себастьян ле Престр Вобан, военный инженер, дослужившийся до звания маршала Франции, был, пожалуй, наиболее выдающимся архитектором таких укреплений, на возведение которых требовались невиданные количества сыпучих строительных материалов. В течение 40 лет с 1667 по 1707 г. он обновил оборонительные сооружения примерно 300 городов и построил 37 новых крепостей вдоль западных, северных и восточных границ Франции (все они теперь входят в Список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО); к его проектам относятся цитадель Ле Пале и крепость на горе Луи, город Безансон и островной редут Сен Мартен-де-Пе (Duffy, 1985; Hebbert, 1990). На крепость в Лилле ушло 60 миллионов кирпичей, а на его самый большой проект — укрепления в Лонгви, северо-восток Франции — порядка 640 000 м³ скальной породы и земли и 120 000 м³ кирпича (Anderson, 1988).

2.5 Создание современной цивилизации материалов

Если рассуждать с простой экзистенциальной точки зрения, то есть исходя из того, чем люди в основном питаются, как долго и насколько хорошо живут, сколько тратят топлива, какими пользуются двигателями, какие материалы выбирают, как ими пользуются и что из материалов им доступно в изобилии, то выяснится, что даже самые развитые доиндустриальные общества конца XVIII века — Китай во времена Канси, сегунат Токугава на его закате, дореволюционная Франция и Россия при Екатерине II — не могли похвастаться значительным рывком по сравнению с их предшественниками времен позднего Средневековья. Голод стал редким явлением, но рацион питания большинства людей едва ли можно было назвать полноценным, пища не отличалась разнообразием и состояла преимущественно из зерновых; из-за высокой младенческой смертности средняя ожидаемая продолжительность жизни

⁹ Крытые въездные ворота для кареты. — Прим. пер.

при рождении составляла менее 40 лет; в домах было тесно, некомфортно, наблюдалась антисанитария; основными видами топлива была древесина и древесный уголь, а также пожнивные остатки, преимущественно солома; мышечная сила человека и животных оставалась основным двигателем; дерево, камень и глина (в виде обожженного кирпича) были базовыми строительными материалами, а металлические предметы из железа, меди, бронзы и латуни встречались нечасто.

Уголь заменил древесину в качестве господствующего вида топлива только в Англии. Паровые двигатели Джеймса Ватта, не отличавшиеся высоким КПД, были первым изобретением, способным заменить ветряные мельницы и водяные колеса в качестве движителя, при этом со временем они становились все более мощными; в то же время замена древесного угля на каменный позволила строить доменные печи больших размеров, наращивая производство железа и снижая стоимость предметов из этого металла. Но даже в Великобритании широкие слои населения не могли похвастаться хорошим питанием, долголетием и обилием материальных ценностей. Все изменилось в XIX веке, сначала в Великобритании, некоторых регионах Западной Европы и на востоке США, затем в большинстве европейских стран и по всей Северной Америке, а в 1870 году Япония первой из азиатских стран начала процесс «осовременивания». С материальной точки зрения модернизация, предпосылками которой стали индустриализация и урбанизация, характеризуется прежде всего двумя процессами: наращиванием объемов производства традиционных строительных материалов, а также быстрорастущим потреблением металлов.

Первый процесс обычно игнорируется, так как историки, изучающие индустриализацию, основное внимание уделяют потреблению ископаемых видов топлива, производству металлов и машин. Но ведь людям той эпохи пришлось вырезать, взрывать, измельчать и формовать камень в беспрецедентных количествах, а также перемещать или добавлять в состав кирпичей и бетона еще большие объемы почвы, песка и глины, чтобы в течение нескольких десятилетий обеспечить территории своих стран железными дорогами, улучшить обычные дорожные сети, построить дома для миллионов бывших крестьян, из года в год перебивавшихся в города, создать производственную инфраструктуру современных экономик — шахты, порты и заводы, позволившую государствам всего за два-три поколения перейти от земледельческих обществ к экономическому строю, в котором главную роль играет промышленное производство.

Пожалуй, самым эстетически привлекательным воплощением возросшего спроса на тесаный камень можно назвать модернизацию Парижа, начавшуюся во времена Второй империи (1852–1870). Реорганизация парижских улиц и жилищного фонда под руководством Жоржа Эжена Османа, длившаяся с 1853 по 1870 г. (Carmona and Camiller, 2002), и последовавший за ней рост, в результате которого население города практически утроилось с 1850 по 1900 г., привели к возникновению спроса на характерный камень кремового цвета, добываемый в карьерах Сен-Максимен и выбранный, как уже было сказано ранее, Кольбером в XVII веке в качестве замены известняку, добывавшемуся в самом Париже. Осман использовал эти камни в строительстве типовых пятиэтажек с угловыми мансардными крышами; именно такими домами застроены широкие прямые бульвары, также спроектированные по инициативе этого градостроителя. Чтобы оценить расход камня, будем исходить из того,

что на каждое из 40 тысяч зданий, построенных в рамках проводимой Османом городской реконструкции, в среднем уходило 350 тонн камня на фундамент и 250 тонн на фасад; таким образом получаем примерно 25 миллионов тонн камня, и эту цифру можно смело удвоить, если учитывать значительные отходы добычи, транспортировки, резки и иных работ с материалом.

Урбанизация означала также рост спроса на окна, что привело к разработке новых методов массового производства плоского стекла. В 1848 году сэр Генри Бессемер, который позже прославился своим инновационным и недорогим методом производства стали, запатентовал технологию изготовления плоского стекла путем протягивания слегка охлажденного материала вверх через плоский зазор между асбестовыми валиками; это решение было намного технологичнее использовавшейся столетиями (и не позволявшей изготавливать стекла больших размеров) методики «лунного стекла», как и появившейся в начале XIX века технологии изготовления «цилиндрического стекла», которая также была ограничена в размерах получаемых стекол. Однако только в середине 50-х гг. XX века Аластер Pilkington представил ванны из расплавленного олова, позволившие изготавливать панели огромных размеров, соблюдая практически идеальное единообразие (Pilkington, 1969).

Однако лучшим примером того, насколько более масштабными стали работы по перемещению сыпучих материалов, включая почву, песок и гравий, является строительство железных дорог. Оно началось в 1830 году с 56-километровой трассы между Ливерпулем и Манчестером; 30 лет спустя общая длина железных дорог достигла 100 000 километров, а к 1900 году — 775 000 километров, из которых 250 тысяч располагались в Европе, более 190 тысяч — в США, 53 тысячи — в России и 30 тысяч — в Великобритании (Williams, 2006). С учетом разнообразия местности, по которой проходят железные дороги, не представляется возможным оценить объем сыпучих строительных материалов — земли из канав и насыпей, камня, выдолбленного из скал при строительстве тоннелей, а также добытого в карьерах для получения гравия для насыпей и подъездных дорог, — ушедших на каждый километр новых железных дорог.

Даже по самым скромным оценкам, для строительства 1 километра дорог приходилось перемещать 3000 м³ сыпучих материалов; таким образом, на строительство железных дорог по всему миру во второй половине XIX века ушло почти 2,5 миллиарда кубометров таких материалов. Аналогичная сдержанная оценка предполагает, что на каждый километр пришлось как минимум 2 тысячи тонн балласта (щебня, плотно уложенного под шпалами и вокруг них), таким образом, на опоры под железнодорожные пути, построенные с 1830 по 1900 год, ушло как минимум 1,5, а скорее, даже до 2 миллиарда тонн крупного гравия. Минеральные заполнители также требовались в беспрецедентных количествах: строились новые фабрики, расширялись морские и речные порты, прокладывались дороги с твердым покрытием. Однако эпоха асфальтовых дорог начнется только после 1900 года, а пока важнейшим строительным материалом XIX века становится бетон, изготавливаемый путем смешивания цемента с заполнителем и водой. Заполнитель по крупности разнится от песка до гравия различных размеров; гидратация — экзотермическая реакция — цемента позволяет смеси затвердевать даже под водой.

Пригодный для изготовления качественного бетона цемент появился только после 1824 года, когда Джозеф Аспдин, английский каменщик, запатентовал способ получения гидравлического раствора – штукатурки путем высокотемпературного обжига известняка и глины. При такой обработке происходит спекание алюминиевых и кремниевых материалов, в результате чего получается стекловидный клинкер, в измельченном виде известный как портлендский цемент (портландцемент). Это название предложил сам Аспдин, объясняя его тем, что после застывания цвет материала напоминает известняк с острова Портленд (Shaeffer, 1992). Гидратация этого цемента — его реакция с водой — приводит к образованию материала, готового к формовке, обладает хорошей прочностью на сжатие, но очень низкой прочностью на растяжение. Этот недостаток можно преодолеть, укрепив материал железной арматурой; такое сочетание возможно благодаря прочной связке железа с бетоном, а также ввиду того, что гидравлический цемент защищает железо от коррозии.

Разработка и коммерциализация железобетона происходили постепенно; свой вклад внесли французские изобретатели (Франсуа Куанье в начале 1860-х и Жак Монье, сначала запатентовавший железобетонную балку, а затем, в 1878 году, общую систему арматурных конструкций), а также британец Уильям Вард и американец Таддиус Хаятт в 1870-х (Newby, 2001). Однако по-настоящему эпоха современной арматуры началась в 1884 году, когда Эрнест Рэнсом запатентовал свою систему изготовления бетона с арматурой; вскоре эту систему стали активно продвигать и использовать, в особенности при возведении новых промышленных сооружений (Newby, 2001). В 1886 году Карл Дохринг запатентовал гениальную идею предварительного напряжения арматуры, погружаемой в бетон: арматурные пруты натягиваются во влажном материале и освобождаются от напряжения по мере затвердевания материала (Abeles, 1949). Первый бетонный небоскреб — Монаднок-Билдинг в Чикаго — был достроен в 1891 году; в 90-х годах того же столетия появление современных вращающихся печей с температурами, достигающими 1500°C, позволило начать производство недорогого цемента высокого качества. Таким образом, к 1900 году сформировались все предпосылки начала века бетона.

Хотя спрос на древесину падал в связи с тем, что на замену ей и древесному углю пришли ископаемое топливо и кокс (уже в середине 70-х гг. XIX века кокс был источником половины всей энергии во Франции; в США доля кокса и нефти в общей выработке энергии превзошла долю топливной древесины примерно в 1884–1885 гг.), а также потому, что кораблестроители перешли с дерева на сталь, масштабная разработка угольных шахт и строительство железных дорог привели к появлению новых рынков древесных пиломатериалов. Спрос на рудничные леса при ведении подземных горных работ зависел от глубины и толщины пластов, но обычно в Европе и Соединенных Штатах требовалось порядка 0,02–0,03 м³ древесины на тонну угля; по моим наиболее точным оценкам, общемировая потребность в рудничных лесоматериалах превысила 20 миллионов кубометров (около 15 миллионов тонн) к 1900 году (Smil, 2013).

В XIX веке все шпалы были деревянными; бетонные появились только около 1900 года, но вплоть до окончания Второй мировой войны использовались редко. В соответствии со стандартной тогда практикой строительства железных дорог, на каждый километр путей приходилось примерно 1900 шпал; одна шпала из сосны ве-

сит около 70 килограммов, шпала из дуба — около 100 килограммов, следовательно, на каждый километр путей требовалось 130–190 тонн пиломатериалов, желательнее — обработанных креозотом. По моим расчетам, на строительство всех железнодорожных путей, проложенных в XIX веке, ушло как минимум 100 миллионов тонн пиломатериалов и не менее 60 миллионов тонн было потрачено дополнительно на ремонт и замену путей (Smil, 2013).

Многokrратно возрос спрос на металлы и их сплавы, включая не только давно известные человечеству, но использовавшиеся ранее в ограниченных количествах (лучшими примерами здесь являются чугун, сталь и медь), а также те, которые были выделены только в девятнадцатом веке, но быстро нашли широкое применение в промышленности (алюминий). Усовершенствования в технологиях выплавки железа — большие домны и более эффективное использование кокса — позволили снизить энергоемкость чугуна с почти 300 ГДж/т в 1800 году до менее 100 ГДж/т к 1850 и до 50 ГДж/т к 1900 году, благодаря чему он стал намного дешевле (Neal, 1975). Чугун уже применялся в строительстве некоторых зданий в Великобритании до 1850 года, а когда он стал недорогим, им стали пользоваться намного чаще в Соединенных Штатах, особенно южных, где он применялся не только в изготовлении колонн, но также в строительстве мостов.

Чугунные колонны справляются со своей задачей, так как этот сплав обладает хорошей прочностью на сжатие; однако ввиду низкой прочности на растяжение его использование в строительных работах сильно ограничено или может привести к катастрофическим последствиям.

Однако в условиях высоких нагрузок на растяжение лучшим выбором остается сталь — тоже железный сплав, но с содержанием углерода в пределах 0,05–1,5%; свойства этого сплава можно подогнать под разные требования путем добавления в разных пропорциях (от менее 2% до более 10%) других металлов, включая Co, Cr, Mn, Mo, Ni, Ti, V и W, иногда в сочетаниях. Области применения специализированных сталей варьируются от изготовления листов для автомобильных кузовов и производства режущих инструментов для станков до нержавеющей стали, используемой в медицинских изделиях, химическом синтезе и пищевой промышленности. Лучшие сорта — инструментальные стали — по прочности на растяжение на порядок превосходят чугун (1600–2500 МПа против 150–400 МПа). Из всех распространенных металлов и сплавов сталь обладает наибольшей прочностью и твердостью: по прочности на растяжение она семикратно превосходит алюминий и четырехкратно — медь; сталь также в четыре раза тверже алюминия и в восемь раз тверже меди. Ударопрочность стали может шестикратно превышать тот же показатель у чугуна (130 против 20 Дж), а самая высокая температура, выдерживаемая сталью до потери структурной целостности, достигает 750°C (чугун выдерживает не более 350°C).

Развивающейся промышленности требовалось все больше металла с высокой прочностью на растяжение, в особенности ввиду быстрого расширения железнодорожной сети; удовлетворить эти потребности помогло сварочное железо (или пудлинговая сталь). Этот тип железа с низким содержанием углерода производили путем повторного нагрева и пудлингования — ручного перемешивания и разламывания тяжелых кусков (почти по 200 кг) чугуна; таким образом они подвергались воздей-

ствию кислорода в неглубоких горнах — процесс, который называют обезуглероживанием. Так получался практически чистый металл с содержанием углерода менее 0,1%. Сварочное железо затем повторно нагревалось и формовалось путем проката иликовки. Все первые рельсы, уложенные до конца 1850-х гг., а также Эйфелева башня были изготовлены именно таким способом. Недорогая сталь появилась в 1856–1857 гг., когда англичанин Генри Бессемер и американец Уильям Келли запатентовали технологию обезуглероживания, которая основывалась на следующем принципе: плавленный чугун в наклонном сосуде с огнеупорной футеровкой продувался холодным воздухом по 15–30 минут. Так и происходило обезуглероживание (Bessemer, 1905).

Однако такая технология не позволяла удалить фосфор, присутствующий во многих железных рудах, и решить эту проблему удалось только в конце 1870-х гг., когда Сидни Гилкрайт Томас и Перси Карлайл Гилкрайт изобрели и внедрили известняковые футеровки и стали добавлять известняк к шихте: так удалось убрать фосфор из шлака (Almond, 1981). К концу 1880-х гг. базовый бессемеровский процесс был основной технологией производства стали как в Европе, так и в Америке; 86% стали, выпущенной в США в 1890 году, было произведено именно по методу Бессемера (Hogan, 1971), при этом на США приходилась большая часть всемирного производства стали. Однако век господства бессемеровского процесса был недолог и закончился с распространением мартеновских сталеплавильных печей, изготавливаемых в соответствии с патентом Вильгельма Сименса и Эмиля Мартена, полученном в 1866 году.

Поначалу такие печи внедрялись медленно, однако в конце 80-х гг. XIX века мартеновские печи с футеровкой из простых огнеупорных материалов начали набирать популярность (Almond, 1981), в результате чего доля стали в общем производстве металлов резко возросла. В довоенных США лишь 1% американского чугуна переплавляли в сталь, однако к 1900 году эта доля достигла 75%, а в 1906 году на производство стали уходил уже практически весь чугун (Hogan, 1971). В конце 80-х гг. XIX века появились новые стали, разработанные Робером Муше (самозакаливающаяся сталь с добавлением вольфрама и марганца) и Робертом Эбботом Хэдфилдом (содержащая 13% марганца). Благодаря им стало возможно изготовление превосходных металлорежущих инструментов, а также прочных подшипников. К концу того же десятилетия сталелитейное производство Америки обогнало показатели британцев, увеличившись с 200 000 тонн в 1800 году до практически 2,5 миллиона тонн к 1850 году, а затем удвоившись за 20 лет до почти 6 миллионов тонн к 1870 году и достигнув 9,5 миллиона тонн к 1900. Общемировое производство чугуна возросло с 5 миллионов тонн в 1850 году до более чем 30 миллионов тонн к 1900 году, а производство стали увеличилось с примерно полумиллиона тонн в 1870 году до 28 миллионов к 1900 году (Smil, 2005).

Впервые в истории наступила эпоха, когда стало возможно применять недорогую сталь в строительстве, изготовлении различных изделий и машин, ранее производившихся из кованого железа или дерева; стальная продукция завоевывала все новые и новые рынки благодаря превосходным структурным свойствам и долговечности материала. В сельском хозяйстве, которое в 1850 году все еще оставалось основным видом экономической деятельности, из стали сначала изготавливались

отвальные плуги, впервые запатентованные Джоном Лейном-младшим в 1868 году. Их массовое применение позволило начать освоение Великих равнин Америки и канадских прерий. Затем началось производство стальных жаток и прочих орудий (сеялок, борон) и первых сельхозмашин на лошадиной тяге (самоходные комбайны появились только в 1911 году). Сталь вышла на новые рынки в конце 80-х гг. того же века, когда Райнхард и Макс Маннесманны изобрели бесшовные стальные трубы. Среди прочих значимых факторов, способствовавших увеличению спроса на сталь, следует отметить появление более эффективных винтовок, изобретение пулемета и современной взрывчатки, производство гранат и бомб, а также начавшееся в 1880-х строительство больших и бронированных линкоров (хотя первый *Дредноут* был построен только в 1906 году).

Наиболее быстрый рост на рынках стали был связан с появлением новых видов транспорта. Стремительное развитие железнодорожных сетей привело к возникновению огромного спроса на сталь, использовавшуюся в производстве локомотивов, грузовых и пассажирских вагонов, а также рельсов. Рельсы, производившиеся в XIX веке, весили от 20 до 30 кг на метр; если за среднее значение принять 25 кг/м, то на строительство железных дорог с 1850 по 1900 год потребовалось бы более 20 миллионов тонн стали, а замена увеличила бы расходы материала более чем в два раза. Сталь вскоре стала самым популярным материалом для строительства железнодорожных мостов: все началось с консольного моста в Ферт-оф-Форт, Шотландия, длиной 2529 метров. Мост был спроектирован Джоном Фаулером и Бенджамином Бейкером и построен в период с 1883 по 1890 год, на что ушла 51 тысяча тонн металла (Forth Bridges, 2013).

Второй масштабный глобальный транспортный рынок появился после того, как в 1877 году Регистр Ллойда разрешил страхование стальных кораблей; в течение одного поколения этот сплав завоевал судостроительные рынки, поставив точку в истории деревянных грузовых коммерческих судов. Уже в 1900 году верфи в Великобритании, Германии и Франции регулярно спускали на воду большие пассажирские суда, на строительство каждого из которых уходило более 10 000 тонн стали. Третий транспортный сегмент, в котором со временем также возник огромный спрос на сталь, тоже зародился до 1900 года, однако массовым средством передвижения автомобиль стал в США только после появления «Модели Т» Форда в 1908 году.

Благодаря индустриализации в XIX веке возникают новые рынки стали, причем как внутри самой металлургической отрасли, которая росла беспрецедентными темпами, из-за чего требовались доменные печи и сталелитейные заводы все большей производительности, так и в других отраслях: электроэнергетике (возникла в начале 80-х гг. и нуждалась в тяжелом машинном оборудовании, включая котлы и паровые турбогенераторы; сталь также уходила на трансформаторы, вышки и электрические провода), добыче и транспортировке нефти и газа, (где сталь была нужна для изготовления бурильных труб, буров, обсадки, трубопроводов и цистерн, труб и резервуаров для нефтеперегонных заводов), а также традиционной текстильной и пищевой промышленности, механизация которых привела к внедрению в производственный цикл целого ряда стальных машин и иного оборудования для хранения и обработки. В свою очередь, возросла доля стали среди материалов, используемых в производстве разных промышленных машин, инструментов и компонентов.

Сталь, будучи недорогой и высокопрочной, позволила начать строить жилые дома невиданной прежде высоты и функциональности. Конструкционная сталь, а точнее длинные двутавры, клепаные из небольших кусков, стала основой для возведения небоскребов, позволив отказаться от толстых несущих стен. Здание компании Home Insurance в Чикаго, спроектированное Уильямом Ле Бароном Дженни, завершённое в 1885 году и снесённое в 1931 (на его месте построили Филд-Билдинг), было первым высотным (10 этажей, 42 метра) строением, где основной опорой стали стальные колонны и балки, что уменьшило общую массу здания на две трети, позволило увеличить площадь пола и установить большие окна.

Пять лет спустя в Нью-Йорке был построен Уорлд-Билдинг — 20-этажный небоскреб высотой 94 метра; и незадолго до начала нового века Генри Грей изобрел универсальный балочный стан, на котором можно было прокатывать длинные двутавры, что существенно упростило изготовление стальных конструкций, так как позволило отказаться от трудоемких заклепочных соединений. Небоскребы нуждались в лифтах — фирма Otis, до сих пор лидирующая на этом рынке, установила свой первый электрический лифт в 1889 году — а значит, только усиливали спрос на сталь, ведь она была необходима для изготовления лифтового оборудования, кабин и кабелей. Стоит отметить и «скрытый» расход стали на производство железобетона. Жозеф Монье, парижский садовник, сначала запатентовал в 1878 году упрощённую технологию изготовления железобетона, где использовались обычные металлические сетки; уже в 80-х гг. того же столетия этот материал стали повсеместно использовать во Франции, Германии и Австрии, особенно при строительстве новых производственных помещений.

Медь издавна применялась в чеканке монет и производстве сплавов — латуни и бронзы; индустриализация добавила к этим двум областям применения еще две, которые вскоре стали основными. Первая была связана с широким распространением домовой канализации в растущих городах: медь стала стандартным материалом для производства водопроводных труб, а затем и для отопительно-охладительных систем. Вторая связана с возникновением в начале 80-х гг. XIX века промышленной широкомасштабной выработки электричества, что привело к необходимости наращивать мощность электростанций и строить все новые линии электропередач. Медь отличается очень хорошей электропроводностью и поэтому является наиболее предпочтительным металлом для изготовления проволоки и кабелей: от массивных кабельных связей в дата-центрах до микропроцессорных схем. Кроме того, медь применяется в производстве электромоторов, разъемов и переключателей, подшипников, тормозов и радиаторов, а также в качестве кровельного материала и для покрытия часто контактирующих с кожей поверхностей в общественных местах (последнее связано с антимикробными свойствами этого металла).

Самый легкий из широко используемых металлов позднее остальных стал производиться в промышленных объемах. Алюминий был открыт Хансом Кристианом Эрстедом в 1825 году, и в течение последующих 60 лет выпускался в мизерных количествах и шел только на изготовление новаторских ювелирных украшений; даже в 1884 году самым большим изделием из алюминия была пирамида весом 2,85 кг, украсившая верхушку Монумента Вашингтона (Binczewski, 1995). Люди хотели научиться производить алюминий в промышленных объемах не только по

причине очень низкой плотности этого металла ($2,7 \text{ г/см}^3$, что в три раза меньше, чем у железа — $7,9 \text{ г/см}^3$), но также благодаря его прекрасной электропроводности (уступает только серебру, золоту и меди) и необычному сочетанию хорошей ковкости (алюминий легко обрабатывается прокатом, выдавливанием и штамповкой), высокой прочности на растяжение (уступает только специальным сталям, может быть еще более прочным в сплавах с медью, кремнием или цинком) и коррозионной стойкости. Более того, композитные алюминиево-керамические материалы демонстрируют необычную жесткость и долговечность. Металл нетоксичен и может использоваться для изготовления посуды под пищу и напитки, а выброшенные изделия из алюминия легко прессуются, благодаря чему его переработка не является энергозатратной.

Анри Сен-Клер Девиль был первым экспериментатором, которому удалось получить этот металл электролитическим методом в 50-х гг. XIX века, но ни один из предложенных позднее вариантов его метода так и не стал ключом к массовому производству алюминия. Наиболее практичная технология выплавки алюминия была найдена в 1886 году и часто приводится как исключительный пример того, как двое исследователей независимо друг от друга, но практически одинаково решили одну и ту же техническую задачу: оба изобретателя — Чарльз Мартин Холл, США, и Поль Луи Туссен Эру, Франция — быстро внедрили открытый ими метод в промышленное производство, и первые два завода были запущены уже в 1888 году; интересно также, что обоим на момент совершения открытия было по 23 года (Borchers, 1904). Процесс Холла-Эру до сих пор остается единственной технологией производства алюминия в больших количествах.

В 1888 году Карл Иосиф Байер выделил оксид алюминия — глинозем — из бокситов, красноватых соединений, которые повсеместно встречаются в тропиках (латеритный боксит) и названы в честь местечка Ле-Бокс на юге Франции, где они были впервые найдены Пьером Бертье в 1821 году. Открытие Байера также упростило производство алюминия. Оксид алюминия Al_2O_3 (неэлектропроводное соединение) растворяется в расплавленном и хорошо проводящем ток криолите (Na_3AlF_6 , гексафтороалюминат натрия), образуя идеальную комбинацию для дальнейшей эффективной электрохимической сепарации в больших электролитических сосудах; на производство 2 тонн глинозема уходит 4–5 тонн бокситов, а из 2 тонн оксида восстанавливается 1 тонна чистого алюминия. К 1900 году общий объем производства алюминия составлял всего около 8000 тонн, но уже тогда его цена была в двадцать раз меньше уровня 1888 года (Borchers, 1904).

Помимо строительных заполнителей и металлов следует выделить еще один материал: бумагу. Ее крупномасштабное производство претерпело значительные изменения в начале XIX века, когда появилась бумагоделательная машина непрерывного действия, запатентованная Луи Николя Робером в 1799 году во Франции, но впервые задействованная в промышленном производстве Анри Фурдринье в 1801 году в Англии; с тех пор ее называют именем последнего. Эта огромная машина состояла из нескольких огромных цилиндров, формовавших, обезвоживавших и сушивших огромные непрерывные рулоны бумаги (Nuttall, 1967). Волокнистую массу укладывали на большую проволочную сетку во влажной секции машины, затем суконным прессом выгоняли большую часть влаги, а завершался процесс прогоном бумаги

через несколько нагретых цилиндров. Но сырье оставалось все тем же самым: до 70-х гг. XIX века бумагу делали из переработанной ветоши, из-за чего объемы производства оставались низкими, а цены — высокими.

Поэтому изобретатели того времени экспериментировали с десятками натуральных волокнистых материалов: от акации и агавы до репейника и юкки; однако, исходя из доступности, распространенности и свойств материала, лучшим вариантом признали древесину (Smith, 1970). В 70-х гг. XIX века в производстве бумаге из древесины использовали механически измельченную древесную массу, однако из-за высокого содержания лигнина в ней бумага получалась низкого качества и быстро желтела. В настоящее время на такой печатают дешевые газеты, из нее делают туалетную бумагу и картон, в том числе строительный (Smil, 2005). В производстве бумаги из химически обработанной древесной массы сначала использовалась щелочь (сода), но вскоре на смену этой технологии пришел кислотный (сульфатный) метод, позволявший получать древесную массу с лучшими механическими свойствами, но очень хрупкую бумагу: все издания, напечатанные на кислотной бумаге, постепенно разрушались. Но такая бумага была дешевой и оказала очевидный эффект на масштабы печатного дела: в 1872 году каталог «Монтгомери Уорд» (фирмы, торгующей по почте) состоял из одной страницы, два десятилетия спустя в нем было уже более 600 страниц (Montgomery Ward & Company, 1895). Этим революционным изобретением — сульфатным процессом для получения древесной массы — мир обязан шведскому химику Карлу Ф. Далю, изобретшему данный метод в 1879 году; однако в промышленных масштабах технология начала применяться только в 1900 году.

Что касается текстиля, то изменения XIX столетия в этой отрасли носили в основном количественный характер, так как механизация ткачества, начавшаяся с появления станка Картрайта и эффективного парового двигателя Ватта, позволила значительно расширить текстильное производство, а выросший общий уровень дохода членов урбанизированных и индустриализированных обществ привел к появлению новых рынков для всех видов тканой продукции; гардероб людей больше не ограничивался одним-двумя комплектами верхней одежды. Среди других технических инноваций, способствовавших развитию этой отрасли, следует отметить использование фабриками высокомошных водяных колес и — несколько позже — турбин; замену традиционных деревянных валов на железные, появление станков на железных рамах, что позволило снизить эксплуатационные затраты и одновременно повысить производительность. О прогрессе в текстильной промышленности можно судить по британской статистике: в 1800 году в стране было всего около 2000 ткацких станков, но уже в начале 30-х гг. того же столетия их число превысило 100 000, а в 1857 в Великобритании работало 250 000 станков (Hills, 1993).

Наконец стоит сказать, что научный и технический прогресс второй половины XIX века привел к первой промышленной добыче газов из атмосферы. В 1852 году Томас Джоуль и Уильям Томпсон лорд Кельвин обнаружили, что сжатый воздух, пропускаемый через пористые перегородки, слегка охлаждается: его температура падает при уменьшении давления примерно на 0,25°C за каждые 100 кПа. Повторное расширение приводит к каскадному охлаждению, в результате которого газ может перейти в жидкость; первое практическое применение эффекта Джоуля-Том-

сона было запатентовано Карлом фон Линде в 1895 году (Linde, 1916). Более века спустя основанная им одноименная компания стала мировым лидером в области сжижения газа.

2.6 Материалы XX века

Я уже говорил, что современное высокоэнергетическое общество XX века появилось благодаря беспрецедентному сочетанию технического, научного и управленческого прогресса с 1865 по 1913 год; изменения, которые повлек такой прогресс, в купе с некоторыми значимыми инновациями привели к значимым количественным, социальным и экономическим перестановкам, а также к повышению уровня жизни людей (Smil, 2005, 2006). В последнем параграфе этой главы я бы хотел кратко рассказать о том, как важнейшие из произошедших в XX веке изменений в производстве и использовании материалов — от привычной биомассы до современной электроники — способствовали возникновению новых реалий.

Пожнивные остатки, собираемые на полях каждый год, были незаменимым материалом во всех традиционных сельскохозяйственных обществах, поскольку это был возобновляемый ресурс. Во многих обезлесенных регионах они также были единственным источником бытового топлива; из смеси соломы и глины делались кирпичи и связки для крыш; в некоторых странах крестьяне носили соломенную обувь и плащи, а сено служило и подстилкой, и кормом для одомашненных жвачных (сено может наполовину состоять из целлюлозы, которую переваривают только жвачные). В XX веке соломенные крыши и сандалии практически исчезли; в богатых странах большая часть соломы (более 60% его годовых объемов) перерабатывалась с целью повышения качества почв; однако во многих других странах пожнивные остатки все еще использовались в качестве топлива и корма.

Согласно моим ретроспективным расчетам ежегодного объема пожнивных остатков на них в 1900 году пришлось почти 75% всего урожая общей массой 1,5 миллиарда тонн; в 1950 году доля пожнивных остатков все еще составляла около 70% (Smil, 2013). Последующее распространение современных сортов и увеличение средних коэффициентов урожайности — соотношения масс зерна и соломы, которое сейчас достигло значения 1:1 — снизили долю соломы до 65% к 1975 году и до 58% к 2000 году. По моим расчетам, в том году общемировая масса пожнивных остатков продовольственных и кормовых культур составила не менее 3,75 миллиарда тонн сухого веса. Для сравнения: Вирсениус (Wirsenius, 2000) считает, что та же цифра в 1992–1994 гг. составляла 3,46 миллиарда тонн в год; Хаберл и др. (Haberl и соавт., 2006) называют цифру 2,71 миллиарда тонн за 2000 год. Не имеется достоверных данных о том, куда в конечном счете деваются все эти пожнивные остатки: во многих агроэкосистемах необходима их прямая переработка, позволяющая сохранять почву и предотвращать ее эрозию; однако порой масса таких остатков считается избыточной, и их просто сжигают в полях. Такая не вполне одобряемая практика широко распространена в тех регионах Азии, где занимаются рисоводством.

До сих пор солому жгут даже в некоторых развитых странах, среди которых выделяется Дания, где около 1,4 миллиона тонн пшеничной соломы (почти четверть

общей массы урожая) уходит на обогрев домов, центральное отопление и выработку электричества (Stenkjaer, 2009). Строительные плиты изготавливались из измельченной и прессованной (или плавленной со смолами) соломы; этим занимались такие компании, как Stramit International и Agriboard Industries, а некоторые «зеленые» архитекторы продвигают идею строительства зданий из соломенных блоков. Пожнивные остатки также можно использовать как источник органических соединений. Так, из соломы зерновых и кукурузы получают фурфурол — селективный растворитель, используемый при переработке сырой нефти и в производстве фенольных продуктов (Di Blasì и соавт., 2010). Солома также может использоваться в качестве субстрата при выращивании грибов: на пшеничной соломе выращивают шампиньоны двуспоровые, а на рисовой — соломенные грибы (De Carvalho и соавт., 2010).

XX век, несомненно, был эпохой металлов и пластмасс; их новизна и повсеместность затмили древесину. И хотя в развитых странах расход древесины на душу населения действительно снизился, совокупный спрос на древесину значительно возрос, так как древесина не только сохранила, но даже укрепила свои позиции на большинстве устоявшихся рынков. Единственной категорией, где она практически перестала использоваться в XX веке, было кораблестроение: в современном мире из этого материала делают разве что небольшие суда (лодки и яхты), а также интерьеры более дорогих кораблей. В следующей главе я подробно рассмотрю две основные статьи расхода этого материала: производство пиломатериалов и древесной массы для изготовления бумаги; а пока отмечу, что древесина все еще важна в качестве топлива, а также для строительства железных дорог и добычи угля.

Все агрегированные значения объемов израсходованной топливной древесины основываются на оценках и предположениях с неопределенностью порядка 50% — то есть оценочные данные за 2000 год не точнее данных за 1950 год (Fernandes и соавт., 2007). По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), в 2000 году по всему миру было сожжено около 1,825 миллиарда кубометров топливной древесины; организация также упоминает 75 миллионов кубометров древесных остатков и 49,2 миллиона тонн древесного угля, на производство которых при среднем значении множителя 6,0 ушло почти 300 миллионов кубометров древесины; таким образом, совокупный объем топлива из твердой биомассы составил порядка 2,2 миллиарда кубометров древесины (ФАО, 2013). При плотности воздушно-сухой древесины около 0,65 т/м³ и энергоемкости 15 ГДж/т получаем 21,5 эксаджоулей энергии и 1,43 миллиарда тонн. Однако во многих странах источником древесины являются не леса, поэтому обобщенные оценки ФАО явно занижены.

По самым точным из моих оценок было израсходовано порядка 2,5 миллиарда тонн воздушно-сухой древесины или 2 миллиарда тонн абсолютно сухого вещества, содержащего примерно 35 эксаджоулей; если включить в расчеты сжигание пожнивных остатков сельскими домохозяйствами, то нужно добавить как минимум еще 10 эксаджоулей, получив в итоге 45 эксаджоулей энергии, выработанной в 2000 году, что эквивалентно 3 миллиардам тонн древесины (Smil, 2010). Эти данные отлично согласуются с выводами Туркенбурга, который насчитал 45 ± 10 эксаджоулей (Turkenburg, 2000) и лишь на 20% выше цифр, названных Фернадесом и др.: 2,457 миллиарда тонн (37 эксаджоулей) твердой фитомассы, израсходованной в качестве топлива (75% в виде древесины и 20% в виде пожнивных остатков) (Fernandes и

соавт., 2007). Таким образом в качестве удобного консенсуса по расчетам энергии, полученной из древесины и иной биомассы в 2000 году, можно взять цифру 40 эксаджоулей; если исходить из этого значения, то потребность в топливе из биомассы возросла на 70% с 1950 по 2000 год, а в целом в течение XX века сбор древесных и пожнивных остатков удвоился.

Однако из-за быстрого роста населения в этот период средние подушевые показатели потребления сильно снизились; значительно возросли объемы добываемых ископаемых видов топлива, из-за чего доля биотоплива в общемировом производстве первичной энергии снизилась с 50% в 1900 году до менее 10% в 2000, а из-за низкого КПД сжигания древесины и соломы из этого источника было получено всего 5% полезной конечной энергии. Если говорить о крупнейших экономиках мира, то древесина занимает первое место среди источников энергии, вырабатываемой в Бразилии (примерно 10%); в богатых странах доля древесины варьируется от совсем незначительной (всего 1% в Великобритании и Испании) до примерно 20% в Швеции и Финляндии; в США этот показатель снизился с примерно 4,5% в 1950 году до 2% в 2010 году (Eurostat, 2012; USEIA, 2013).

Деревянные шпалы — квинтэссенция инноваций XIX века — в течение всего XX столетия сохраняли лидирующее положение на мировом рынке. В 90-х гг. XX века 94% шпал в Америке были деревянными; и даже несмотря на относительно высокую долю бетонных шпал в некоторых частях Европы и Азии, лишь 15% шпал в мире были сделаны не из древесины (Sommath и соавт., 1995). Обработка шпал позволила продлить срок их службы; в 1940 году он составлял примерно 35 лет, в 2000 — уже 40–50 лет (James, 2001). В Европе и Северной Америке шпалы в основном покупаются для замены старых; а вот в Азии железнодорожная сеть продолжает расширяться, при этом на самой впечатляющей из новых веток азиатских железных дорог — маршрут Голмуд-Лхаса в Тибете — используются только бетонные шпалы.

Мировой рынок рудничных стоек для подземных шахтных работ продолжал расти после Второй мировой войны, однако спрос на них снизился из-за сокращения угледобычи в Европе и перехода к поверхностной добыче в США и Австралии. По моим расчетам, объем древесины, задействованной в угольных шахтах, превысил 20 миллионов кубометров (примерно 15 миллионов тонн) в 1900 году и 40 миллионов кубометров в 1950 году, что составило примерно 2% общемировой добычи круглого леса. Европа и Япония теперь меньше зависели от угля, а увеличение доли поверхностной добычи и повсеместное внедрение так называемых «длинных забоев», использующих подвижные стальные опоры, привели к значительному падению спроса на рудничные стойки в западных странах после Второй мировой войны.

В Китае, наоборот, добыча угля с 1950 по 2010 год увеличилась в 75 раз (с 43 до 3235 миллионов тонн), однако в этой стране, которая не может похвастаться большими запасами леса, удельный расход древесины всегда был значительно ниже, чем на Западе, где он обычно составлял 0,025 м³/т. Низкий удельный расход рудничных лесоматериалов (сейчас составляет всего лишь 0,005 м³/т) означает, что, несмотря даже на значительный рост объемов добычи угля, затраты круглого леса на нужды китайской угольной промышленности составляют менее 10% общего расхода древесины в стране (SFA, 2009). Однако будучи одним из ведущих экспортеров раз-

личной продукции, Китай занимает первое место по расходу древесины, фанеры, картона и бумаги на упаковку товаров.

Как я уже отметил, в 1900 году уже существовали все технические предпосылки начала производства бетона — самого распространенного строительного материала в мире; однако первой крупной инициативой по его популяризации стал замечательный, хоть и считавшийся тогда бессмысленным, эксперимент Томаса Эдисона по проектированию и строительству монолитных бетонных домов (Courland, 2011). Изобретатель приступил к работе над этим проектом в 1906 году после неудачной попытки разработать улучшенные батареи. Пять лет спустя, когда и этот проект был близок к провалу, Эдисон попытался вдохнуть в него новую жизнь, пообещал изготовить дешевую бетонную мебель, включая полноценные спальные гарнитуры, и даже бетонный фонограф. Мечте Эдисона о строительстве недорогих домов из бетона не суждено было сбыться, однако некоторые архитекторы стали использовать бетон в своих наиболее важных и знаковых проектах.

Во Франции Огюст Перре спроектировал несколько элегантных многоквартирных домов и Театр на Елисейских полях еще до начала Первой мировой войны; в США за применение этого материала выступал Франк-Ллойд Райт. Спроектировав несколько небольших зданий в США до начала Первой мировой, он построил Императорский отель в Токио, работа над которым завершилась незадолго до того, как город был разрушен землетрясением в 1923 году. Однако отель выстоял и получил лишь незначительные повреждения; в 1968 году его снесли. Среди других передовых проектов Райта по строительству бетонных сооружений можно отметить штаб-квартиру Johnson Wax в Расине, Висконсин (1939 год), Фоллингуотер-Хаус в Пенсильвании (1935 год) и Музей Гуггенхайма в Нью-Йорке (1959 год).

Среди прочих известных возведенных после Второй мировой войны зданий, строительство которых стало возможно благодаря железобетону, отметим Сиднейскую оперу (построенная Йорном Утцоном и завершенная после многочисленных задержек в 1973 году, она славится своим изысканным обликом) и небоскреб Бурдж-Халифа в Дубае — самое высокое здание в мире, достроенное в 2010 году. Преднапряженные конструкции могут выдерживать ту же нагрузку, при этом они содержат на 70% меньше стали и на 40% меньше бетона, что позволяет им быть гораздо менее объемными. Этим пользовались авторы многих новаторских архитектурных проектов. Эжен Фрейсине стал первопроходцем в строительстве по такой технологии; он также ввел новую технологию, заключающуюся в натяжении арматуры через проходы в сборном железобетоне (Grotte and Marrey, 2000).

В первой половине XX века железобетон стал самым важным материалом в строительстве новых мостов и дамб, новых прибрежных сооружений; он также лежит в основе современной транспортной инфраструктуры. Швейцарский архитектор Робер Майяр проектировал изящные железобетонные мосты еще до Первой мировой войны (Billington, 1989). Самый длинный мост в мире — Великий мост Даньян-Куньшань в Китае — также построен из железобетона (строительство завершилось в 2010 году). Самые большие плотины в Америке, возведенные в 30-х гг. XX века (плотина Гувера на реке Колорадо и Гранд-Кули на реке Колумбия), стали предвестниками появления еще более крупных сооружений по всему миру после Второй мировой войны; самая большая плотина в мире — китайская плотина Сань-

ся («Три ущелья») на Янцзы, высокой 185 м и длиной 2,3 км — содержит почти 28 миллионов кубометров бетона и 500 000 тонн стальной арматуры.

В 1982 году буровая платформа Statfjord B стала самым тяжелым перемещаемым объектом: 816 тысяч тонн (большая часть веса приходилась на железобетон в четырех массивных бетонных колоннах и резервуарах этого сооружения) было отбуксировано на позицию в Северном море (Aker Solution, 2013). Современная пассажирская авиация также полагается на железобетон: из него строятся взлетно-посадочные полосы, подходы и стоянки аэропортов, которым необходимо выдерживать постоянное движение самолетов весом от 150 (Boeing 737) до 277 тонн (Airbus 380); бетон ВПП достигает 1,5 метра в толщину, а длина полос может доходить до 3600–4000 метров. Однако большей частью железобетон уходил на строительство не шедевров архитектуры, а невзрачных или откровенно уродливых многоквартирных домов, высоток, фабрик, гаражей, дорог, эстакад и парковок.

Технология Пилкингтона по производству так называемого «флоат-стекла» позволила изготавливать оконные стекла невиданных ранее размеров, и многие архитекторы этим воспользовались. В 2010 году объем общемирового рынка стекла достиг 56 миллионов тонн, наблюдался ежегодный прирост 4–5%; из них: 33 миллиона тонн качественного флоат-стекла, 1 миллион тонн листового стекла, 2 миллиона тонн прокатного стекла, примерно 20 миллионов тонн низкосортного флоат-стекла, преимущественно китайского производства (NSG, 2011). Прогресс не обошел стороной и такую характеристику этого материала, как чистота. Стекло со временем стало проводником информации. К 1900 году лучшее оптическое стекло было примерно в 10 000 раз прозрачнее первых образцов стекла, изготовленных в Египте около 5000 лет назад; после 1970 года путем применения высокочистого диоксида кремния удалось повысить прозрачность стекол на четыре порядка величины; так началась эра оптического волокна, позволяющего передавать данные на большие расстояния (Agrawal, 2010).

Господство стали на мировом рынке металлов, установившееся к 1900 году, еще больше укрепилось в XX веке благодаря непрерывному улучшению технологий выплавки железа и производства стали, а также благодаря появлению новых рынков, где сплавы этой категории требовались в больших количествах. В течение более чем двух третей XX столетия сталь в основном производили в мартеновских печах. Принцип тихого дутья в таких печах не менялся, однако само оборудование увеличивалось в размерах и становилось куда более производительным. Незадолго до 1900 года самые большие сталеплавильные печи в США занимали площадь около 30 м², после Первой мировой войны максимальный размер увеличился до 55 м², к 1945 году практически достиг 85 м², а стандартная вместимость печи, составлявшая около 40 тонн в 1900 году, во время Второй мировой равнялась уже 200 тоннам (King, 1948). Кроме того, люди все чаще прибегали к электродуговым печам, появившимся в 1902 году, для превращения постоянно увеличивавшихся запасов металлолома в высококачественную сталь. На производство первых автомобилей 90-х гг. XIX века стали уходило немного, так как машины были штучным товаром, а кузова тогда изготавливались из дерева. Однако в 1908 году фордовская «Модель Т» положила начало массовому производству персональных транспортных средств, и автомобильная промышленность стала ведущим потребителем стали: ее спрос на

этот сплав возрос с 70 000 тонн в 1910 году до 1 миллиона тонн к 1920 году (Hogan, 1971). В течение многих десятилетий почти все эксперты-металлурги отвергали идею крупномасштабного производства нержавеющей стали. Английскому металлургу Гарри Брирли приписывают изобретение нержавеющей стали, предназначенной для коммерческого производства, в 1913 году. Та сталь, которой с готовностью стали пользоваться знаменитые шеффилдские производители столовых приборов, содержала почти 13% хрома. Однако американцы и немцы добились серьезных успехов на этом поприще примерно в то же время, что и англичане.

Помимо столовых приборов из стали вскоре начали производить хирургические имплантаты и посуду; она нашла применение в пивоварении, виноделии, пекарном деле и мясоперерабатывающей промышленности, где из нее делались большие пищевые контейнеры. В 30-х гг. XX века нержавеющей сталью впервые воспользовались строители: первым примечательным сооружением из этого сплава стал воздвигнутый в 1930 году башенный шпиль нью-йоркского небоскреба Крайслер-билдинг. Год спустя на Эмпайр-стейт-билдинг установили оконные рамы и пилястры из нержавеющей стали. Популярностью пользовались скоростные пассажирские поезда с аэродинамическими стальными кузовами (начиная с появившегося в 1934 году поезда «Берлингтон-Зефир»), однако позже на смену стали пришел более легкий алюминий.

Производство стали упало во время Великой депрессии. Так, в США оно снизилось в 1929–1932 гг. на 75% до 12,4 миллиона тонн, но достигло новых высот в военные годы, когда отмечался беспрецедентный спрос на металл. Такие изменения привели к возникновению новых проблем и решений. Из-за более высокой скорости дутья кирпичная футеровка быстро изнашивалась — и люди изобрели водное охлаждение. Увеличившиеся объемы руды, кокса и известняка уже нельзя было перемещать вручную — и появились механизированные подъемники и устройства автоматического сброса. Для работы нагнетателей требовался чистый газ — и инженеры разработали новое, более эффективное газоочистное оборудование, включая электростатический фильтр Фредерика Коттрелла, впервые представленный в 1919 году.

Расход металла на производство вооружений, потребовавшихся для победы во Второй мировой войне, оживил американскую металлургию, и в 1950 году США первыми начали использовать такие технологии, как выплавка под давлением (позволяет экономить кокс), обогащенные руды, впрыск газообразного или жидкого топлива, обогащение вдуваемого воздуха кислородом, а также автоматический контроль рабочих операций (Gold и соавт., 1984). Но уже к 1960 году, ведущим инноватором черной металлургии стали Япония (крупнейший в мире производитель металлов после СССР) и Европа. Крупные и более эффективные доменные печи для выплавки железа, конвертерные (бессемеровские) печи для производства стали, а также непрерывное литье стальных изделий — вот эти три изобретения преобразили мировую металлургию после Второй мировой войны; в следующей главе, рассматривая достижения в производстве металлов, я подробнее на этом остановлюсь.

Массовое производство недорогой и высококачественной конструкционной стали позволило начать строительство высотных зданий в центрах больших городов на всех населенных континентах; во многих этих зданиях сталь используется даже в наружных покрытиях. Завершенный в 1954 году нью-йоркский Сокони-Мобил стал

первым небоскребом с облицовкой полностью из нержавеющей стали (впервые его почистили только в 1995 году). После него было построено множество небоскребов со стальной облицовкой (обычно в виде навесных стен), среди которых отметим Стальную башню в Питтсбурге и башни-близнецы Петронас в Куала-Лумпуре (некоторое время были самым высоким строением в мире). Небоскреб Бурдж-Халифа отличается светоотражающим остеклением и текстурированными перемычками из нержавеющей стали.

Однако гораздо большее количество стали в виде листов и стержней уходило на производство легковых и грузовых автомобилей, создание новой наземной транспортной инфраструктуры: от многополосных автодорог и мостов до аэропортов, строительство больших нефтяных танкеров, сухогрузов, перевозящих все виды товаров от зерна до руды, а также, начиная с 60-х годов, контейнерных судов и портов. Сталь позволяет проектировать и строить весьма интересные с точки зрения архитектурного облика висячие мосты, длинные дорожные пролеты которых удерживаются тросами. Так, длина японского моста Акаси Кайкио, связывающего острова Хонсю и Сикоку, составляет почти 2 км (1991¹⁰ м). Транспортная отрасль также стала основным потребителем алюминия: благодаря сочетанию легкости и долговечности этот металл и его сплавы стали идеальным выбором для широкого ряда изделий: от кухонной утвари до вагонов скоростных поездов; кроме того, он незаменим в авиации.

С 1900 по 1943 год объемы производства алюминия, спрос на который был беспрецедентным благодаря развитию авиастроения, увеличились почти в 300 раз до 2 мегатонн; на пике спроса 45% алюминия расходовалось в США, которые тогда взяли за крупнейший в истории проект по производству рекордных количеств военных самолетов. После 1950 года к производству алюминия подключилось множество новых предприятий; к 2000 году объем электролитического производства этого металла приблизился к 25 миллионам тонн, в 2008 году достиг нового рекордного значения — почти 40 миллионов тонн, при этом спрос на алюминий после 2000 года возрастал в основном за счет Китая (USEIA, 2013; IAI, 2013). Помимо самолетостроения конструкционный алюминий стали широко использовать в строительстве палуб и надпалубных сооружений (начиная с 40-х гг.), судов (от небольших целиком алюминиевых лодок до сооружений на морских буровых платформах, от больших круизных лайнеров до дорогих яхт) и вагонов.

Среди различных отраслей промышленности, возникших после 1950 года и нуждающихся в больших количествах алюминия, можно отметить производство ирригационных труб (особенно это касается систем кругового орошения, распространенных в засушливых регионах), теплообменников (широко применяются для кондиционирования воздуха, а также в медицинском оборудовании и электронике), и даже шпунтовых свай. В то же время спрос на алюминий упал там, где этот металл традиционно считался востребованным: в аэрокосмической отрасли ему на смену пришел титан (особенно это касается сверхзвуковых самолетов), а в производстве простых изделий его заменили на менее энергоемкие и более дешевые пластмассы. На производство титана уходит в два раза больше энергии (около 400 гигаджоулей

¹⁰ В оригинальном тексте допущена опечатка: указано «1199 м». — *Прим. пер.*

на тонну), чем на всю цепочку получения алюминия (в следующей главе опишу этот процесс поподробнее), однако его температура плавления составляет 1667°C , что в 2,5 раза выше, чем у алюминия (660°C), поэтому титан больше подходит для обшивки сверхзвуковых самолетов.

После Второй мировой войны спрос на медь формировался в основном за счет пяти основных рынков конечной продукции: в строительстве медь уходила на производство электропроводки, сантехники, систем охлаждения, трубы кондиционеров, а также на обшивку и кровлю; из меди делались детали промышленного оборудования, соединения, проводка и теплообменники; медь использовалась во всех видах транспортных механизмов, а также в промышленном электрическом и электронном оборудовании, прежде всего телекоммуникационном и осветительном; наконец, медь применялась в производстве потребительских товаров, в основном различных электронных устройств, электрических кабелей и во многих странах – в чеканке монет. Общемировой объем используемой меди составлял менее 500 000 тонн в 1900 году, но превзошел 13 миллионов тонн в 2000; таким образом, медь осталась на третьем месте среди металлов XX века.

Четвертым по важности металлом считается цинк, потребление которого составило 12,6 миллиона тонн в 2010 году; при этом отмечается стабильно растущий спрос на свинец: если раньше он, будучи на пятом месте, сильно отставал от цинка, то не так давно разрыв между этими двумя металлами сократился: в 2011 году общемировой объем поставок очищенного свинца впервые в истории превысил 10 миллионов тонн и достиг 10,6 миллиона, 45% которых было получено в виде первичного металла, остальное — из переработанных материалов (ILZSG, 2013). Хотя использование тетраэтилсвинца как автомобильной присадки, предотвращающей «стук»¹¹ бензиновых двигателей, было запрещено в Японии в 1986 году, в США в 1995 году, в ЕС и Китае в 2000 году, рост мирового рынка легковых и грузовых автомобилей и, следовательно, ежегодная установка десятков миллионов новых и сменных свинцово-кислотных аккумуляторов, привели к возникновению рекордного спроса на этот металл. Общее число легковых автомобилей, легких и тяжелых грузовиков составляет чуть более 1 миллиарда; в среднем аккумулятор легкового автомобиля содержит 10 кг свинца, грузовика — 13 кг; таким образом, по дорогам мира в 2010 году ездил почти 11 миллионов тонн свинца. Кроме того, этот тяжелый металл остается незаменимым припоем в электронике.

Использование кремния, легкого ($2,3 \text{ г/см}^3$) полуметалла, стало синонимом современной электроники, однако на заре этой отрасли и в ее развитии до 50-х гг. этот элемент не применялся. Теоретические начала электроники восходят к 60-м гг. XIX века, работам Джеймса Кларка Максвелла и Рудольфа Герца; практическое применение началось в 90-х гг. того же столетия, когда несколько исследователей и инженеров попытались создать беспроводную телеграфию — метод отправки сигналов по воздуху. Наиболее известными из них были Никола Тесла, Дэвид Хьюз, Александр Степанович Попов, Уильям Крукс, Эдуард Бранли, Оливер Джозеф Лодж и Гульельмо Маркони.

¹¹ Здесь имеется в виду нежелательная детонация топлива в бензиновых двигателях внутреннего сгорания. — *Прим. пер.*

Маркони был первопроходцем, не полагавшимся на новые материалы: его первые вещательные башни в Ньюфаундленде были деревянными, а искрогенераторы и проволочные антенны были сделаны из распространенных металлов. Более поздние модели высокочастотных генераторов были созданы Реджинальдом Фессенденом Обри и Эрнстом Фредериком Вернером Александерсоном и были способны генерировать незатухающую волну с радиосигналом. Это оборудование является замечательным примером точного машиностроения; однако настоящим прорывом, с которого началось массовое производство электроники, стало изобретение Флемингом диода — по сути, лампочки с электродом. «Потомки» диода — триоды, тетроды, и пентоды — требовали тщательного и осторожного подхода к их производству, однако с точки зрения используемых материалов все эти вакуумные трубки представляли собой просто много стекла и горячих нитей накаливания (в основном из вольфрама).

Радио было впервые представлено в начале 20-х гг., а уже в 30-х стало недорогим и распространенным устройством; первым дорогим, но при этом массовым электронным прибором, стал телевизор. Телевещание впервые состоялось в Великобритании и США еще до Второй мировой войны; к 1948 году менее 200 тысяч семей имели у себя дома громоздкий шкаф с маленьким черно-белым экраном, однако уже к 1960 году телевизор стоял в 90% американских домов. Первая телепередача в цвете состоялась в 1954 году, однако доступные цветные телевизоры появились лишь в конце 60-х, а к 1975 цветной телевизор имелся у двух третей американских семей (Abramson, 2003). К тому времени уже практически завершился переход к твердотельной электронике.

Земная кора почти на 28% состоит из кремния, и хотя в форме своего диоксида SiO_2 (кремнезема) он присутствует в больших количествах в песке, песчанике и кварце, а также многих силикатах: от твердых полевых шпатов (породообразующих минералов) до мягкого каолинита (слоистого глинистого минерала), в природе его попросту не существует в чистом, элементарном виде (вне соединений). Однако чистый кристаллический кремний является материальной основой современной электроники: замысловатые переплетения полупроводников и соединений впечатываются в тонкие пластины из ультрачистого кремния; оптическое волокно (изготавливается путем сплавления SiO_2 and GeO_2 , помещения этого сплава в трубу, где из него образуется стекло, из которого вытягивают волокно) используется для передачи данных между странами и континентами; а фотоэлектрические преобразователи обеспечивают энергией спутники связи, передающие данные и сообщения между континентами. Кроме того, фотоэлементы все чаще используют для выработки электричества на земле. Кремний очень важен, и потому заслуживает отдельного подробного анализа.

Пластмассы нередко рассматриваются как материальная quinta эссенция XX века; после Второй мировой войны они распространялись невероятно быстро, заменяя дерево, металлы и стекло во многих домашних, промышленных и транспортных приложениях (Strom and Rasmussen, 2011). Хотя история синтетических материалов начинается с 70-х гг. XIX века, когда Джон Уэсли Хайятт запатентовал свой целлюлозный процесс и химики начали изучать фенолформальдегидные реакции, реального прогресса удалось достичь только в 1907 году, когда Лео Хендрик Бакеланд, бельгийский химик, работавший в Нью-Йорке, подготовил первую в мире термо-

реактивную пластмассу, образующуюся при температурах 150–160°C (Bakeland, 1909). Его фирма, General Bakelite Company, основанная в 1910 году, первой в истории начала масштабное промышленное производство пластмасс; из бакелита вскоре стали изготавливать широкий ряд изделий: от телефонов до электроизоляции, от дверных ручек до деталей легкого оружия.

В 1912 году Жак Э. Бранденбергер представил несколько своих изобретений: целлофан (гидратцеллюлоза¹², сначала была представлена во Франции, в 1924 году появилась и в США), стирол (его полимер со временем стал ведущим изоляционным и упаковочным материалом) и ацетат целлюлозы (Brydson, 1975). А вот 30-е годы стали эпохой непревзойденных до сих пор открытий в области изучения пластмасс, чему предшествовали систематические исследования на базе научных организаций; главную роль в этом глобальном научном прорыве сыграли крупные химкомпании, прежде всего американская DuPont, немецкая IG Farben и британская Imperial Chemical Industries. Сначала в 1930 году команда DuPont под руководством Уоллеса Хьюма Карозерса начала выпускать неопрен (синтетический каучук), а IG Farben синтезировали полистирол. В начале 30-х ICI занялись исследованиями органических реакций под очень высоким давлением, и к 1935 году смогли произвести полиэтилен.

Кроме того, компания в 1933 году приступила к синтезу метилметакрилата; в том же году Ральф Уайли из Dow Chemical случайно открыл поливинилиденхлорид, больше известный как пищевая пленка. В 1935 году появился плексиглас (оргстекло), год спустя — полиуретаны (синтезированы Отто Байером в компании IG Farben), а в 1937 Карозерс запатентовал «полимер 66», известный под торговым наименованием «нейлон» (Carothers, 1937; Hermes, 1996). Первым нейлоновым изделием стали зубные щетки, выпущенные в 1938 году; вскоре за ними последовали чулки. В том же 1938 году Рой Планкетт (DuPont) случайно открыл политетрафторэтилен, известный под брендовым названием «тефлон». В 40-х были получены алкидные полиэферы и полиэтилентерефталат (ПЭТ). Из ПЭТ изготавливалось волокно (терилен и дакрон), пленка (майлар); с 1973 года он стал основным пластиковым материалом для производства бутылок для напитков, растительного масла и соусов. Стоит отметить также очень высокую долю ПЭТ-бутылок и контейнеров, отправляющихся на переработку; по этому показателю они лидируют среди пластмассовых изделий. Полученный в результате такой переработки материал идет на изготовление полиэфирных ковриков, наполнитель из искусственного волокна для спальных мешков и пальто, автомобильных бамперов и дверных панелей.

Среди величайших открытий 50-х годов отмечу полиимиды (используются в подшипниках и шайбах, а также в качестве устойчивых к тепловому и химическому воздействию материалов в электронике) и поликарбонаты (из них стали делать оптические линзы и окна, позже — покрытие для компакт-дисков); однако самым значимым достижением стал изобретенный Карлом Циглером метод синтеза поли-

¹² Гидратцеллюлоза — одна из структурных модификаций целлюлозы, имеет тот же химический состав, что и природная целлюлоза, но отличается от нее по свойствам. Гидратцеллюлозу получают из природной целлюлозы. — *Прим. пер.*

этилена при обычной температуре и под низким давлением с применением новых металлоорганических катализаторов. После 1960 года появились полисульфон (огнезащитный материал), полибутилен (гибкий полиолефин, используемый при изготовлении труб и пластиковой упаковки), жидкокристаллические полимеры (ароматические полиэферы, широко используемые в электронике), а также пластмассовые материалы DuPont, продаваемые под широко известными торговыми наименованиями: лайкра (спандекс, используется в производстве спортивной одежды), кевлар (пуленепробиваемый пара-арамид, из которого изготавливаются бронежилеты), огнеупорный номекс (используется в производстве пожарного оборудования и экипировки пилотов) и тайвек (высокоплотный полиэтилен, применяется в качестве водо- и паропроницаемого изоляционного материала для домов).

До начала 30-х гг. общемировое производство пластмасс не превышало 50 000 тонн; лишь в 1949 году оно достигло одного миллиона тонн, и лишь в 1960 смогло превзойти 6 миллионов тонн. Затем, благодаря доступности углеводородного сырья, мировой объем синтеза возрос на порядок величины: в 1989 году было произведено уже 100 миллионов тонн, в 2002-м — 200, в 2010-м — 265. Последняя цифра более чем шестикратно превышает мировое производство алюминия и равняется примерно 18% производства стали за тот же год. Но если сравнивать не по массе, а по объему, то пластмасс было произведено даже больше, чем стали: при средней плотности 1 г/см^3 их объем составил 265 миллионов кубометров, а объем стали — всего 181 миллион кубометров (средняя плотность $7,8 \text{ г/см}^3$).

Увеличившееся количество пластиковых отходов и их негативное влияние на окружающую среду привели к активизации усилий по переработке как минимум нескольких основных разновидностей пластмасс; опасения, связанные с истощаемостью углеводородного сырья, возродили интерес к возобновляемым (растительным) источникам сырья для синтеза пластмасс. Всего химическая промышленность предлагает более 50 видов материалов в этой категории, однако большая часть общемирового производства приходится лишь на несколько из них. В следующей главе я подробнее остановлюсь на трех основных продуктах этой отрасли — полиэтилене, полипропилене и поливинилхлориде.

Последними в этом кратком обзоре материальных инноваций XX века я рассмотрю достижения в производстве удобрений; если рассказывать о них в порядке важности для выживания человеческого рода, то в первую очередь следует рассмотреть синтез аммиака по методу Габера-Боша. В конечном счете, наша цивилизация вполне могла бы процветать и безо всякой кремниевой электроники (и до 50-х гг. XX века так и было); мы могли бы обойтись меньшим количеством стали (но тогда пришлось бы мириться с некоторыми неудобствами, да и производственные затраты были бы выше), могли бы жить без миллионов тонн пластика и металлических сплавов — но не выжили бы без применения удобрений, благодаря которым население Земли смогло увеличиться на 4,5 миллиарда человек за одно столетие, одновременно улучшив рацион большинства людей.

Доступность азота в почве была ключевым фактором, ограничивающим урожайность традиционных сортов; усердная переработка органики (пожнивных остатков, животного помета, человеческой мочи и фекалий), севооборот с включением бобовых видов, способных связывать атмосферный азот (люцерна, клевер и вика), а так-

же регулярное парование были единственными способами поддержания плодородности почвы. Многие богатые страны могли наращивать поставки пищи только за счет обеспечения большей урожайности, и решением проблемы стал азот (два других макроэлемента, фосфор и калий, легко обеспечиваются за счет добычи фосфор- и калийсодержащих минералов). В 1900 году у людей было всего три источника азота, пригодного для использования в качестве удобрений: постоянно снижающийся импорт гуано, чилийские нитраты и аммиак как побочный продукт работы коксовых печей. Во всем мире было израсходовано лишь 350 000 тонн азота, полученного из этих источников, что составило лишь 2% массы азотных удобрений, необходимой выращенным в том же году сельхозкультурам.

Сохраняющаяся зависимость от переработки органического вещества и посадки азот-связывающих бобовых не могли гарантировать достаточно высокий урожай для обеспечения качественного питания для растущего городского населения с высоким уровнем располагаемого дохода. Решение было найдено в 1909 году, когда Фриц Габер, профессор химии из университета Карслруэ, продемонстрировал практическую возможность каталитического синтеза аммиака из азота и водорода. Не менее значимо достижение Карла Боша, сотрудника корпорации BASF, Людвигсхафен, чья команда смогла на основе лабораторного опыта Габера развернуть полноценный синтез в промышленных объемах всего за четыре года (Smil, 2001). Большая часть синтезируемого тогда в Германии аммиака уходила на производство боеприпасов и взрывчатки для солдат, участвовавших в Первой мировой войне; прогресс, достигнутый в применении азотных удобрений за послевоенные годы, был не слишком значителен. А вот после 1950 года начались быстрые изменения, и в 70-х большая часть урожая выращивалась на азотных удобрениях в густонаселенных странах с низким уровнем дохода.

Общемировое производство синтетических удобрений (в пересчете на чистый азот) возросло с 150 000 тонн в 1920 году до 3,7 миллиона тонн в 1950 и 85,13 миллиона тонн в 2000, увеличившись таким образом на два порядка величины (примерно в 570 раз) за 80 лет. Интересно, что этот прирост даже нельзя назвать чем-то экстраординарным, так как рост объема производства других материалов в течение XX века был еще более значительным: выпуск алюминия увеличился на три порядка величины (примерно в 3600 раз с 6800 тонн в 1900 году до 24,3 миллиона тонн в 2000), пластмассы — на четыре порядка величины (с примерно 20 000 тонн в 1925 году до 150 миллионов тонн в 2000). Даже уже привычные и давно существующие материалы стали производиться в гораздо больших объемах. Так, в течение века стали производить примерно в 30 раз больше бумаги, в 30 раз больше стали (с 28,3 до 850 миллионов тонн) и в 27 раз больше меди (с 495 000 тонн до 13,2 миллиона тонн). Сравним эти цифры с приростом населения, которое с 1900 по 2000 год увеличилось в 3,8 раза, и с ростом валового мирового продукта (в постоянных ценах) — в 20 раз за тот же период; из этого следует, что в течение XX века расход материалов значительно возрос при расчете как на душу населения, так и на экономическую единицу.

Прежде чем приступать к подробному анализу долгосрочных тенденций расхода и потребления материалов, представлять системный обзор энергорасхода на их производство, выделять некоторые экономические проблемы, связанные с их производством и использованием, и отмечать некоторые успехи и задачи, связанные с

переработкой материалов (четвертая глава посвящена как раз всему этому), я бы хотел поподробнее и более системно рассмотреть важнейшие составляющие потребления материалов в современном мире: от сыпучих строительных материалов до сверхчистого кремния. Во всех случаях такой анализ я буду проводить на общем и глобальном уровне, нередко уделяя внимание развитию отдельных государств.

3

Самое вещественное

Учитывая огромное разнообразие материалов, используемых современной цивилизацией, систематический (и по-прежнему далекий от полноты) обзор их производства, энергозатрат, наиболее распространенных способов и видов применения, а также их воздействия на экологию, общество и экономику потребовал бы написания многотомного труда; обычной книги хватило бы только на ограниченную подборку коротких энциклопедических статей. Я нашел, как мне кажется, наиболее эффективное решение этой проблемы: в данной главе я опишу разнообразный состав каждой из основных категорий материалов, на непрерывных поставках которых основана современная цивилизация, а подробнее остановлюсь только на некоторых материалах, которые либо доминируют в количественном отношении, либо незаменимы в качественном. Я опишу основные методы производства каждого из этих ключевых материалов и отмечу некоторые важные промышленные достижения последних десятилетий.

Вначале будет дан обзор двух важнейших материалов биологического происхождения: пиломатериалов, используемых в строительстве и производстве мебели, и древесины, из которой делают бумагу. Затем я перейду к анализу наиболее часто используемых строительных материалов, то есть всех разновидностей песка и камня (гравия), а также цемента — достаточно энергоемкого продукта, сочетание которого с заполнителями и водой дает важнейший стройматериал мира — бетон. Третий раздел посвящен специфике и последствиям производства железа, стали и алюминия. Затем я расскажу о важнейших пластмассах, их производных, а также — что тоже необходимо сделать — об углеводородном сырье, необходимом для их производства, тревожных экологических последствиях использования таких материалов и проблемах их переработки.

В следующем разделе мы поговорим о трех основных промышленных газах, незаменимых в различных отраслях: от выплавки качественной стали до получения азотных удобрений; основными темами станут синтез этих газов, а также менее сложное производство двух основных минеральных удобрений: фосфатов и поташа.

Так как мы вступили во второй век электроники (на мой взгляд, эта отрасль зародилась с изобретением Флемингом диода в 1904 году (Fleming, 1934)), я подробно расскажу о материале, лежащем в основе современной вычислительной техники, а также визуальных и телекоммуникационных технологий. Поэтому последний раздел посвящен способам производства поликристаллического кремния, выращиванию все более крупных кристаллов и производству пластин из ультрачистого кремния, а также их нарезке с целью получения подложек для изготовления все более мощных микросхем.

3.1 Биоматериалы

Биоматериалы – категория многочисленная и разнообразная: к ним относятся и пиломатериалы, и солома, и хлопок, и шерсть, и пчелиный воск, и птичий пух, и шкуры животных; однако с точки зрения как массы, так и общей значимости, и незаменимости основным биоматериалом является дерево. Как я уже отмечал в предыдущей главе, пожнивные остатки, прежде всего солома зерновых, занимают в этом рейтинге второе место, так как остаются важным видом топлива в сельской местности многих стран с низким уровнем дохода. Но так как большая часть таких остатков либо сжигается в поле (особенно это касается рисовых полей в Азии) с целью удобрения и предотвращения эрозии почв, либо используется в качестве корма и подстилки для животных, применение их в строительстве стало весьма редким явлением (Barreveld, 1989; Unger, 1994; Smil, 1999).

Третье место по массовой доле занимают волокнистые культуры; в 2010 году их совокупный урожай составил порядка 26 миллионов тонн (FAO, 2013). В основном это хлопок, его урожай вырос с 7 миллионов тонн в 1950 году до 12 миллионов тонн к 1975 году и составил почти 19 миллионов тонн в 2000 году и 23,3 миллиона тонн в 2010 году. Кокосовое волокно занимает в этой подкатегории второе место с большим отставанием (1 миллион тонн в 2010 году). В пещере эпохи палеолита на территории Грузии были найдены волокна дикого льна (*Linum usitatissimum*), использовавшиеся, как считается, еще за 30 000 лет до н. э. для изготовления веревок (Kvavadze и соавт., 2009). Это растение считается старейшей из культивируемых волокнистых культур, и его собранный урожай превысил 600 тысяч тонн в 2010 году; за ним следуют сизаль (волокно из жестких листьев *Agave sisalana*, примерно 360 тысяч тонн в том же году) и рами (волокно из многолетнего кустарника *Boehmeria nivea*, почти 120 тысяч тонн собрано за 2010 год). Мировой урожай всех трех наименее важных культур — капока (волокно, окружающее семенные стручки большого тропического дерева *Ceiba pentandra*), абаки (волокна из листьев банана вида *Musa textilis*) и пеньки (конопляного волокна растения *Cannabis*) — приблизился к 100 тысячам тонн в год.

Два вида волокон, издревле использовавшихся для изготовления тканей — грубое конопляное волокно, из которого делали парусину, мешковину и холст, а также тонкое льняное волокно, во многих обществах применявшееся в производстве качественной ткани для одежды и крахмаленных носовых платков — теперь используются гораздо реже, а во многих странах их и вовсе почти не осталось. Сколько

мужчин в наше время постоянно носят сложенный платок-паше в кармане пиджака? И много ли осталось в мире кораблей, которые привязывают к столбам пеньковыми канатами, в эпоху, когда каннабис в основном выращивают для изготовления наркотического средства? А вот хлопок бьет все рекорды, являясь самой распространенной натуральной тканью для пошива одежды. Следующая (по массе) категория биоматериалов представлена натуральным каучуком — латексом, получаемым из бразильской гивеи *Hevea brasiliensis* (Sethuraj and Mathew, 1992). Большая часть выработки натурального каучука этими деревьями, посаженными по всем тропикам, приходится на Азию: крупнейшими экспортерами являются Таиланд, Малайзия, Вьетнам и Индонезия (IRA, 2013). Ежегодное производство не превышало 2 миллионов тонн до начала 60-х гг. XX века; десять лет спустя оно превысило 3 миллиона тонн и достигло почти 7 миллионов тонн к 2000 году и 10 миллионов тонн к 2010 (FAO, 2013). Для сравнения: каждый год производится примерно 15 миллионов тонн синтетического каучука.

Далее идут шкуры и кожи животных; их производство растет вместе со спросом на мясо: годовая выработка шкур крупного рогатого скота (коров и буйволов) превышает 6 миллионов тонн, овечьих и ягнячьих — 400 тысяч тонн, и примерно 300 тысяч тонн козлиных шкур ежегодно превращаются в кожаные изделия (FAO, 2011). Производство шерсти — важнейшего волокна животного происхождения — выросло с примерно 960 тысяч тонн в 1950 году до 2,9 миллиона тонн в 1970-м, затем колебалось, достигло пикового значения 3,3 миллиона тонн в 1990-м и упало до уровня чуть ниже 2 миллионов тонн в 2011 году (FAO, 2013). А вот выработка коконов шелкопрядов за последние 50 лет более чем удвоилась и составила около 500 тысяч тонн в 2010 году. Для полноты картины приведу недавнюю статистику по годовой выработке некоторых менее значимых биоматериалов: примерно 60 тысяч тонн пчелиного воска, 20–30 тысяч тонн лака — смолистых выделений насекомых рода *Kerria*, 70–80% которого вырабатывается в Индии (Singh, 2006), и 30–50 тысяч тонн гуммиарабика — экссудата акации сеяльской и акации сенегальской, производится преимущественно в Судане (World Bank, 2007).

Уже достаточно долгое время производство и потребление многих из этих биоматериалов снижается, а некоторые из них и вовсе стали практически ненужными; совокупный спрос на иные продукты растительного и животного происхождения, возможно, также снизится, но некоторые покупатели все равно будут ценить такие материалы за какие-то особые качества или хотя бы за «статусный» характер изделий из них, будь то свечи из пчелиного воска, а не парафина, или сари и сумочки из натурального, а не синтетического шелка. Нет никаких сомнений в том, что спрос на три самых значимых биологических материала — пиломатериалы, бумагу из древесной массы и хлопок для одежды — будет оставаться высоким. Единственной крупной отраслью, где в 50-х гг. и после наблюдались значительные изменения в связи с появлением заменителей, является производство мебели.

В высококачественной мебели отмечается тенденция к применению ДСП или фанеры со шпоном — и то, и другое можно производить из многих видов дерева; недорогая мебель все чаще изготавливается с использованием ламинированных материалов (чаще всего ДСП-панелей, лакированных меламином), а небольшая домашняя утварь, некогда преимущественно деревянная, сейчас делается из пла-

стика и металлов. Доска остается излюбленным материалом лишь на нишевых рынках и в производстве изделий для конкретного применения. Аналогичным образом применение цистерн из нержавеющей стали и алюминиевых кег снизило спрос на древесину в таких отраслях, как виноделие, пивоварение, производство иных алкогольных напитков, однако в отдельных случаях дерево в целом до сих пор остается значимым и незаменимым (или, по меньшей мере, предпочтительным) материалом: так, сохраняется спрос на дубовые бочки и емкости под многие пищевые продукты; из дерева продолжают и будут продолжать делать музыкальные инструменты и некоторые виды спортивного инвентаря.

До сих пор выращивают и вырубают десятки разновидностей деревьев (преимущественно для получения пиломатериалов и целлюлозы), однако ввиду того, что в современном крупномасштабном производстве предпочтение отдается единообразию и стандартизации исходных материалов, все большую долю на рынке древесины занимает относительно небольшое число видов хвойных («мягкая древесина», прежде всего сосна, ель и пихта) и лиственных («твердая древесина», преимущественно ясень, эвкалипт и тополь) деревьев, при этом все большая доля приходится на недавно посаженные и пересаженные монокультуры. Так, в Европе уже растет третье или даже четвертое поколение монокультурных пихт и елей. В некоторых из таких «контролируемых» лесопосадок отмечается значительный прирост продуктивности (Каурри и соавт., 2010).

В лесохозяйственной статистике промышленный круглый лес рассматривается как составная категория, в которую входят пиловочник, фанкряж, а также древесина, предназначенная для производства бумаги. Если в западных странах статистика по лесозаготовительным работам отличается высокой достоверностью, то во многих странах Южной Америки, Африки и Азии, где незаконная вырубка является повсеместной, говорить о точности статистических данных не приходится. По данным ПСО объем заготовленного круглого леса составил 1,7 миллиарда м³ в 1950 году, 2,88 миллиарда м³ в 1975, 3,43 миллиарда м³ в 2000-м и практически столько же — 3,40 миллиарда м³ — в 2010-м (FAO, 2013). В объеме за 2010 год 55% составляет топливная древесина, 45% — промышленный круглый лес, объем заготовки которого достиг немногим более 1,5 миллиарда м³. Учитывая, что на выходе из одного килограмма сырого круглого леса получается 0,42 кг сухого веса, всего в 2010 году было заготовлено около 650 миллионов тонн материала.

Фактическая ежегодная вырубка древесной фитомассы значительно превышает эти цифры; «официальная» статистика занижена потому, что не учитывает не только нелегальную вырубку, но и фитомассу, которая не идет на производство коммерческой продукции. Даже при скромной оценке нелегальной вырубки общая масса заготавливаемого промышленного круглого леса увеличивается на 15% до 750 миллионов тонн (за 2010 г.). Куда более значительную корректировку следует внести для учета срубленной фитомассы, не идущей в промышленное производство: маленьких деревьев (с диаметром на высоте груди менее 12 см) и нетоварной древесины (деревья непригодной формы, пни, кора, ветки, а также узкие верхушки).

Бердси (Birdsey, 1996) и Пеннер и соавт. (Penner и соавт., 1997) опубликовали формулы для расчета общего объема срубленной надземной фитомассы на основе стволового объема товарной древесины. Для США рассчитанный ими коэффициент

составил примерно 2,1, при этом видоспецифичные значения варьируются от 1,7 (юго-восточная ладанная сосна) до более 2,5 (ель и пихта); в Канаде среднее значение составило 2,56 (Wood and Layzell, 2003). Поэтому даже при самых сдержанных оценках стоит удвоить общую массу заготовленного дерева до 1,5 миллиарда тонн, а также добавить как минимум 20%, чтобы учесть фитомассу корней, остающихся после заготовительных работ. В итоге получается 2 миллиарда тонн, из которых половину можно отнести к скрытым материальным потокам. Не слишком ли чрезмерны такие цифры? Смогут ли люди продолжать вырубку лесов такими темпами, не опасаясь обезлесения? Глобальный ответ на этот вопрос дать непросто ввиду сомнительности общемировой лесохозяйственной статистики, но можно провести соответствующую оценку для отдельно взятых богатых стран, где имеются хорошие базы данных по лесам.

Так, в соответствии с данными Реестра лесных территорий США, в 2000 году объем древостоя составлял 23,65 миллиарда м³, ежегодный прирост — 670 миллионов м³ (USDA, 2001). Вырубается при этом 490 миллионов м³ (USDA, 2003). Следовательно, ежегодно рубится всего 2% имеющихся запасов и менее 75% прироста товарной древесины. Если учитывать общий объем фитомассы во всех лесах, включая заповедные (Жоусе и соавт., 1995), доля вырубемого леса окажется еще ниже — 1 и 6% соответственно. Также очевидно, что современный менеджмент позволяет эксплуатировать леса, не разрушая их. Возвращаясь к общемировой заготовке круглого леса: из тех 1,5 миллиарда м³ дерева, вырубленного в 2010 году, 390 миллионов м³ стали в итоге пиломатериалами, 185 миллионов тонн пошли на древесную массу для бумаги. Я расскажу о каждом из этих потоков. Сначала опишу основные методы обработки, используемые для получения товарной древесины (пиломатериалов), а также иного стройматериала из дерева, прежде всего ДСП и фанеры. Затем я расскажу о разнообразных бумажных продуктах и текущих тенденциях их использования.

Как будет показано в следующей главе, появление и использование бетона, металлов и пластмасс значительно снизили древоемкость современного общества (то есть массу дерева на единицу ВВП); и тем не менее дерево остается важным строительным материалом, а ежегодный объем его заготовки превышает производство всех металлов и пластмасс вместе взятых. Спрос на древесину увеличился после Второй мировой войны из-за всплеска деревянного строительства, использования дерева для опалубки бетонных сооружений, необходимости упаковывать грузы, предназначенные для доставки на большие расстояния или для межконтинентальной торговли, а также из-за распространения печатных информационных изданий на бумаге. Аналогичным образом постепенный переход на ископаемые виды топлива и гидроэлектроэнергию в развивающихся странах Южной Америки, Африки и Азии снизил подушный спрос на древесину и древесный уголь, однако быстрый рост населения этих континентов фактически увеличил совокупный спрос на топливную древесину (см. пред. главу).

В производстве строительных материалов используются сотни видов деревьев. От свойств таких материалов (плотности, влагостойкости, долговечности, однородности и т. д.), а также от их стоимости зависит область применения, будь то конструкционная или облицовочная древесина, дерево для внутренних панелей и

пола, кровельная древесина, оконные рамы, двери, шпон, фанера или детали машин. Химические и механические свойства дерева, взаимодействие с влагой, сушка, долговечность, огнеупорность, а также методы увеличения прочности и срока службы материала тщательно изучались на протяжении не одного поколения. Пожалуй, лучшим однотомным справочником является юбилейное столетнее издание *Wood Handbook* (Forest Products Laboratory, 2010).

Получение пиломатериалов из бревен не может быть безотходным, хотя благодаря современным технологиям компьютерной автоматизации резка стала гораздо более точной, что позволило минимизировать отходы. В недавнем исследовании фрезеровальных операций на европейских лесопилках были получены следующие репрезентативные средние значения с разбивкой по хвойным и лиственным породам (UNECE, 2010). В общем и целом 54% объема бревен становятся пиломатериалами (колеблется от 45 до 62%), 29% — щепой и обалолом, 11% — опилками и еще 1% — стружкой; потери при усадке составляют в среднем 4%. Все это не пропадает зря, а идет на изготовление ДСП и древесной массы, мульчирование, получение целлюлозы или выработку пара и электричества. Если посчитать, что объем пиломатериалов составляет 0,55 объема бревен, то на производство 390 миллионов м³ пиломатериалов в 2010 году ушло примерно 710 миллионов м³ круглого леса. Долговечность древесины является основным фактором, учитываемым при использовании этого материала; без дополнительной обработки материала она зависит от условий эксплуатации и может составлять почти тысячу лет (вяз, дуб, бук, сосна, ель — древесина этих видов может храниться и служить 800 лет, а порой и дольше при должной сухости); а вот дерево, постоянно контактирующее с землей, не выдерживает и пяти лет (Berge, 2009). Обработанная древесина может прослужить значительно дольше. Креозот, получаемый из каменноугольной смолы, остается основным средством для обработки железнодорожных шпал и столбов ЛЭП, а вот в обработке строительных пиломатериалов на смену хромсодержащим растворам арсената меди пришли другие медные соединения и новые неметаллические составы (Richardson, 1978). Биоповреждения — ущерб, причиняемый древесине грибами и насекомыми — являются повсеместной проблемой, однако наиболее быстро дерево разрушается под воздействием этих двух факторов в тропиках. В основном разрушение деревянных строений в теплых климатических зонах происходит по вине термитов, и лучшим — и наиболее безопасным — средством защиты от них являются бораты.

Если же говорить о жилищном строительстве в развитых странах XX века, то видно четкое различие между небольшим числом стран, где дерево осталось основным строительным материалом (США, Канада и Япония), и большинством государств, где к традиционным кирпичным строениям добавляется все больше зданий из бетона и конструкционной стали (прежде всего ЕС и Китай). Благодаря дешевым пиломатериалам, которых в Северной Америке много, коттеджи на одну семью нередко строятся полностью из дерева, которое к тому же идет на сваи, фанеру для наружной отделки стен, деревянные фермы под крышу, деревянные балки, черновой пол (фанеры), а также на сам пол, лестницы, двери, дверные коробки и оконные рамы. На строительство нового североамериканского дома площадью 200 м² уходит примерно 14 тонн древесины (обычно желтой сосны) и еще 14 тонн панельных изделий (как правило, речь идет о фанере), то есть всего 28 тонн. Фанеру и компози-

ционную древесину стали использовать чаще и больше, что снизило относительный уровень спроса на стандартные мерные пиломатериалы, но в совокупных цифрах эту тенденцию уравнивает постепенно увеличивающаяся площадь среднего американского коттеджа, которая удвоилась со 110 м² в начале 50-х гг. до 220 м² к 2005 году.

Композиционные древесные материалы — МДФ, ДСП, фанеру (многослойный шпон, коммерческое применение которого началось в 50-х гг. XIX века), ламинированный шпон, клееную древесину, готовые фермы, пиломатериалы с пальцевым сочленением — стали много где использовать вместо традиционных пиломатериалов. Клееная древесина представляет особый интерес (Glulam, 2013). Она изготавливается из тонких и гибких дощечек — ламелей, легко обрабатывается и может не только служить материалом для столбов, ферм и стропил, но также, будучи специальным образом формованной, использоваться в арочных и сводчатых конструкциях с большим пролетом и изогнутыми порталами.

Клееная древесина отличается легкостью (ее плотность составляет всего 0,55–0,7 г/см³; для сравнения, плотность стали равняется 7,8 г/см³), поэтому, даже несмотря на то, что в конструкциях из клееной древесины в качестве крепежей используются стальные болты, дюбели и пластины, общий вес таких конструкций гораздо ниже, чем у аналогичных им стальных. При этом материал достаточно прочен (прочность на единицу массы в два раза выше, чем у пиломатериалов — по этому показателю клееная древесина сравнима с конструкционной сталью) и может использоваться в крупных несущих конструкциях, включая большие мосты. Клееная древесина достаточно устойчива к агрессивному воздействию химикатов, плохо горит, обладает хорошими изоляционными свойствами, может использоваться как для внешней, так и для внутренней изоляции, при этом с защитой от холода проблем не возникнет.

В промышленном строительстве также расходуется много древесины, в основном из-за необходимости в опалубке для бетонных сооружений. Производители фанеры изготавливают рамочные панели с влагостойким клеем заданной прочности и жесткости. Расход древесины зависит от толщины и формы заливаемого бетона; чтобы сформировать стандартную 20-сантиметровую стенку фундамента американского дома потребуется 10 м² фанеры (весит примерно 20 кг/м²) на каждый кубометр залитого бетона. Однако опалубку можно использовать повторно, особенно если она стандартных размеров; грамотно изготовленная опалубка с гладкими и стойкими к истиранию поверхностями может быть использована до 200 раз (APA, 2013). И хотя в западных странах уже давно стало нормой использование стандартизированных труб в качестве вертикальной составляющей строительных лесов, горизонтальная часть лесов все еще состоит из деревянных досок, а бамбуковые леса (зачастую на зданиях выше 30 этажей и при стандартной длине 6 метров) с деревянной доской остаются повсеместным явлением в Восточной Азии.

Древесина в лучшем случае сохраняет свои позиции, а кое-где даже теряет их, а вот бумага, напротив, является одним из самых значимых материалов современного мира. К концу 30-х гг. XX века сульфатный процесс Даля, позволявший получать более прочную (крафт-) бумагу, стал основным химическим методом масштабного бумажного производства. Основными преимуществами метода были обработка дре-

весной массы недорогим сульфатом натрия, а также сравнительно низкие затраты¹³ энергии; основным недостатком — выбросы вредного сероводорода. К 2000 году по данной технологии вырабатывалось примерно две трети всей целлюлозы в мире; практически вся оставшаяся доля приходилась на полухимические и механические процессы, а сульфитным методом производилось всего 2%. Расход сырья зависит от метода обработки, а также от разновидности бумаги (Вајрај, 2010).

На получение 1 тонны целлюлозной массы механическим способом уходит 2,5 м³ круглого леса, при полухимическом процессе тратится уже почти 2,7 м³, а kraft-процесс и вовсе расходует практически 4,5 м³; общемировое среднее значение составляет приблизительно 3,8 м³/т (UNECE, 2010). В 2010 году было произведено примерно 185 миллионов тонн целлюлозной массы, на что было потрачено чуть больше 700 миллионов м³ круглого леса — немногим меньше, чем ушло на пиломатериалы. Аналогичные коэффициенты (в кубометрах круглого леса на тонну продукта) составляют: 2,9 для газетной бумаги, 3,25 для упаковочной, 4,35 для бумаги для гигиенических и бытовых целей; в среднем для всех бумажно-картонных продуктов получаем значение 3,6 м³/т.

Всемирный рост бумагоделательного производства во второй половине XX века был обусловлен сочетанием нескольких тенденций:

- публикация все большего количества книг, газет и журналов;
- популяризация как профессиональной, так и любительской фотографии (распространению последней способствовали недорогие карманные фотокамеры), которая привела к скачку спроса на фотобумагу;
- до всеобщей компьютеризации различным бюро требовалось гораздо больше бумаги для машинописных работ;
- спрос также возник в результате появления копировальных аппаратов, сначала представленных фирмой Хегох в США в 1959 году, но вскоре ставших обязательным атрибутом любого офиса;
- распространение офисных принтеров (сначала это были построчные принтеры, работавшие на перфорированной бумаге и обслуживавшие большие компьютеры, в конце 70-х появились небольшие аппараты, подключаемые к настольным компьютерам и использовавшие офисную бумагу стандартного формата);
- появление в 80-х компактных принтеров для подключения к ПК; а также
- возросший спрос на упаковочную бумагу как в промышленности, так и в розничной торговле.

По иронии судьбы скачок производства и расхода бумаги совпал с распространением «безбумажного офиса» новой, электронной эры.

В США спрос на бумагу также вырос из-за бума жилищного строительства после 1950 года. К середине 50-х гг. гипсокартон заменил традиционный гипс в половине всех вновь построенных домов; десятилетие спустя этот материал практически полностью захватил рынок внутренних перегородок и потолков в жилищном строительстве (Dushack, 2013). Американский гипсокартон — это тонкий (стандартная толщина внутренних перегородок составляет полдюйма, или 1,27 см) слой гипса

¹³ В оригинальном документе production, что, вероятно, является опечаткой. — *Прим. пер.*

между двумя тяжелыми картонными панелями; этот минерал когда-то приходилось добывать в природе, а сейчас почти половину всего гипса получают как побочный продукт десульфуризации отходящих газов на угольных электростанциях (Gypsum Association, 2013). На производство квадратного метра гипсокартона уходит примерно 400 г бумаги (с обеих сторон); в США в 2010 году было произведено почти 1,6 миллиарда м² гипсокартона, на что, очевидно, ушло примерно 640 тысяч тонн бумаги, причем почти вся эта бумага была переработанной (Gypsum Association, 2011). На смену прокладочной бумаге пришел тайвек, а вот рубероид все еще необходим для водоизоляции крыш, а также в качестве подложки под асфальт или деревянные гонты.

К началу нового столетия во многих богатых странах оказалось так много бумаги, что спрос местных производителей на древесную массу стал снижаться за счет наращивания перерабатывающих производств. В США выработка древесной массы достигла пиковых значений в середине 90-х, превысив 60 миллионов тонн в год, а затем постоянно снижалась. Эта тенденция также отмечается в производстве бумаги и картона, падение которого превысило 10% с 2000 года и ускорило после 2007 года в связи с кризисом. Данные изменения сопровождалось массовыми сокращениями штата целлюлозно-бумажных комбинатов (в 1999 году на таких предприятиях работало 200 тысяч человек, а десять лет спустя — менее 120 тысяч) и значительно возросшей производительностью каждого отдельного работника (с 450 тонн на человеко-год в 2000 году до почти 700 тонн в 2010-м). Аналогичным образом, если посмотреть на разбитые по категориям значения спроса на бумагу в Японии, то станет видно, что расход бумаги как информационного носителя достиг максимума в конце 90-х, после чего (к настоящему времени) снизился почти на 25%, спрос на копировальную бумагу стал снижаться после 2008 года, на гигиеническую не меняется с 2005 года (Japan Paper Association, 2013).

Если говорить о факторах, способствовавших спаду потребления бумаги, наиболее резкое падение было связано с практически прекратившим свое существование рынком фотобумаги, а также с переходом СМИ с печатных на электронные носители информации и изображений. Сначала на отрасли сказалось появление и распространение цветных диапозитивов, но практически невостребованной бумага стала тогда, когда на смену печатной фотографии пришла электронная съемка, сначала реализуемая с помощью цифровых фотокамер с дальнейшим просмотром изображений на экране, затем — с помощью такого массового потребительского устройства, как телефон с камерой. В наше время на облачных серверах хранятся миллиарды снимков, сделанных при помощи смартфона. Еще важнее закрытия и сокращения, наблюдающиеся в издательском секторе. Многие газеты (несколько сотен в США с 2008 года) и журналы прекратили выпускаться, среди них такие известные периодические издания, как *Gourmet* (1941–2009) и *Home* (1951–2008); другие перестали выходить в печатном виде и теперь издаются только в электронном: самым известным примером является, пожалуй, *Newsweek* — второй в списке старейших еженедельников Америки, печатавшийся с 1933 по 2012 год. При всем при этом общемировое потребление бумаги продолжает расти, что обусловлено значительным увеличением спроса в густонаселенных странах Азии, прежде всего в Китае. Мировое производство бумаги и картона увеличилось со 127 миллионов тонн в 1975 году почти до

325 миллионов тонн в 2000-м, а в 2011 году превысило 400 миллионов тонн (FAO, 2013). Китай в 2011 году произвел 103,1 миллиона тонн бумаги, что почти в три раза выше уровня 2000 года и составляет более 25% общемировых поставок (в 2000 году доля Китая равнялась 11%, в 1975 — только 3%). Если учесть ограниченные лесные ресурсы Китая, то неудивительно, что именно эта страна является крупнейшим импортером макулатуры в мире: в 2010 году Китай купил 25 миллионов тонн макулатуры, в 2011 — 28 миллионов тонн. При этом основным поставщиком стали США (совокупный экспорт рекуперированной бумаги из США составил 10 миллионов тонн в 2000 году и 21 миллион тонн в 2011, то есть более чем удвоился).

Согласно данным ПСО (FAO, 2013), 64% от всей совокупной бумажной массы, произведенной в 2010 году, составили упаковочная бумага и картон, 11% — мелованная бумага для письма и печати, 8% — газетная бумага, около 7% — бумага для бытовых и гигиенических нужд. В докладе Международного Бюро по переработке отходов (Bureau of International Recycling) дано другое распределение использования бумаги в 2010 году. Согласно этому документу, 52% составили упаковочная бумага и картон, 36% — бумага для графических и печатных работ, 5% — калька, остальное — специализированные и прочие виды бумаги (Magnaghi, 2011). В течение последних двух поколений значительно сократилась разница между подушным расходом бумаги в разных странах (по расчетам на основе производственно-реализационной статистики ПСО), при этом общемировое среднее значение выросло с 25 кг/год на человека в 1960 году до почти 60 кг в 2010-м (FAO, 2013). За тот же период годовое подушное потребление в США выросло с 195 до 240 кг, а в Китае — с примерно 3 до 70 кг. Таким образом, до сих пор наблюдаются существенные количественные различия, что особенно касается бумаги для бытовых и гигиенических нужд, подушный расход которой составляет почти 20 кг в США, 11 кг во Франции, менее 5 кг в Китае и менее 50 г (да-да, 50 г) в Индии.

3.2 Строительные материалы

Прежде чем приступить к обзору методов производства и применения основных строительных материалов XXI века, хочу отметить, что сотни миллионов людей — Берге (Berge, 2009) заявляет, что речь идет о более чем 30% всего человечества — продолжают жить в строениях из материала (добытой на месте глины), не прошедшего какой-либо тщательной обработки; такое жилище можно построить без использования современных энергоресурсов. Хотя для строительства землянки достаточно нескольких примитивных инструментов, сам процесс очень трудоемок. Стены строятся путем утрамбовки вырытой вручную земли между элементами опалубки или путем прессования землеблоков и их сушки на солнце перед укладыванием в стены. Такие сырьевые кирпичи изготавливаются посредством добавления волокнистых растительных материалов. Обычно используют солому, но нередко в ход идут стебли диких растений или даже навоз скота.

Здания из сырьевого кирпича до сих пор повсеместно встречаются в засушливых регионах; хотя некоторые из массивных строений такого рода оказались на удивление прочными, чаще всего землянки не отличаются структурной прочностью, и

их разрушение стало одной из основных причин невероятно высокой смертности в сейсмоопасных районах. Для получения действительно прочных материалов на основе земли и почвы требуется обжиг в печах при температурах от менее 500°C (позволяет получать кирпичи низкого качества) до 1100°C для изготовления керамической плитки, 1300°C — для глазурованного кирпича, 1400°C — для стекла, а для термообработки портландцемента и вовсе требуется 1400–1450°C (Berge, 2009). Влажная глина, из которой делают каменную плитку и терракоту, также идет на производство кирпичей; при обжиге в печах происходит ее спекание.

Сухая прессованная глина, зачастую с добавлением каолина и измельченного до порошкообразного состояния стекла, применяется в изготовлении глазурованной керамической плитки, а обжиг позволяет получать более гладкую и тонкую плитку. Основная проблема с глазурованием заключается в том, что многие из используемых красителей — оксиды кадмия, меди, хрома, никеля, ванадия — токсичны и требуют осторожности при обращении и утилизации.

Классификация заполнителей — сыпучих строительных материалов, составляющих большую часть массы ежегодно добываемых минералов — основывается не на химическом составе, а на одной из базовых физических характеристик — крупности (Reeves и соавт., 2006). Глина содержит частицы менее 0,002 мм в диаметре, возникающие в результате механического разрушения камней; в составе преобладают два наиболее распространенных в земной коре оксида — оксид кремния SiO_2 и оксид алюминия Al_2O_3 . Путем обжига из глины получают прочные и долговечные материалы: от строительного кирпича (первоначальная смесь на 20–30% состоит из глины и 50–60% из песка) до плитки с высокой термостойкостью. Ил — как из огромных эоловых отложений в Лёссовом плато Китая, так и речной, остающийся после наводнений, — отличается более крупной фракцией, чем глина, диаметр его частиц варьируется от 0,004 до 0,06 мм.

К строительным заполнителям относятся песок, гравий и щебень. Песчинки имеют диаметр до 2 мм, диаметр частиц гравия, обладающих неправильной формой, варьируется от 2 до 6 см, а более крупные уже относят к щебню. Песок и гравий являются рыхлым продуктом механического разрушения камней, состоящих преимущественно из кремнистых и известняковых минералов. Они широко распространены в аллювиальных отложениях и осадочных слоях, поэтому их обычно добывают из ближайших месторождений в том же регионе, где собираются использовать; однако в отдельных случаях эти материалы транспортируются на большие расстояния и даже идут на экспорт. В наши дни их добыча производится либо из карьеров, либо выемкой из рек, озер или береговых зон. Таким образом получают сырой и влажный материал, который может использоваться в качестве насыпного грунта или под фундамент, однако большая часть выкопанного песка и гравия обрабатывается под определенные требования.

Последующая промывка, просев, дробление и обезвоживание позволяют удалить всю органику и глину с получением определенной дисперсности и низкой влажности. Согласно наиболее точным и достоверным оценкам, в США 41% строительного песка и гравия используется в качестве заполнителя для бетона, четверть от общего количества уходит на дорожное строительство, 13% — на строительную насыпь, 12% — на асфальтобетон и аналогичные смеси (USGS, 2012). Оставшуюся часть ис-

пользуют в фильтрах, в качестве посыпки для заснеженных или обледенелых дорог (в некоторых регионах используют соль), балласта железных дорог и гольф-кортов, а также для поддержания подвергшихся эрозии пляжей. Самым лучшим примером последнего является, пожалуй, пляж Вайкики, Гавайи, куда в ходе 20-х и 30-х гг. завозили песок с Манхэттэн-Бич, Калифорния; теперь песок для этого пляжа добывают в местных прибрежных отложениях. Производство песка и гравия четко коррелирует с капиталовложениями в строительной отрасли и резко снижается в периоды кризиса. Так, в США в 2007 году было добыто 1,25 миллиарда тонн песка и гравия, а в 2010 — всего 760 миллионов тонн; то есть всего за три года объемы добычи упали на 40% (USGS, 2013).

Используемый в строительстве щебень (в основном применяется в строительстве и обслуживании дорог, а также производстве цемента) в основном получают из осадочных пород (прежде всего известняка и доломита); самой распространенной магматической породой является гранит. Блочный камень используется в строительстве как в природном виде, так и после отеса. Тесаный камень идет на кладку и бордюры, более тонкие камни — на мощение и облицовку; так как долговечность играет большую роль, предпочтение отдается граниту, твердым разновидностям известняка (включая различные виды мрамора) и шиферу (помимо половых настилов и облицовки из него делают кровлю). Некогда весьма трудоемкий процесс резки камня сейчас полностью механизирован и осуществляется с помощью алмазных кромок циркулярных или рамных пил, а также водных или пламенных струй. Отделка (шлифовка и полировка) производится по заданным техническим условиям.

Производство кирпича — одна из старейших отраслей в мире — бьет новые рекорды благодаря строительному буму в Китае. Так, в 2010 году в этой стране было произведено не менее 900 миллиардов кирпичей (возможно, что и триллион), при этом половина кирпичей были сплошными, четверть — полыми, а доля Китая в общемировом производстве составила 60% (Li, 2012a). По самой скромной оценке, средняя масса кирпича составляет 2,8 кг, следовательно, общая масса кирпичей, произведенных во всем мире в 2010 году, приблизилась к 4,5 миллиарда тонн, по сравнению с 3,3 миллиарда тонн цемента. С точки зрения массы основными компонентами бетона являются песок, природный гравий и щебень: на них приходится от 60 до 75% массы первоначальной смеси. Для специальных смесей требуются разные виды заполнителей. При использовании более мелкодисперсных заполнителей получают более прочный бетон, однако в такую смесь приходится добавлять больше воды; если заполнитель крупнодисперсный, то воды уходит меньше. При обычных размерных параметрах фракция заполнителя не так важна, как его прочие качества.

Вода составляет от 15 до 20% первоначальной смеси, еще 10–15% — цемент, порошковый минеральный вяжущий компонент, гидратация которого позволяет смеси затвердевать даже под водой. Используются также различные добавки: некоторые позволяют ускорить застывание или, наоборот, замедлить его, чтобы смесь можно было перевозить в бетоновозе, другие смеси обеспечивают «захват» небольших порций воздуха или оказывают обезвоживающее действие. В конечном счете, получают материал плотностью от 2,2 до 2,4 тонны на м³, с низкой прочностью на растяжение (всего 2–5 МПа), но отличной прочностью на сжатие, которую в ходе истории разработки и совершенствования материала удавалось постепенно увеличивать. В

1900 году прочность на сжатие лучших смесей равнялась примерно 25 МПа, к 70-м годам значение 40 МПа стало стандартным, а последующая разработка высокопрочных смесей для небоскребов и иных специальных строительных категорий повысила этот показатель до 150, а в некоторых случаях он достигает даже 200 (Ulm, 2012).

От страны к стране также разнится конечное использование цемента: в США порядка 75% этого материала идет на производство товарного бетона и менее 15% — на бетонные блоки и сборный бетон; в Германии те же показатели составляют 55% и 30% соответственно (Sika, 2005). Производство и расход цемента полностью зависят от строительной отрасли и потому колеблются в соответствии с периодами экономического бума и спада. Строительство дорог, плотин, фабрик и домов на порядок увеличило расход цемента в США всего за 28 лет: в 1900 году всего 3 миллиона тонн цемента, 87% которого было внутреннего производства, было смешано с заполнителями, в 1928 году — уже 30 миллионов тонн (Kelly and Matos, 2013).

Из-за Великой депрессии этот показатель был немногим меньше 11 миллионов тонн в 1933 году, но затем вырос до 31 миллиона тонн к 1942, на пике строительства заводов в военное время. После войны наблюдался кратковременный спад, после чего внутреннее производство и импорт нарастали практически непрерывно до 1973 года, когда расход цемента составил почти 82 миллиона тонн. Одним из ключевых факторов роста спроса стало строительство системы межштатных магистралей США (USGS, 2006). Покрытием примерно 60% этих многополосных дорог является бетон стандартной толщиной 28 см, то есть на 1 км четырехполосной магистрали при ширине полосы 3,7 м уходит 4150 м³. Таким образом, каждый километр дорог содержит примерно 10 тысяч тонн бетона, а для покрытия 73 тысяч км проезжей части потребовалось 730 миллионов тонн (еще какое-то количество ушло на обочины, разделительные полосы, подъезды и путепроводы).

Побить рекорды 1973 года удалось только в 1986 году; очередного максимума рассматриваемый показатель достиг в 2005 году, когда было израсходовано 128,25 миллиона тонн цемента, однако пять лет спустя совокупный расход снизился на 45% и составил всего 71,2 миллиона тонн — уровень 1968 года. До середины 80-х гг. доля импортного цемента в общей структуре американских расходов цемента составляла всего 10%, а в 2010-м — 22%. С 1986 года лидером в производстве цемента остается Китай: в течение 80-х он увеличил этот показатель на 20%, в течение 90-х — более чем в 2 раза, в течение нулевых — более чем в три раза; в 2010 году Китай произвел почти 1,88 миллиарда тонн цемента — примерно 55% от общемирового уровня (USGS, 2013). 240 миллионов тонн было произведено в Индии, по этому показателю она более чем в три раза опередила США; Бразилия заняла четвертое место.

Когда-то производство цемента отличалось значительными неконтролируемыми выбросами твердых частиц (до 1 кг на тонну продукта), однако современные тканевые фильтры захватывают 99,6% таких частиц, отправляющихся затем обратно в печь. Таким образом, наиболее серьезным фактором влияния этой отрасли на окружающую среду являются выбросы углекислого газа. С точки зрения массы при производстве цемента на каждую единицу материала выделяется примерно одна единица газа, при этом половина всего объема газа образуется в результате разложения CaCO₃, остальной газ — в результате выработки тепла и электричества для работы ротационной печи. Если пересчитать выбросы на единицу стандартной бетонной

смеси (без шлака и летучей золы), то получится примерно $480 \text{ кг CO}_2/\text{м}^3$, или $200 \text{ кг CO}_2/\text{т}$ бетона.

Анализ доли цементопроизводства в мировой статистике по выбросам CO_2 показывает, что эта доля составляла 1% от углерода, выделившегося из ископаемых видов топлива, в 1950 году, 2% в 1975-м и почти 5% в 2010-м (CDIAC, 2013). В 2011 году объем выбросов углекислого газа, источником которых стало китайское цементопроизводство, оказался всего лишь на 12% меньше объема всех выбросов этого газа в Японии. Исследователи проявляли большой интерес к повышению энергоэффективности и сокращению выбросов углекислого газа в этой отрасли (USEPA, 2007; Worrell and Galitsky, 2008; Madloul и соавт., 2011; Hasanbeigi и соавт., 2012). К возможным вариантам достижения и того, и другого относят использование цемента и строительных материалов на основе оксида магния, геополимерный цемент, а также цемент со шлаком и летучей золой. Последняя кажется особенно привлекательной: она не только снижает энергозатраты на производство клинкера, но также помогает предотвращать возникновение свалок золы, снизить расход новых сырьевых минералов. Кроме того, именно зола эффективнее всего способствует уменьшению выбросов углекислого газа.

В 2010 году китайскими производителями цемента был израсходован весь доступный шлак (223 миллиона тонн), а также 66,3% из 395 миллионов тонн имевшейся летучей золы (Lei, 2011). Компания Ceratech, базирующаяся в Вирджинии, США, производит смеси, состоящие на 95% из летучей золы и на 5% из жидких ингредиентов (в стандартных смесях доля золы составляет всего 15%). Такой бетон получается более прочным, а для его армирования требуется меньше стали (в массовом выражении) (Amato, 2013). Бетон, оставшийся от снесенных зданий или разрушившихся дорог и взлетно-посадочных полос, дробят и просеивают, чтобы извлечь заполнители, которые затем могут использоваться в качестве сыпучих наполнителей (более дешевый вариант) или добавляться в новый бетон (Wilburn and Goonan, 2013). Энергию можно также сэкономить путем оптимизации транспортировки и заливки бетона, в том числе посредством совершенствования технологий пневматической доставки, бетонирования на холоде, отверждения и повторного использования излишков (Kermeli и соавт., 2011).

Доступность бетона и его повсеместность в современном мире не проходят без последствий в долгосрочной перспективе, даже если не учитывать связанные с этим материалом выбросы углекислого газа. С 1945 по 2010 год во всем мире было произведено примерно 60 миллиардов тонн цемента. Таким образом, за все это время на строительство ушло 500 миллиардов тонн бетона, 60% из которых было залито за два десятилетия с 1990 по 2010 г., 35% — с 2000 по 2010 г. Бетон, в особенности железобетон, является самым важным искусственным материалом с точки зрения как годового производства, так и совокупной заложенной массы. В то время как этот материал обеспечивает человека жильем, транспортной, энергетической и промышленной инфраструктурой, его накопление несет в себе значительные риски и огромное бремя для будущих поколений.

Проблемы возникают в связи с уязвимостью материала к преждевременному износу, который приводит к ухудшению внешнего вида, потере прочности, а также разного рода трагичным последствиям, для предотвращения которых приходится

периодически тратить значительные средства на ремонт, а спустя некоторое время — проводить дорогостоящие работы по сносу. Бетон ни снаружи, ни под землей не отличается долговечностью и разрушается по целому ряду причин (AWWS, 2004; Cwalina, 2008; Stuart, 2012). Открытые поверхности подвергаются воздействию влаги и низких температур в холодном климате, роста бактерий и водорослей в теплой и влажной местности (биообрастание можно определить по чернеющим поверхностям), а также отложения кислот в загрязненных городских районах (то есть почти везде) и вибраций. Подземные бетонные сооружения (водопроводные и канализационные трубы, резервуары, ракетные шахты) подвергаются постепенным или быстрым перегрузкам, из-за которых возникают трещины; кроме того, бетон в таких условиях вступает в реакцию с карбонатами, хлоридами и сульфатами, просачивающимися сверху. Некачественный бетон быстро изнашивается, покрывается трещинами и пятнами из-за выцветания за считанные месяцы.

Чередование замерзания и таяния повреждает как горизонтальные поверхности (дороги и парковки), на которых собирается застойная вода, так и вертикальные, накапливающие влагу в порах и трещинах. Хотя высокая щелочность бетона (рН около 12,5) замедляет коррозию арматурной стали, когда бетонное покрытие разрушается, то есть внешние слои покрываются трещинами или подвергаются дефолиации, начинается обширный и постоянно ускоряющийся процесс ржавления арматуры. К факторам, вызывающим разрушение бетонных поверхностей, также относятся воздействие хлоридов (которому подвергаются морские подводные сооружения, покрытые противобледенительными реагентами дороги, а также бетонные конструкции в береговых зонах, где содержание хлорида натрия в воздухе гораздо выше, чем в отдаленных от моря районах) и воздействие кислотных отложений (воздействие сульфатов в загрязненных регионах). Кроме того, в некоторых видах бетона происходят щелочно-кремниевые и щелочно-карбонатные реакции (между бетоном и заполнителем), также приводящие к появлению трещин. Во влажной местности, особенно в теплом климате, нередко наблюдается потемнение бетона из-за роста водорослей в порах. С учетом беспрецедентных масштабов бетонного строительства, наблюдавшихся в 90-х гг. и позднее, человечество обречено столкнуться со значительными трудностями, вызванными разрушением бетона, после 2030 года.

Особенно острыми будут проблемы в Китае — стране, опережающей весь остальной мир с точки зрения темпов бетонного строительства. Сочетание некачественного бетона, агрессивной природной среды, высокой концентрации промышленных загрязнителей, а также чрезмерно интенсивной эксплуатации бетонных сооружений ведет к преждевременному повреждению десятков миллиардов тонн этого материала, залитого за последние годы при строительстве зданий, дорог, мостов, плотин, портов и других инфраструктурных объектов. Так как не проводится надлежащих работ по обслуживанию и ремонту бетонных строений, в будущем на замену бетона придется потратить триллионы долларов. К этому стоит прибавить стоимость утилизации старого бетона: некоторые сооружения возможно переработать, однако процесс отделения арматуры от бетона достаточно затратен.

В последнем отчете по качеству американской инфраструктуры состояние всех инфраструктурных объектов, где основным материалом выступает бетон, было оценено как плохое или очень плохое. Мосты получили относительно высокую оценку

C+, плотины, школы, дороги, авиационные объекты, инфраструктура общественного транспорта и водоочистные сооружения были оценены на D, дамбы и внутренние судоходные пути — на D- (где C соответствует оценке «3» по российской пятибалльной шкале, D соответствует оценке «2»). — *Прим. пер.*) Таким образом, средняя оценка составила D+, и к 2020 году придется вложить как минимум 3,6 триллиона долларов, чтобы предотвратить дальнейшее разрушение (ASCE, 2013). Если же рассматривать ситуацию в Китае, опираясь на те же исходные посылки, то китайцам придется восстанавливать или заменять почти 100 миллиардов тонн бетона, залитого в нулевых, что обойдется в десятки триллионов долларов.

Наконец, приведу еще один интересный и необычный анализ бетона с точки зрения площади и объема. Элвидж и соавт. (Elvidge и соавт., 2007), основываясь на спутниковых изображениях, где видно ночное освещение населенных пунктов, и данных о численности населения, произвели некоторые расчеты и пришли к выводу, что общемировая площадь непроницаемых поверхностей (строений и мостовых) составляет примерно 580 тысяч км². Это чуть меньше 0,5% всей площади, не покрытой льдами, и равняется площади Кении. Если говорить о подушном расчете, то наибольшие показатели отмечены у богатых стран в северных широтах (350 м² в Канаде, 300 м² в США, 220 м² в Швеции), в то время как в странах с низким уровнем дохода это значение не достигает 100, порой даже 50 м². Большой частью непроницаемые поверхности являются бетонными, хоть и не все; и есть веские причины бетонировать все большую и большую площадь. Так, если заменить земляные полы на бетонные в сотнях миллионов домов беднейших жителей Земли, то заболеваемость паразитарными болезнями снизится почти на 80%. Мощеное улиц повышает ценность и арендную стоимость земли, посещаемость школ, стимулирует экономическую деятельность в целом, а также обеспечивает более доступное кредитование (Kenney, 2012). Таким образом, аргументация в пользу большего бетонирования вполне убедительна, как и доводы, предложенные Дж.Р. Андервудом в начале 70-х, согласно которым огромную массу бетона, кирпича, плитки и стекла следует выделить в новую категорию так называемых «антропных пород», которая дополнит стандартное деление на магматические, осадочные и метаморфические материалы (Cathcart, 2011). Три десятилетия спустя он опубликовал свою идею (Underwood, 2001), а спустя еще десяток лет значительный рост производства бетона стал дополнительным аргументом в поддержку его доводов.

В то же время необходимо следить за массой «антропных пород». В 2010 году человечеством было использовано почти 40 миллиардов тонн таких пород (из них 33 миллиарда тонн бетона и 4,5 миллиарда тонн кирпича), что соответствует как минимум 17 км³. Для сравнения, объем одной из самых известных в мире гор — Фудзи, Япония — равен примерно 400 км³ с аппроксимацией по конусу радиусом около 13 км, возвышающимся примерно на 2800 метров над окружающей гору сельской местностью (высота самой горы 3776 м, озеро Яманка располагается на высоте 980 м над уровнем моря). Примерно каждые два десятилетия объем антропной породы в мире увеличивается приблизительно на одну гору Фудзи (если считать по массе, то речь будет идти уже о трех десятилетиях, так как базальт, из которого состоит вулкан, имеет плотность около 3 г/см³). Достижение, с одной стороны, впечатляющее, с другой — весьма скромное, ведь объем самого массивного в мире вулкана — Ма-

уна-Лоа, включая всю его высоту от прессованного подводного основания до пика, возвышающегося на 4170 м над уровнем моря, — составляет примерно 75 000 км³, что на два порядка больше (Кауе, 2002).

3.3 Металлы

Сочетание прогресса в индустриализации, интенсификации движения личного и общественного транспорта, механизации сельского хозяйства и появления массового потребления привело в XXI веке к повышению спроса на все металлы. В некоторых богатых странах удельный расход металла (на душу населения или на единицу ВВП) стабилизировался, но, как будет показано далее, наблюдался и абсолютный спад. Железо, преимущественно в составе стали, остается основным металлом XXI века; к 2000 году мировая добыча и производство железной руды, чугуна и стали достигли новых рекордов. Так, масса добываемой руды составила 1 миллиард тонн в год. По этому показателю железо уступило только ископаемым видам топлива и сыпучим строительным материалам; производство чугуна выросло почти до 600 миллионов тонн, производство стали — до 850 миллионов тонн в год, что примерно в 30 раз больше, чем в 1900 году. Общее значение почти в 20 раз превышает совокупную выплавку алюминия, меди, цинка, свинца и олова, а показатель на душу населения вырос с менее чем 20 до 140 кг в год. Спрос на медь рос примерно теми же темпами (увеличился в 27 раз до 13,2 миллиона тонн), производство цинка увеличилось 20-кратно — с 480 тысяч до 8,77 миллиона тонн (Kelly and Matos, 2013).

Наименьший относительный рост производства отмечается у серебра (увеличилось всего примерно в 3,4 раза с 5400 тонн в 1900 году), за ним следует свинец (4,3 раза, с 750 тысяч тонн до 3,2 миллиона тонн), а вот объемы получаемого золота выросли почти в 7 раз, однако в абсолютных цифрах составили всего лишь 2600 тонн в 2000 году, в то время как в том же году было получено 18,1 тысячи тонн серебра, миллионы тонн свинца, цинка и меди. Новым знаковым металлом столетия стал алюминий, его мировое производство увеличилось с менее 7 тысяч тонн до почти 25 миллионов тонн, практически вдвое превысив добычу меди. В изделиях с высокими эксплуатационными требованиями (то есть где требуется максимальное соотношение прочности и веса), вместо алюминия часто используют титан. Аэрокосмическая отрасль расходует примерно две трети ежегодно производимого губчатого титана (примерно 140 тысяч тонн в 2010 году), остальное идет на оружейное и химическое производство, а диоксид титана добавляют в краску, бумагу и пластмассы в качестве осветлителя (USGS, 2012).

В течение XXI века почти все аспекты черной металлургии претерпели значительные изменения. Хотя большую часть основного металла до сих пор получают в доменных печах, постоянное стремление снизить стоимость и повысить производительность сказалось на их размерах, емкостях и энергоэффективности (Kawaoka и соавт., 2006). Так, объем самых больших печей теперь превышает 5000 м³. Например, объем печи Шуган Цзин Тан в Каофейдяне (построена в 2009 г.) составляет 5500 м³, печи Швелгерн 2 в Дуйсбурге (эксплуатируется компанией ThyssenKrupp с 1993 года) — 5513 м³, а самой большой печи — японской Оита — 5775 м³ (увеличе-

на с 5245 м³ в 2004 году), при этом диаметр ее горна равен 15 м, а максимальная производительность достигает 12 тысяч тонн горячего металла в день (Hoffmann, 2012). Кроме того, большие печи расходуют меньше кокса. В США за счет постепенного снижения объемов используемого кокса, а позднее также за счет дополнительного введения пылевидного угля, нефти, природного газа удельный расход кокса в доменных печах уменьшился с 1,3 т на тонну горячего металла (по состоянию на начало XX века) до менее 0,5 тонны в конце того же столетия (de Beer и соавт., 1998).

В 1914 году почти 75% американской стали плавилось в мартеновских печах, спустя примерно полвека их доля в производстве стали достигла максимума в 88%. В то же время в Японии и Европе шел быстрый переход к конвертерным печам с подачей кислорода сверху (верхним дутьем). Такие печи работают по бессемеровскому принципу; в состав шихты входит плавленный чугуны и металлолом, обдуваемые кислородом на сверхзвуковой скорости. Первую конструкцию таких печей разработал Роберт Дуррер, Швейцария; в 1948 году он продемонстрировал практичность процесса с шихтой, наполовину состоящей из металлолома (Durrer, 1948). Однако в промышленных масштабах этой технологией впервые воспользовались не крупные сталелитейные предприятия, а две австрийские металлургические фирмы — Союз производителей железа и стали Австрии (Vereinigte Österreichische Eisenund Stahlwerke, VÖEST) в г. Линце и Alpine Montan в г. Донавице; производство по данному методу началось до конца 1952 года (Starratt, 1960; Geschichte-Club VÖEST, 1991).

В итоге технологию во всем мире стали называть Линц-Донавиц-процессом (ЛДП) и практически сразу же стали использовать в Японии, которая на тот момент восстанавливала свою разрушенную войной сталелитейную промышленность. А вот крупные американские металлурги не отличались тягой к инновациям, и первая конвертерная печь в США заработала лишь в 1964 году. К 1970 году такие печи производили уже половину всей стали в мире, 80% — в Японии. Подача кислорода сначала осуществлялась сверху, однако затем было реализовано и нижнее дутье с расходом кислорода 50–60 м³ на тонну горячего металла. Емкость конвертерных печей варьируется от 150 до 300 тонн на партию, на обезуглероживание (до менее 0,1% С) уходит всего 35–45 минут (в мартеновских печах — до 9–10 часов); производительность труда возросла тысячекратно (Berry и соавт., 1999). К концу столетия конвертерные печи производили чуть более 70% всей выпускаемой в мире стали, и эта доля с тех пор не увеличивается (составила чуть менее 70% в 2011 году), так как появились работающие на металлоломе электродуговые печи (ЭДП).

Промышленное использование ЭДП началось с выплавки алюминия еще в 80-х гг. XIX столетия, однако крупные металлургические компании приняли их на вооружение только после Второй мировой войны, когда цены на электричество снизились и накопилось достаточно металлолома. По мере их распространения была утрачена традиционная связь между железным и стальным производствами, так как новые, небольшие сталеплавильные заводы (мини-заводы) могли работать только на холодном металлоломе в качестве сырья. Как результат, количественное соотношение производимых в США стали и чугуна к концу XX века составило 2,1 (USGS, 2013), при этом сталепроизводство в стране было поделено между конвертерными печами и ЭДП. Десять лет спустя США продемонстрировали еще более эффективное

использование металлолома: указанное выше соотношение достигло 2,85, и хотя страна оставалась ведущим экспортером лома, ЭДП производили 61% всей американской стали (для сравнения, в ЕС эта доля составляла 41%, в Японии — 22%, в Китае — всего чуть более 10%).

После 1950 года изменились и принципы обработки вновь выплавленного металла. Обычно сталь лили в слитки (продолговатые куски массой 50–100 тонн), после чего их повторно нагревали, формируя полуфабрикаты, — толстые плиты, заготовки квадратного профиля, прямоугольные блюмы, из которых затем прокатом получали конечные изделия: балки, катушки, пластины, прут, рельсы, листы или проволоку. В 50-х гг. на смену этим процессам, не отличавшимся хорошей энергоэффективностью, начало приходить непрерывное литье горячего металла. Первопроходцем стал немецкий металлург Зигфрид Юнгханс, а продвижением технологии занялся американский инженер Ирвинг Росси (Morita and Emi, 2003; Tanner, 1998; Fruehan, 1998). Непрерывное литье позволяет ускорить производство (объем работ, на который раньше уходило больше дня, теперь можно было выполнить менее чем за час), снизить потери металла с примерно 10% до 1%, а затраты энергии — на 50–75% по сравнению с традиционной схемой «слиток — повторный нагрев — прокат». Одними из первых эту технологию стали внедрять японские металлурги. К концу века почти 90% стали в мире лили именно этим способом (до 97% в богатых странах). К 2010 году мировое среднее значение данного показателя достигло 95%, в Китае — 98% (WSA, 2013).

Мировая статистика в этом отношении вполне достоверна (BIR, 2012; WSA, 2013) и позволяет наметить глобальные потоки материалов в сталелитейном производстве по состоянию на 2010 год. Основной маршрут (выплавка руды с целью получения чугуна, обработка чугуна в конвертерных печах и небольшом числе оставшихся мартеновских печей) начинается с добычи 1,59 миллиарда тонн железосодержащих руд, которые засыпаются в доменные печи вместе с коксом, дополняемым подачами пылевидного угля (всего тратится 760 миллионов тонн угля); туда же идет 250 миллионов тонн сырого флюса (известняка и доломита). Так получают 1,03 миллиарда тонн чугуна. Значимую роль в этом маршруте играют крупномасштабные международные перевозки железной руды. Так, в 2009 году почти 60% добытой в мире руды (924 миллиона тонн) было продано другим странам, при этом крупнейшими экспортерами стали Австралия и Бразилия, а крупнейшим импортером — Китай, закупивший 65% всего экспортируемого в мире железа. Почти 70% руды, израсходованной в Китае, было импортировано (WSA, 2011). Руду перевозили на больших кораблях. Так, бразильская Vale приобрела 35 судов Valemax длиной 362 метра и общей грузоподъемностью 400 тысяч тонн.

Второй маршрут 2010 года выглядел следующим образом: 430 миллионов тонн лома, из которых 190 миллионов тонн было получено от предприятий той же отрасли, 340 миллионов тонн закуплено (в том числе 105 миллионов тонн импортированного лома), отправилось в ЭДП. Третий маршрут — прямое восстановление из железных руд — уже не так масштабен, как раньше; в его рамках было получено всего 65 миллионов тонн стали. Всего тремя производственными маршрутами выплавлено 1,43 миллиарда тонн нерафинированной стали. Если произвести пересчет в удельные показатели и выразить нетто-массу шихты за вычетом потерь на транс-

портировку и обработку, то на входе получим 1,4 тонны железной руды, 770 кг угля, 150 кг известняка и 120 кг переработанного металла на 1 тонну производимой не-рафинированной стали; электродуговые печи на производство 1 тонны расходуют 880 кг переработанного металла, 150 кг угля и 43 кг известняка (WSA, 2011). В XX веке также отмечаются значительные изменения в том, как люди используют сталь (WSA, 2013). В 1900 году этот сплав в основном шел на рельсы, а сейчас из него преимущественно изготавливают горячекатаные плоские листы (примерно 55% от общего числа первичных стальных изделий в 2011 году), которые затем идут на производство транспортных средств и бытовых предметов, а также арматуру (почти 15%). В то же время вырос спрос на специальную сталь, нержавеющую сталь, а также сплавы с улучшенными эксплуатационными характеристиками, требующиеся в энергетике и строительстве все более высоких зданий.

Как уже было сказано ранее, мировое производство стали увеличилось 30-кратно с 1900 по 2000 (до почти 850 миллионов тонн), превысило 1 миллиард тонн в 2004 году и достигло 1,43 миллиарда тонн в 2010 и 1,52 миллиарда тонн в 2011 году. При этом Китай производит 45% всей мировой стали, ЕС — 12%. Если же говорить о расчете на душу населения, то потребление готовой продукции составило 220 кг в среднем по миру, 500 кг — в Японии, 460 кг — в Китае, 310 кг — в ЕС, 285 кг — в США и всего 60 кг — в Индии; показатели западных стран снизились из-за кризиса 2008 года (в 2006 году в США этот показатель составлял 400 кг). Исключительно высокие показатели Южной Кореи и Тайваня (1160 и 780 кг соответственно) обусловлены в основном не внутренним потреблением, а расходами стали в судостроительной промышленности, выпускающей корабли на экспорт.

Достаточно точная статистика по производству стали позволяет сделать вывод, что всего в течение XX века был произведен почти 31 миллиард тонн стали, и половина этой массы — после 1980 года. Возникает вполне очевидный вопрос: что произошло со всем этим металлом? По моим оценкам, в начале XXI¹⁴ века стальных изделий, которые можно было бы переплавить для получения нового металла, накопилось всего около 15 миллиардов тонн, или 2,5 т на душу населения (Smil, 2005). Моя оценка практически не отличается от выводов самого подробного недавно проведенного количественного анализа общемировых запасов стали (Hatayama и соавт., 2010). Согласно этому анализу общие запасы стали в 42 странах достигли 12,7 миллиарда тонн в 2005 году, удвоившись с 1980 года. Большая часть металла — примерно 60% — содержится в сооружениях, примерно 10% в транспортных средствах. Предсказывается, что конструкционно-транспортный запас достигнет 55 миллиардов тонн к 2050 году, в основном из-за десятикратного роста потребления стали в Азии. Для сравнения: по оценке Мюллера и соавт. (Müller и соавт., 2009) общие запасы антропогенного железа приравнивались к 25–30 миллиардам тонн, американские — к 3,2 миллиарда тонн, по состоянию на 2000 год, а вот по оценке Геологической службы — к 4 миллиардам тонн (Buckingham, 2006).

В мировом сталеплавильном производстве также наблюдались изменения с точки зрения «национального лидерства» и самой структуры отрасли. По мере роста и «взросления» сталелитейного производства Великобритания уступила Соединен-

¹⁴ В оригинальном тексте XX, что, вероятно, является опечаткой. — *Прим. пер.*

ным Штатам свое первенство как в производстве, так и в инновационности; однако с 50-х гг. центром инноваций стала Европа и прежде всего Япония, а с точки зрения объемов производства лидером стал СССР, несмотря на технологическую отсталость. После 1974 года — что совпало с первым этапом высоких цен на нефть — практически непрерывный послевоенный рост этой отрасли сменился на чередование взлетов и падений, при этом в течение последующих 25 лет общемировой уровень производства несколько снизился. Следующее снижение наблюдалось в 2008–2009 гг. вследствие глобальной рецессии, однако ввиду огромного и постоянно растущего спроса на сталь в Китае уровень производства все равно превышал достигнутую в 2004 году планку в 1 миллиард тонн в год.

В 1900 году US Steel Corporation произвела почти 30% стали в мире, США в целом — 36%. В конце ВМВ, когда Япония и Германия были разрушены, доля США составляла почти 80%, однако рост сталелитейного производства в Японии и СССР после 1955 года привел к снижению этой доли. К 1975 году в списке ведущих сталепроизводителей мира все еще имелись три американские компании (US Steel занимала второе место), к 1990 году в этой десятке осталась только US Steel, опустившись на пятое место, а еще год спустя ее родительская компания USX была исключена из списка Dow 30, уступив свое место Disney.

К 2010 году в десятке и вовсе не осталось американских компаний: US Steel заняла 14 место, а когда в 2011 году она поднялась на 13, 6 из 10 крупнейших сталелитейных производств располагались в Китае; доля США в мировом производстве стали составляла менее 6%, доля Китая — 45%. В течение XX века алюминий стал вторым по важности металлом современной цивилизации, однако основные методы его производства практически не менялись с момента их изобретения в 80-х гг. XIX века: алюминий все так же получали путем комбинации байеровского производства глинозема из бокситов (извлечением с помощью каустической соды и последующей кальцинацией) и электролизом криолита и глинозема по методу Холла-Эро. Однако полный производственный цикл — от добычи бокситов до электролитической выплавки, литья слитков или проката листов — является затратным с точки зрения расхода сырья; кроме того, он остается весьма энергоемким (IEA, 2007; IAI, 2007). Затраты материалов на первичное производство металла включают (на тонну литого слитка) примерно 5270 кг бокситов (из которых получают порядка 1925 кг глинозема) и 435 кг нефтяного кокса и смолы для изготовления анодов.

Многие отрасли, прежде всего автомобилестроение, перешли на алюминий, чтобы снизить массу изделий без ущерба для структурной целостности: как уже отмечалось выше, плотность алюминия в три раза меньше плотности стали, однако прочность на растяжение многих алюминиевых сплавов достигает 400–500 МПа, равняясь по этому показателю широко распространенным конструкционным сталям (400–550 МПа); у высокопрочных сталей этот показатель может значительно превышать 1 ГПа. Снижение веса многих ключевых деталей автомобиля за счет использования алюминия может достигать 40%; для сравнения, высокопрочные стали позволяют снизить вес только на 11%. Поэтому американская автомобильная отрасль сейчас расходует примерно треть всего алюминия в стране, а само содержание этого металла и его сплава достигло новых высот в моделях 2012 года (почти 156 кг на транспортное средство), составив 9% всей массы среднего автомобиля (и более

трети лома от того же автомобиля). В основном алюминий содержится в двигателе и колесах, но его также все чаще используют для изготовления капотов, багажных отсеков и дверей. По той же причине автопроизводители, сталкивающиеся со все более строгими экологическими требованиями, планируют удвоить долю этого металла в среднестатистическом автомобиле к 2025 году (AA, 2011).

В XX веке появилась еще одна отрасль промышленности, больше остальных зависящая от алюминия. Обшивка первых самолетов была деревянной и текстильной, однако уже в конце 20-х гг. появились алюминиевые фюзеляжи; монококи также были полностью алюминиевыми. Спрос на этот металл увеличивался прежде всего благодаря беспрецедентной программе США по строительству новых истребителей и бомбардировщиков во время Второй мировой войны; тогда расход алюминия в стране увеличился более чем в пять раз всего за четыре года (USGS, 2013). Спрос на алюминий в военной сфере не снижался и после войны; к середине 50-х гг. началась эпоха коммерческих аэробусов, первым из которых стал появившийся в 1957 г. Boeing 707. Фюзеляж таких самолетов на 70–80% состоял из высокопрочных алюминиевых сплавов, и на один широкофюзеляжный самолет приходилось более 100 тонн металла. Алюминиевые сплавы были важны и для множества других послевоенных рынков: от жилищного строительства (оконные и дверные рамы, водосточные желоба) до спутников связи и шпионских спутников, от автомобилей до банок под напитки (Hosford and Duncan, 1994). Кроме того, алюминиевые провода стали важнейшим проводником электричества на дальние расстояния.

С начала промышленного производства в 80-х гг. XIX века и до 2012 года из бокситов получили почти миллиард тонн (956 миллионов тонн) алюминия; по наиболее точным расчетам почти 75% этой массы все еще используется, при этом около трети распределено по зданиям, почти 30% — в транспортных средствах, примерно столько же — в электрике и порядка 10% — в механизмах. Это значит, что значительная часть добытого металла подверглась многократной переработке, однако такое повторное использование ограничивается добавлением других элементов для получения алюминиевых сплавов. Чистый 99,8% алюминий стал использоваться гораздо реже и в меньших количествах, уступив сплавам, предназначенным для конкретных целей.

3.4 Пластмассы

Повсеместные в наши дни пластмассы преимущественно относятся к двум категориям искусственных полимеров: термопластам (почти 80%) и реактопластам (основная часть оставшегося количества). Термопласты — это линейные либо разветвленные молекулы, связь между которыми осуществляется с помощью слабых сил Ван-дер-Ваальса. Они размягчаются при умеренном нагреве, благодаря чему их легко обрабатывать. Термопласты повторно затвердевают при охлаждении, сохраняя при этом достаточно высокую ударопрочность (Ibeh, 2011). Самым важным термопластом является, однозначно, полиэтилен (ПЭ), на который в 2010 году пришлось 29% совокупного производства пластмасс, или примерно 77 миллионов тонн. На втором месте — полипропилен (ПП), 19%, или 50 миллионов тонн; затем идет

поливинилхлорид (ПВХ) — примерно 12%, или 32 миллиона тонн. В отличие от термопластов, макромолекулы терморезистивных пластмасс или реактопластов образуют между собой химические связи (за счет чего отличаются лучшей размерной стабильностью), поэтому такие пластмассы не смягчаются при умеренном нагреве (Goodman, 1998). В их производстве доминируют полиуретаны и эпоксидные смолы, за которыми следуют полиимиды, меламины и уреа-формальдегиды.

Как и в случае с большинством материалов, ведущим производителем пластмасс является Китай, доля которого в 2010 году составила почти 1/4 от всего мирового производства; за Китаем следуют ЕС и Северная Америка. Конечно, если говорить о подушном расчете, то Китай, где расход пластмасс на человека в год составляет менее 50 кг (включая производство товаров на экспорт), сильно отстает от ЕС и США со 115 и 125 кг соответственно (данные за 2010 год). По европейскому рынку имеются подробные статистические отчеты с категориальной разбивкой, где хорошо видна структура конечного пользования пластмасс (Plastics Europe, 2011): в 2010 году почти 40% общего количества пластиков ушло на упаковку (большой частью это разновидности ПЭ и ПП), примерно 20% — на строительство (основной статьей расхода стали пластмассовые листы, используемые для изоляции стен и потолков), почти 8% потрачено автомобилестроительными компаниями (внутренняя отделка и некоторые наружные детали), примерно 6% — энергетической отрасли и производителями электроники (большой частью на изоляцию проводов и кабелей).

Три основных полимера, на которые приходится примерно три пятых мирового производства синтетических материалов — ПЭ, ПП и ПВХ, — структурно очень схожи: они состоят из атомов углерода, но молекула ПЭ помимо углерода содержит только атомы водорода, а у ПП каждый второй атом углерода соединен с метиловой группой (CH_3); в ПВХ хлор чередуется с водородом. Имеются и другие сходства: например, этилен (этан в номенклатуре ИЮПАК, C_2H_4) и пропилен (пропен в номенклатуре ИЮПАК, C_3H_6) полимеризуются с помощью катализаторов одного и того же класса, совпадают по многим физическим характеристикам, а также схожи с точки зрения ежедневного применения в упаковке, строительстве, производстве как бытовых, так и промышленных изделий. А вот с точки зрения восприятия потребителем и экологического воздействия они сильно различаются. ПЭ и ПП представляются в более благоприятном свете, в то время как ПВХ зачастую описывают как экологически опасный материал, так как для его синтеза используются вредные реагенты, его переработка затруднительна, а утилизация имеет нежелательные последствия независимо от того, отправляется материал на свалку или сжигается.

Вот уже три поколения важнейшим пластиком мира остается ПЭ (Malpass, 2010). ICI запатентовала метод высокообъемной полимеризации ПЭ в 1936 году, а в сентябре 1939 года, накануне вступления Британии во Вторую мировую войну, начала производство полиэтилена низкой плотности (ПЭНП, разветвленный гомополимер этилена) с использованием хромового катализатора. В ходе войны этот новый материал использовали для изоляции кабелей и в производстве радарных обтекателей, однако для его получения требовались очень высокие значения давления и температуры (более 100 МПа и 200°C). Ситуация изменилась в 1953 году, когда группа под руководством Карла Циглера, проводя исследования в институте Макса Планка, открыла смешанные металлоорганические катализаторы: ученые обнаружили,

что никель в сочетании с триэтилалюминием димеризует олефины (Ziegler, 1963). В дальнейших исследованиях было обнаружено, что и другие катализаторы с тяжелыми металлами — прежде всего титаном в виде его тетрахлорида $TiCl_4$ — могут вызывать полимеризацию этилена, приводя к образованию полиэтилена высокой плотности (ПЭВП, линейный полукристаллический гомополимер этилена).

Во время первых испытаний производство осуществлялось при относительно низком давлении в 20 МПа, позже — в условиях окружающей среды (Ziegler, 1963). Итальянец Джулио Натта с помощью этих катализаторов получил полимеры из пропилена; в 1963 год оба химика получили Нобелевскую премию на двоих. Высокоплотный ПЭ отличается большей упругостью. По плотности он лишь незначительно отличается от ПЭНП (0,95–0,97 г/см³ у ПЭВП, 0,91–0,94 г/см³ у ПЭНП), однако существенно превосходит с точки зрения температуры плавления (135°C против 115°C) и прочности на растяжение (32 МПа у ПЭВП, 9 МПа у ПЭНП). ПЭНППЭНП, с другой стороны, более гибок и прозрачен. Оба полимера инертны. Проблему тенденции первых изделий из ПЭВП к растрескиванию удалось решить путем синтеза материала с меньшей долей ветвей в линейной цепи.

Позже, уже в 70-х гг., удалось значительно повысить эффективность катализаторов на основе титана путем добавления $MgCl_2$, что дало старт промышленному синтезу линейного полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП — статистический сополимер этилена и α -олефинов с плотностью от 0,915 до 0,925 г/см³). Этот материал прочнее, чем ПЭНП, и из него можно изготавливать более тонкую пленку. Спектр материалов на основе этилена теперь также включает в себя сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности (СВМП, англ. *ultra-high molecular weight polyethylene*) — материал с молекулярной массой от 3,5 до 5,5 миллиона, плотностью от 0,93 до 0,935 г/см³; полиэтилен средней плотности (ПЭСП, 0,94 г/см³) и «сшитый» полиэтилен, также называемый полиэтиленом сетчатой структуры (РЕХ или XLPE, является эластомером ввиду наличия в его структуре поперечных связей).

Производство всех этих продуктов начинается с этана. В Северной Америке и на Ближнем Востоке этан выделяют из природного газа; большие запасы газа в сочетании с низкими ценами позволяют экспортировать излишки, при этом продолжая наращивать производственные мощности. Так, в 2012 году в Катаре начал работать самый большой завод по производству ПЭНП в мире, в США планируется запустить новые предприятия по выработке этилена, что стало возможным в основном благодаря добыче сланцевого газа. Основным источником этана в Европе, где цены на импортируемый природный газ высоки, является лигроин, получаемый перегонкой сырой нефти. Этан подвергают крекингу, чтобы получить этен ($C_2H_6 \rightarrow C_2H_4 + H_2$), затем этилен проходит многостадийную очистку, в результате которой остается соединение со степенью чистоты 99%; экзотермическая каталитическая конверсия этого соединения — процесс с эффективностью примерно 97% — приводит к образованию порошкового ПЭ.

Для формирования конечных изделий из разных видов ПЭ выбирается метод, наиболее подходящий для тех или иных эксплуатационных условий. К таким методам относятся: экструзия и формование (ударами, дутьем или вращением), литье или дутье листов (однослойных и ламинированных) и изоляционной пены. Помимо низ-

кой жесткости, к недостаткам ПЭ относят воспламеняемость, низкую стойкость к воздействию погодных условий, ограниченный диапазон температурной устойчивости, а также тенденцию к растрескиванию под напряжением. Спектр как явного, так и скрытого применения изделий из ПЭ продолжает расширяться. Практически повсеместны пленки из ЛПЭНП, ПЭНП и ПЭСП, из которых делают прозрачные или непрозрачные пакеты (под сэндвичи, продукты или мусор), пленки (для накрывания сельскохозяйственных культур и временных парников), обертку (саран и пищевая пленка), гибкие бутылки (под мед), мусорные корзины из ПЭВП, емкости (под молоко, моющие средства, моторное масло) и игрушки (включая детали Лего). Среди множества скрытых применений ПЭ отметим строительную изоляцию (Тайвек) и водопроводные трубы из ПЭВП, водопроводные трубы и кабельную изоляцию из сшитого полиэтилена (РЕХ), а также изготовление коленных и тазобедренных имплантатов из СВМП.

Гибкость, прочность, долговечность, устойчивость к УФ-излучению — благодаря этим свойствам ЛПЭНП отлично подходит для использования в экстремальных условиях, включая подложку для бассейнов, строительные геомембраны; материал также часто используют для изготовления пакетов для льда и замораживания продуктов. С точки зрения размеров изделия из ПЭ разнятся от огромных водных резервуаров из ПЭНП (по 50 000 литров или 50 м³) до мелких деталей машин (подшипников и передач), изготавливаемых из износостойкого СВМП. Еще один пример очень разных изделий: мягкая пищевая пленка и пузырчатая обертка из ПЭНП и СВМП (*Spectra*), используемый в изготовлении пуленепробиваемой одежды в качестве альтернативы арамиду (кевлару). ПЭ-изделия все чаще подвергаются переработке. Из переработанного ПЭВП (отмечается цифрой 2 внутри треугольника, указывающего на возможность переработки и отпечатаваемого в нижней части изделия) производят мусорные ведра, контейнеры для моющих средств, цветочные горшки. Из переработанного ПЭНП (цифра 4) — новые пакеты.

Пропилен — бесцветный, но легковоспламеняющийся и удушающий газ — получают путем крекинга углеводородов. Он был впервые полимеризован в 1954 г. Джулио Натта в Италии и Карлом Реном в Германии. В результате полимеризации было получено кристаллическое изотактическое соединение, все метильные группы которого были прикреплены к одной и той же стороне углеродной цепи. Как и ПЭ, изотактический ПП продолжают производить с применением металлических катализаторов Циглера-Натта, а вот синдиотактический ПП (с регулярным чередованием противоположных мономеров) катализируется растворимыми металлоценами — органометаллическими комплексами, применение которых позволяет управлять молекулярной структурой для получения полимеров с конкретными свойствами. Промышленные разновидности включают сополимеры (гомополимеры, блок- и статистические полимеры), а также смеси, модифицированные резиной. К недостаткам ПП относят воспламеняемость, разложение под УФ-излучением (и то, и другое можно снизить специальными добавками), восприимчивость к действию хлорированных растворителей, а также низкую ударопрочность при низких температурах.

У ПП много общих видов применения с ПЭ (пищевые контейнеры, например, баночки для йогурта, сметаны и майонеза, крышки для таких контейнеров, ящики, пакеты, мусорные ведра, контейнеры для хранения, бутылки, корзины, ведра и тру-

бы) и ПВХ (изоляция для кабелей и проводов, пленка). При этом, благодаря сочетанию низкой плотности (0,89–1,06, обычно около 0,905 г/см³), высокой прочности (25–40 МПа, больше, чем у пленки), высокой температуры плавления (идеальный изотактический полимер имеет температуру плавления 171°C, используемый в промышленности материал — 160–166°C) и устойчивости к воздействию кислот и растворителей ПП является идеальным сырьем для изделий, эксплуатируемых при высокой температуре (лабораторная и больничная утварь, подвергающаяся стерилизации), в наиболее суровых и требовательных условиях (промышленные трубы для горячих и холодных жидкостей, веревки, детали, подвергающиеся сгибанию и ударам, например, петли и контейнерные крышки); ПП также хорош в качестве нетканого материала (например, для подгузников, водо- и воздухоочистителей) и волокон. Волокна используются для изготовления как домашних, так и уличных ковров, легких тканей из ПП-пряжи, а также для наружной отделки домов, так как материал обладает хорошими изолирующими свойствами и при этом не намокает.

История ПВХ началась необычно рано по сравнению с другими пластмассами: винилхлорид был впервые получен Анри Виктором Реньо в 1835 году, а в 1872 Ойген Бауманн смог полимеризовать это соединение в лабораторных условиях. Настоящий прорыв состоялся только в 1926 году, когда Вальдо Л. Семон (работавший в BF Goodrich Company, г. Акрон, Огайо) растворил нагретый полимеризованный винилгалогенид в нелетучем органическом растворителе, получив после охлаждения то, что он назвал «жестким резиновым гелем» (Semon, 1933). Производство ПВХ начинается с соединения этилена и хлора, после чего этилена дихлорид преобразуют в винилхлорид, который проходит полимеризацию (в основном в виде суспензии, но иногда и в виде эмульсии) в реакционных сосудах. Так получают порошковый ПВХ.

Чтобы показать, насколько этот материал распространен в современном обществе, я написал небольшой рассказ об одном дне из жизни обычной горожанки. В рассказе указывается на присутствие ПВХ в предметах, которыми она пользуется утром, уходя на работу (начиная с изолированных проводов, водопроводных и канализационных труб и заканчивая пищевой пленкой, а также внутренней отделкой кузова и интерьера ее авто). В конце я отмечаю, что попади она в аварию и окажись в больнице, то вокруг нее было бы еще больше ПВХ. Из разных видов этого материала изготавливается огромное количество разнообразной больничной утвари: одноразовые предметы, хирургические перчатки, гибкие зонды для кормления, дыхания и замера давления, катетеры, пакеты с кровью, пластиковые емкости для внутривенных инфузий, стерильная упаковка, подносы, тазы, постельные грелки и поручни, термоодеяла и лабораторная посуда (Smil, 2006, p. 131).

ПВХ также используется в строительных работах (сайдинг для дома, оконные рамы), для изготовления уличной мебели, водяных шлангов, офисных принадлежностей и устройств, игрушек, кредитных карточек, а вот новые пластиковые банкноты (приняты в обращение в Австралии и Канаде) делаются из ПП. К сожалению, все не так-то просто. Гринпис называет этот материал «одним из самых токсичных веществ, наполнивших нашу планету и жизни ее обитателей», а также «самым экологически вредным видом пластмассы», загрязняющим как организмы людей, так и окружающую среду не только в ходе производства, но также и при эксплуатации, захоронении и сжигании изделий из него. Организация призывает найти ему замену

и избавить мир от ПВХ (Greenpeace, 2013). Производители пластмасс опровергли эти утверждения (Vinylfacts, 2013); кроме того, это соединение стало настолько повсеместным, что избавиться мир от него было бы очень непросто.

При производстве и сжигании ПВХ выделяются диоксины; кроме того, есть подозрения, что фталаты — пластификаторы, используемые для смягчения обычно жесткого ПВХ и попадающие в окружающую среду при использовании и утилизации изделий из ПВХ — обладают канцерогенными свойствами. Однако окончательные выводы на этот счет сделать сложно. С одной стороны, Уилкинсон и Ламб (Wilkinson and Lamb, 1999) показали, что то количество фталатов, которое попадает из мягких ПВХ-игрушек в организмы детей, берущих такие игрушки в рот, не представляет опасности (риск на несколько порядков ниже, чем у грызунов, которые подвергались хроническому воздействию вещества без какого-либо видимого эффекта); выкладки по моделированию свалок демонстрируют, что ПВХ, присутствующий в мусоре на свалках, не разлагается, а источником попадающего в среду винилхлорида является скорее перхлорэтилен (Mersiowsky, 2002).

С другой стороны, Тикнер и соавт. (Tickner и соавт., 2001) пришли к выводу, что нельзя исключать канцерогенную реакцию, вызываемую выщелачиванием фталатов из медицинских изделий, и призвали осторожно, но целенаправленно провести замену таких изделий. Воздействие фталатов и астма у детей (Bornehag и Nanberg, 2010), а также возможный риск для здоровья, обусловленный попаданием химикатов из пластиковых труб в питьевую воду (Stern и Lagos, 2008) — по этим вопросам также пока не вынесен окончательный вердикт. Однако проблемы с пластмассами обусловлены не только химическим воздействием: само присутствие этих материалов на земле и в океане вызывает серьезное беспокойство. Срок службы пластмассовых изделий с точки зрения функциональной целостности сильно ограничен, и даже если материал не контактирует с водой или почвой, он не сможет сохранять форму десятилетиями. Максимальный срок, в течение которого пластмассовые изделия не теряют целостности, определен как 2–15 лет для ПЭ, 3–8 лет для ПП, 7–10 лет для полиуретана; из распространенных пластмасс только ПВХ может не разрушаться в течение двадцати-тридцати лет, а толстые трубы под холодную воду, сделанные из этого материала, служат еще дольше (Berge, 2009). Однако на полное разложение уходят десятилетия, порой даже больше ста лет, и обрывки пленки, обломки пластика, полуразложившиеся куски пластмассовых изделий накапливаются в окружающей среде.

3.5 Промышленные газы

Если попросить людей составить краткий список материалов, без которых современная цивилизация не сможет функционировать, то совсем немногие включают в этот список промышленные газы. Более того, эта группа зачастую не представлена в данных проводимого в ЕС и Северной Америке мониторинга совокупных материальных потоков. Авторы работ по истории современных изобретений также склонны игнорировать промышленные газы. Те из читателей этой книги, которые не пропустили ни один предыдущий параграф, уже поняли, что кислород, водород

и азот заслуживают звания трех важнейших элементов, потому что без них не было бы самых эффективных технологий производства стали, не существовало бы ни современной нефтехимической отрасли, ни азотных удобрений. К другим элементам и соединениям в группе промышленных газов относят ацетилен, аргон, диоксид углерода, гелий, неон и закись азота.

Как уже отмечалось ранее, на заре технологий сжижения газа наибольших успехов в их развитии добился Карл фон Линде, скомбинировавший эффект Джоуля-Томсона и противоточный теплообмен. В 1902 году он запатентовал технику выделения основных газов из сжиженного воздуха (при температурах ниже $-140,7^{\circ}\text{C}$) путем очищения методом ректификации (противоточной дистилляции); к 1910 году он усовершенствовал этот процесс и адаптировал его под масштабное промышленное производство, разработав технологию двухколонной ректификации, позволяющую производить чистый кислород и азот одновременно (Houseman, 1949; The Linde Group, 2012). В 1902 же году Жорж Клод, поработавший с ацетиленом, представил свой метод криогенного разделения воздуха (Almqvist, 2003), и вот уже целое столетие наработки Клода и Линде остаются основой современных технологий получения высокочистых потоков азота, кислорода и аргона из атмосферы, где их содержание составляет, соответственно, 78,08, 20,95 и 0,93 процента.

Однако Линде и Клод были бы, пожалуй, весьма удивлены, узнав, насколько значимыми стали их изобретения. Самым важным является, пожалуй, аммиак, для синтеза которого необходимо крупномасштабное производство чистого азота. Без аммиака мы бы не прокормили миллиарды людей, а без кислорода не смогли бы производить важнейший сплав мира в тех количествах, в которых мы его сейчас имеем. Синтез аммиака является самой большой статьей расхода азота: в 2010 г. на него ушло 130 миллионов тонн газа (порядка 112 миллиардов $\text{m}^3 \text{N}_2$). Среди прочих важных производств, где азот используется в качестве сырья, отметим синтез азотной кислоты, гидразинов и аминов.

Жидкий азот используется не только для хранения вакцин и тканей, но и для заморозки почвы, что облегчает бурение и прокладку тоннелей, а также в переработке шин и растворов, для повышения нефтеотдачи, в производстве пластиковых молдингов и для усадки материала: охлаждение металлических деталей азотом позволяет точнее подгонять компоненты в сборке и наоборот — разъединять их. С развитием современной электроники азот стали применять там (особенно для пайки), где необходимо снизить концентрацию кислорода и обеспечить чистоту воздуха. К 1985 году эта статья составила 15% всего расхода азота в США. N_2 теперь также используется в качестве инертного защитного слоя для легковоспламеняющихся или взрывоопасных соединений. Он также защищает вино в открытых бутылках.

Среди отраслей, использующих кислород, с отрывом лидирует черная металлургия: этот газ задувают в доменные, электродуговые и конвертерные печи, так как на тонну горячего металла уходит примерно 50 кубометров кислорода. На втором месте — химический синтез (прежде всего окисление этилена). Кроме того, кислород применяют при выплавке цветных металлов (свинца, меди и цинка), в производстве строительных материалов (обеспечивает более интенсивное пламя и позволяет экономить топливо при обжиге стекла, минеральной ваты, известняка и цемента), а также для делигнификации и отбеливания при получении древесной массы и бумаги,

где кислород эффективнее диоксида хлора. Жидкий кислород является отличным ракетным топливом (первая ступень ракеты «Сатурн», использовавшейся в лунной миссии «Аполлона», работала на смеси кислорода и керосина); сварка и резка металлов производится кислород-ацетиленовым пламенем; на очистных сооружениях его применяют для окисления, сжигания и витрификации; еще одной растущей рыночной нишей является сжигание опасных отходов; в аквакультуре кислородом аэрируют пруды. Объем жидкого кислорода на мировом рынке достиг 75 миллиардов м³ в 2000 году и превысил 150 миллиардов м³ в 2010 (Research and Markets, 2013).

Аргон — самый дешевый из истинно инертных газов — идет на производство ламп накаливания и люминесцентных ламп (стандартная смесь содержит 93% Ar, 7% N₂), а также загоняется в пространство между панелями энергоэффективных окон; используется в производстве нержавеющей стали в качестве защитного газа при литье, а будучи задутым в конвертер, снижает потери хрома и предотвращает образование нитридов; удаляет водород и твердые частицы из плавленного алюминия, образует защитную среду при проведении газодуговой сварки, а также позволяет изготавливать кристаллы кремния и германия практически идеальной чистоты. Помимо этого, аргон используется для защиты вина в открытых бутылках и в микрокриохирургии для разрушения малых фрагментов ткани.

Водорода в атмосфере ничтожно мало (0,00005%, ср. с 0,04% CO₂), поэтому с экономической точки зрения выделять его из воздуха непрактично. До Второй мировой войны его получали путем паровой конверсии угля, а с 50-х гг. вместо угля стали использовать углеводороды. Очевидно, что лучшим источником является метан (CH₄). В течение первого десятилетия XXI века мировое производство водорода (как целенаправленно сепарированного, так и в виде побочного продукта нефтехимической отрасли, используемого в ее же нуждах) составляло примерно 50 миллионов тонн (около 550 миллиардов м³) в год (Markets and Markets, 2011). В 2010 году было целенаправленно произведено порядка 450 миллиардов м³ (40 миллионов тонн) водорода, причем производство методом пароконверсии было примерно поровну поделено между природным газом и другими ископаемыми видами топлива, а электролизом получено менее 5% общего объема. В 2010 году было произведено 159 миллионов тонн NH₃, для получения которого было использовано 28 миллионов тонн H₂.

Нефтеперерабатывающим заводам водород нужен для крекинга, деароматизации и обессеривания нефти (Chang и соавт., 2012). Гидроочистке, гидрообессериванию и гидрокрекингу подверглось примерно 3,7 миллиарда тонн нефти в 2010 году. Если исходить из расхода H₂ в размере 0,5% от всего первоначального сырья, или около 60 м³ на тонну, то на такую обработку ушло порядка 20 миллионов тонн газа. Остальной водород поделен между прочими видами химического синтеза (производство метанола, полимеров, растворителей, витаминов, лекарственных средств) и промышленными отраслями, включая производство стекла, полупроводников, ракетного топлива, а также пищевую обработку (гидрогенизацию ненасыщенных жирных кислот для получения твердых жиров).

Закись азота (N₂O, получают путем нагрева нитрата аммония) является широко распространенным анестетиком, а также вытеснителем для аэрозолей. Ацетилен (традиционно производился методом гидролиза карбида кальция — продукта ре-

акции извести и кокса) широко использовался в сварке и резке металла, пока ему на смену не пришла дуговая сварка. Гелий (извлекается из природного газа) в основном применяют в криогенных технологиях (включая фундаментальные научные исследования и магнитно-резонансную томографию), также для очистки и герметизации ракет, в хроматографии и в качестве подъемного газа в метеорологических аэростатах и аттракционных воздушных шарах. Наконец, рассматривая CO_2 , скажу, что сферы его применения весьма многочисленны и разнообразны, от обогащения воздуха в парниках с целью ускорения роста растений до повышения нефтеотдачи; сжиженный CO_2 под давлением может также использоваться в химической чистке вместо растворителей на основе продуктов нефтехимии.

Как видим, промышленные газы задействованы в секторах, на которые приходится больше половины всего объема экономического производства в мире, а рынок газов растет быстрее, чем экономика в целом. Так, в 2000 году их совокупная мировая рыночная стоимость составляла всего 34 миллиарда долларов, десять лет спустя — уже почти в два раза больше (превысила 60 миллиардов). Ожидается, что к 2015 году эта цифра достигнет примерно 80 млрд (Gale Group, 2012). Таким образом, включение промышленных газов в комплексную оценку материальных потоков оправдано не только из-за совокупной величины их ежегодного расхода, но также и ввиду незаменимости этих элементов и соединений практически во всех важных секторах современной экономики. Я подробнее остановлюсь на процессах получения трех важнейших — и лидирующих с точки зрения объема — потоков, то есть на кислороде, азоте и водороде. Основным фактором роста этих отраслей стали технические инновации, позволившие снизить расходы, повысить эффективность добычи газа, организовать производство газа на месте его применения, а также воспользоваться преимуществами так называемого «эффекта масштаба».

Самыми важными довоенными изобретениями стали регенераторы Фрэнкла (теплообменники, запатентованные в 1928 году), а также появившиеся в 30-х гг. турбодетандеры, пришедшие на смену поршневым двигателям в холодильных системах. Первый кислородный завод, основанный на принципе Линде-Фрэнкла, заработал в 1950 году; распространение этой технологии на порядок снизило цены на кислород. Значительного прогресса в методах сепарации воздуха удалось достичь в середине 80-х, когда Linde представила структурированные насадки для ректификационных колонн. В отличие от использовавшихся ранее лоточных сит, такие колонны позволяют насыщать текущую вниз жидкость кислородом, в то время как восходящий поток насыщается водородом. Так удалось снизить расход энергии (The Linde Group, 2012).

Криогенная добыча двух основных компонентов нашей атмосферы начинается со сжатия окружающего воздуха до приблизительно 600 КПа (обычное давление составляет 101,3 КПа) и удаления H_2O и CO_2 молекулярными ситами. Такие сита изготавливаются из синтетических цеолитов — алюмосиликатов с порами молекулярного размера и разнообразным химическим составом, позволяющим подобрать свойства такого сита под каждую конкретную ситуацию. Подобные материалы способны селективно абсорбировать H_2O , CO_2 , и N_2 ; на выходе получают O_2 с чистотой 90–95% (Ruthven и соавт., 1993). После удаления воды и диоксида углерода элементы охлажденного сжиженного воздуха сепарируются методом дистилляции, при этом сначала выкипает N_2 (при 77,4 К), затем — Ar (при 87,3 К) и O_2 (при 90,2 К).

После этого холодные газы перетекают обратно к теплообменникам, где охлаждаются поступающий воздух, одновременно нагреваясь почти до температуры внешней среды, что сопровождается изменением их давления до атмосферного. Такой обменный процесс снижает энергопотребление установки и повышает ее общую эффективность примерно до 35%. Альтернативная технология зародилась в середине 50-х гг. и заключается в так называемой адсорбции при переменном давлении (АПД, англ. pressure swing adsorption, PSA). Процесс заключается в подаче газов под давлением/адсорбции одновременно со сбросом давления/десорбцией в двух одинаковых адсорбирующих сосудах, заполненных углеродными молекулярными ситами. Метод основан на том факте, что O_2 быстрее диффундирует в их пористой структуре, чем N_2 (The Linde Group, 2013). АПД быстро стала популярной благодаря простоте и низким операционным затратам; самые большие установки, поставленные Linde, могут пропускать до $5000 \text{ nm}^3/\text{ч}^{15}$, производя N_2 и Ar 97–99,0000% степени чистоты. Вакуумная адсорбция (Vacuum swing absorption, VSA) — это еще один некриогенный процесс, основанный на цеолитах. Он позволяет получать кислород с меньшими по сравнению с АПД энергозатратами, производится при давлении и температуре, близким к температуре внешней среды, и часто осуществляется на установках производительностью более 20–30 т/день. Синтетические цеолиты, таким образом, служат отличным примером относительно малоизвестного, но очень важного материала. К 2010 году мировое производство этих веществ достигло 2,8 миллиона тонн (USGS, 2013).

Когда BASF начала коммерциализацию габеровского метода синтеза аммиака, она внедрила технологию производства водорода, запатентованную Вильгельмом Вильдом в 1912 году. Пароконверсионная технология *Wasserstoffkontaktverfahren* на основе катализаторов, участвующих в преобразовании CO в CO_2 , оставалась стандартом масштабного производства H_2 до конца 40-х гг. (Smil, 2001). Это решение было обусловлено ограниченностью ресурсов: немецкие химики знали, что лучше конвертировать чистый метан (соединение с самым высоким соотношением водорода и углерода) или лигроин (смесь легких углеводородных жидкостей), однако в межвоенное время Германия — один из крупнейших в мире производителей угля — не могла похвастаться большими запасами ни того, ни другого.

Поэтому неудивительно, что первые производственные мощности, использующие пароконверсию CH_4 , были введены в строй в богатой углеводородами Америке в 1939 году на аммиачном заводе Hercules Powder Company, Калифорния. После Второй мировой войны все производство водорода в США базировалось на паровой конверсии метана, в то время как в Европе и Азии основными источниками еще несколько десятилетий оставались уголь и жидкие углеводороды. К концу века примерно половина всего водорода в мире производилась из метана.

За реакцией CH_4 и пара при температурах от 700 до 1100°C и давлении 0,3–2,5 МПа — $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ — следует переход CO в CO_2 — $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ — и выделение дополнительного водорода. В конце процесса удаляют CO_2 и не вступивший в реакцию CO . Используя АПД — технологию, ставшую стандартом

¹⁵ nm^3 — нормальный кубический метр, внесистемная единица измерения количества газообразного вещества, которое в «нормальных условиях» занимает 1 m^3 . — Прим. пер.

в 60-х гг. — получают водород 99,9999%-й чистоты; установки Linde могут производить более 400 000 м³ газа в час (Ruthven и соавт., 1993; The Linde Group, 2013).

Жидкие углеводороды, особенно лигроин, служат исходным материалом при производстве водорода на нефтеперерабатывающих заводах, где этот газ необходим для каталитической конверсии более тяжелых фракций в легкое топливо, а также для обеспечения выполнения все более и более строгих экологических требований и для обессеривания очищенных нефтепродуктов. Пароконверсия угля все еще применяется в Китае и Индии, и лишь небольшая доля в общемировом производстве водорода приходится на энергоемкий электролиз воды (на кубометр H₂ уходит 4,8 кВт·ч) и крекинг метанола. Основной статьей расхода водорода остается синтез аммиака, на втором месте — производственные нужды нефтеперерабатывающих заводов (в основном на обработку тяжелой нефти, а также на обессеривание).

Как и во многих других отраслях, после Второй мировой войны производители газов начали предпринимать все более успешные попытки воспользоваться «эффектом масштаба». Первая установка Линде, созданная в 1902 году, могла производить 5 кг кислорода в час, или 120 кг/день; в течение 50-х гг. стандартная суточная производительность воздухоразделительных установок возросла с 50 до 100 тонн, в 60-х превысила 200 тонн, а в конце 70-х Linde уже эксплуатировала установки, производящие до 2300 тонн кислорода и 800 тонн водорода в день. К 90-м удалось достичь шкалирования на порядок еще в одном производственном направлении: в 1997 году каждый из четырех комплексов производства азота, построенных Linde, был самым большим воздухоразделительным производственным объектом; суммарно на них получали до 40 000 тонн азота в день. В 2000 году Linde построила самую большую в мире воздухоразделительную установку в Мексике, состоящую из пяти таких комплексов и производящую до 63 000 тонн азота в день (эквивалентно 17 500 тоннам O₂ в день). В 2006 году компания разработала проект завода в Катаре, состоящего из восьми производственных комплексов и вырабатывающего до 30 000 тонн кислорода в день (The Linde Group, 2013). Таким образом, выработка каждой производственной единицы составляет 156 250 кг/час, что в 30 000 раз больше, чем у первых установок 1902 года.

Потребители, нуждающиеся в больших объемах промышленных газов, полагаются на трубопроводы, по которым газ подается под давлением. Крупные производители содержат собственные системы трубопроводов: на картах можно увидеть высокую концентрацию линий подачи O₂, N₂, H₂ вдоль Мексиканского залива, обслуживающих необычное множество расположенных здесь нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов. Аналогичную картину можно наблюдать во многих промышленных регионах США, Германии и Японии. В то же время возросли масштабы децентрализованного производства газа. Леонард Паркер Пул, сотрудник американской компании Air Products, стал первопроходцем в реализации такого варианта еще в 40-х гг. Расположенные на месте специально разработанное криогенные установки обходятся куда дешевле, чем распределение газов в баллонах с централизованных заводов (Air Products, 2013).

Как и во многих современных отраслях промышленности, ориентированных на масштабное потребление их продукции другими промышленными предприятиями, в газовой отрасли наблюдается концентрация производственных мощностей. В 2010

году пять ведущих компаний производили две трети всего выпускаемого объема промышленных газов. Linde Group (с головным офисом в Висбадене, Германия) стала мировым лидером, выкупив BOC Group в 2006 году; экс-лидер Air Liquide (Париж) занимает теперь второе место; в 2011 году доходы этих двух компаний были примерно одинаковы. В Америке также расположены две крупные компании - Praxair (со штаб-квартирой в Данбери, Коннектикут) и Air Products (головной офис в Аллентауне, Пенсильвания).

3.6 Удобрения

Как уже было описано в предыдущей главе, настоящий прорыв в удовлетворении растущего спроса на азотные удобрения произошел только в 1909 году, когда Фриц Габер продемонстрировал синтез аммиака из его составных элементов, после чего реакцию, показанную на лабораторном стенде, быстро внедрили в масштабное промышленное производство. BASF - ведущая химкомпания Германии сделала это к 1913 г. под руководством Карла Боша. Я уже высказывался ранее, что синтез по методу Габера-Боша заслуживает звания самой важной технической инновации XX века: столь значимым он был для мировой пищевой промышленности (Smil, 2001). Однако в течение десятилетий производители продовольствия не могли воспользоваться преимуществами аммиака, так как сначала большая его часть уходила на изготовление взрывчатки для боевых действий в Первой мировой войне, а затем наступили Великая депрессия и Вторая Мировая война.

После 1950 года производство аммиака быстро росло, увеличившись с менее чем 6 миллионов тонн в 1950 году до примерно 120 миллионов тонн в 1989, а вот в начале 90-х наблюдалась некоторая стагнация, обусловленная двумя факторами: 1) использование азота во многих богатых странах стало избыточным; 2) распался СССР - на тот момент крупнейший производитель аммиака в мире. К 2000 году синтезировалось уже более 130 миллионов тонн в год, в 2010 было синтезировано 159 миллионов тонн, в 2011 — 164 миллиона тонн (USGS, 2013). В том же году в мире было израсходовано порядка 200 миллионов тонн серной кислоты, но так как у аммиака молекулярная масса гораздо ниже (17), чем у H_2SO_4 (98), NH_3 опережает любое другое соединение с точки зрения синтезируемого количества (в молях): его синтезируют почти в 4 раза больше, чем H_2SO_4 .

Около двух третей (65–57%) всего синтезируемого NH_3 еще недавно использовалось в качестве удобрения; общемировой расход утроился с 33 миллионов тонн азота в 1970 году до 106 в 2010. Поскольку аммиак при обычном атмосферном давлении является газом, вносить его в чистом виде (безводный) в землю можно только с помощью специального оборудования (полевых лезвий) в процессе культивации. Такое оборудование в значительных количествах используется только в Северной Америке. Обычно аммиак не использовали в чистом виде и включали в состав различных удобрений (нитратных, сульфатных), однако теперь выбором №1 (особенно в рисоводческих регионах Азии — крупнейшего в мире потребителя азотных удобрений) является мочевины, на 45% состоящая из N. На втором месте находится нитрат аммония, или аммиачная селитра (35% N).

За последние два поколения изменилась сама структура расхода азотных удобрений. Расходы стабилизировались во многих богатых странах (в США было израсходовано 11,5 миллиона тонн азота в 1996 году, 10,5 миллиона тонн в 2000, 11,5 миллионов тонн в 2010), а в некоторых из них даже заметно сократились: с почти 800 тысяч тонн азота в Японии в 1979 году до 450 тысяч тонн в 2010 (FAO, 2013). Густонаселенные модернизирующиеся страны, во главе которых стоит Китай, стали крупнейшими потребителями. Китай обогнал США и стал ведущим потребителем химически активного азота в 1979 году, а десять лет спустя — еще и крупнейшим производителем. В 2000 году Китай произвел 22,1 миллиона тонн азота, в 2010 — 35 миллионов тонн. Доступность дешевых азотных удобрений в больших количествах позволила реализовать урожайный потенциал новых сортов сельхозкультур.

Первой появилась гибридная кукуруза (начали выращивать в США в 30-х гг.); в 60-х Международный центр селекции кукурузы и пшеницы (CIMMYT), Мексика, и Международный институт исследований риса (IRRI), Филиппины, представили сорта пшеницы и риса с высокой урожайностью и короткими стеблями (Smil, 2000). По сравнению с обычной культурой наилучшие достигнутые показатели по этим трем важнейшим зерновым достигли примерно 10 т/га (американская кукуруза, до ВМВ получали всего 2 тонны с гектара), 8–10 т/га (европейская пшеница, в 30-х гг. получали также около 2 тонн с гектара), 6 т/га (восточноазиатский рис, ранее собирали 2 т/га). Высокоурожайная американская кукуруза в среднем удобряется 160 кг азота на гектар, европейская озимая пшеница — более 200 кг азота/га, китайский рис — 260 кг, то есть в тех регионах, где собирают два урожая разных культур с одного участка в год, ежегодно расходуется примерно 500 кг азота на гектар. По моим расчетам, в 2000 году источником примерно 40% всего азота, присутствующего в пищевых белках, стали удобрения, произведенные путем синтеза аммиака по методу Габера-Боша (Smil, 2001).

Эффективность удобрений зависит не только от применения их в правильных количествах и правильным способом, но также от обеспечения потребностей растения в трех макроэлементах (N, P, K) и, при необходимости, от поступления достаточного количества микроэлементов, прежде всего бора, меди, железа, марганца, молибдена и цинка. Расходы фосфора и калия росли вместе с расходами азота, и, как и в случае с последним, рост этот временно прекратился после 1989 года в основном из-за коллапса экономик советского блока (где часто удобрения использовались в избыточных количествах), а также по причине того, что в западном сельском хозяйстве удобрения использовались более эффективно.

Исходя из массы, вторым важнейшим удобрением является фосфор, преимущественно используемый в виде обогащенной фосфатной породы, добываемой из поверхностных месторождений. Хронологически добыча фосфатов опередила синтез аммиака: в 1885 году мировое их производство достигло 1 миллиона тонн, в 1928 — 10 миллионов тонн, в 1974 — 100 миллионов тонн. В 2000 году производство достигло 133 миллионов тонн, а десять лет спустя — 181 миллиона тонн, при этом основная доля приходится на Китай (86 миллионов тонн), Марокко и Западную Сахару (26 миллионов тонн), а также США (тоже около 26 миллионов тонн, добывается преимущественно во Флориде и Северной Каролине) (USGS, 2012). Почти вся (> 95%) фосфатная порода в США идет на производство фосфорной и суперфосфор-

ной кислоты — двух разновидностей промежуточного сырья, используемого в производстве твердых и жидких фосфатных удобрений, а также кормовых добавок. Обработкой H_2SO_4 получают одинарный суперфосфат (содержит 8–9% P); фосфорная кислота (H_3PO_4) используется для производства тройных суперфосфатов (примерно 20% P), а H_3PO_4 и NH_3 — в производстве фосфатов аммония (до 23% P). Обычно расход фосфатов в сельском хозяйстве измеряют по пентаоксиду фосфора P_2O_5 , но я предпочитаю измерять по фактическому расходу самого питательного элемента (умножаем P_2O_5 на 0,436, получаем количество P). Мировой сельскохозяйственный расход фосфатов увеличивался до 1989 года, когда он достиг 16,5 миллиона тонн, а когда рост продолжился (в 2000 расходы составили всего 14,3 миллиона тонн), общее значение составило 20,3 миллиона тонн фосфора в 2010 году. Калий применяется в полях в основном в измельченном виде (KCl), в котором его получают преимущественно подземной добычей сильвинитов — смеси, на треть состоящей из KCl и на две трети из NaCl; самые большие запасы этой породы находятся в Саскачеване, который является крупнейшим мировым производителем. Мировая добыча, выраженная в эквиваленте K_2O , почти достигла 34 миллионов тонн к 2010 году, при этом основными производителями и экспортерами являются Канада (почти 10 миллионов тонн) и Россия (более 6 миллионов тонн). Примерно 85% всего KCl¹⁶ в мире идет на удобрения, остальное расходуется химической промышленностью, при этом расход этого вещества в качестве удобрения за последние четыре десятилетия вырос не слишком значительно: составлял менее 18 миллионов тонн калия в 1975 году и достиг примерно 22,5 миллиона тонн в 2010 (FAO, 2013). Таким образом, глобальное соотношение питательных веществ N:P:K составило 1:0, 19:0,21 в 2010 году (для сравнения — 1:0, 25:0,40 в 1975 году).

Значительно увеличить урожайность сельхозкультур удалось также благодаря появлению синтетических пестицидов (в основном инсектицидов) и гербицидов в 40-х гг. Дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) стал первым важным инсектицидом (Müller, 1948), но из-за избыточного применения у вредителей выработалась устойчивость к данному химикату, а его биоаккумуляция в липидах нанесла серьезный ущерб экологии. После того, как в США было израсходовано примерно 6000 тонн этого вещества в середине 40-х гг., его запретили к использованию в 1972 году (USEPA, 1972), но теперь используется множество новых и менее вредных инсектицидов (Hodgson, 1990; MacBean, 2013). Применять гербициды начали в 1945 году, первым из них стал 2,4-D¹⁷, затем появились и другие соединения, но ни одно из них не сравнится по важности с глифосатом, впервые синтезированным в 1971 году Джоном Э. Францем, компания Monsanto (Franz, 1974).

Этот гербицид широкого спектра действия, более известный под своим брендовым наименованием Roundup™, ингибирует продукцию ключевого фермента роста и разрушает корни сорных растений, но не перемещается в почве, благодаря чему не оказывает воздействия на другие растения и не отравляет воду (Wesseler, 2005). Быстрое внедрение трансгенных сортов глифосат-резистентных культур, появившихся в 90-х годах, оказало серьезное влияние на выращивание кукурузы, сои и рапса в

¹⁶ В оригинальном документе КС, что, вероятно, является опечаткой. — Прим. пер.

¹⁷ 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота. — Прим. пер.

США и Канаде, а затем и в Бразилии, Аргентине и Китае, однако дальнейшему распространению трансгенных сортов препятствуют европейцы и индийцы (Ruse and Castle, 2002; Kole and Michler, 2010).

3.7 Материалы в электронике

Если предложенную Кристианом Томсенем в 1836 году периодизацию истории по металлам распространить на все остальные материалы, то эпоху, начавшуюся в 1954 году, когда Texas Instruments выпустила первый кремниевый транзистор, или в 1971 году, когда Intel выпустила первый универсальный микропроцессор, следовало бы назвать Кремниевым веком. Такое развитие событий было неожиданным; к счастью, материал, о котором идет речь, присутствует в огромных количествах в земной коре, где он повсеместно встречается в составе кремнезема (SiO_2). Используют кремний уже давно: в виде кварцевого песка он является основным сырьем в стекольном производстве, составляя до 70% исходного материала (остальная доля поделена примерно поровну между кальцинированной содой Na_2CO_3 или K_2CO_3 и CaCO_3 или Pb, используемом в тяжелом свинцовом стекле). В 1900 году никто бы не смог предсказать, что SiO_2 — самый распространенный из поверхностных минералов — станет важнейшим материалом новой электронной эпохи. Этим элементом уже десятки лет пользовались металлурги, прежде всего в составе ферросилиция (15–90% Si), используемого в качестве раскисляющей добавки. На этот рынок приходится до 80% всего ежегодного мирового производства кремния, которое превысило 1 Мт в конце 50-х гг., 2 Мт к 1975 году, достигло 3,5 Мт в 2000 году и 8 Мт в 2011 (USGS, 2013). Крупнейшим производителем как ферросилиция (5,4 Мт в 2011 году), так и металлического кремния является Китай. Основными статьями расхода металлического кремния (поликристаллического кремния) являются производство алюминиевых сплавов и химический синтез, прежде всего изготовление силиконов — высокомолекулярных кремнийорганических полимеров общей формулой $[\text{R}_2\text{SiO}]_n$, где R - метильная, этильная или фенильная группа. Их промышленное производство началось в 40-х гг.; из силиконов производят отличную смазку и синтетические смолы, а также изоляционные и водоотталкивающие материалы.

Сырья для получения кремния предостаточно, однако 99%-й чистоты этого элемента можно достичь только энергоемким высокотемпературным процессом раскисления углеродом: $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ (путем применения графитовых электродов в электропечах). Однако даже 99%-й чистоты недостаточно для производства электроники и солнечных батарей, поэтому кремний металлургической марки проходит сложную и дорогостоящую обработку, которая многократно повышает его чистоту, обеспечивая соответствие техническим условиям производства полупроводников, солнечных батарей и оптоволокна (Föll, 2000). Фотоэлементы (ФЭ) изготавливают из поликремния «солнечной марки» с чистотой 99,9999–99,999999% (6–8 N), а вот уровень чистоты кремния, используемого в электронной промышленности для изготовления полупроводниковых пластин — микрочипов, составляет уже 9–11 N, то есть 99,999999999%.

Производство «электронного» кремния из металлургического начинается с каталитического получения трихлорсилана ($\text{Si} + 3\text{HCl} \rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$), разработанного компанией Siemens в 60-е гг. (McWhan, 2012). Затем трихлорсилан разлагают водородом ($\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{Si}$), одновременно добавляя малые количества примесей (активаторов), которые своим присутствием повышают проводимость элемента. Эта фаза весьма сложна, так как распространенные активаторы (AsH_3 и PH_3) весьма токсичны, H_2 и SiHCl_3 легко воспламеняются, а пары HCl обладают высокой коррозионной активностью. По окончании этой фазы высокочистый поликристаллический кремний преобразуется в кристалл, который можно нарезать на тонкие пластины (Duffar, 2010). Начало этой технологии положило случайное открытие, сделанное работавшим в Берлине польским химиком Яном Чохральским в 1916 году. Он опустил свой карандаш в небольшой тигель с расплавленным оловом и вытянул длинную тонкую нить металла, которая оказалась монокристаллом.

Чохральский, с помощью затравочного кристалла вытягивая расплавленный металл из расплава, одновременно осуществляя медленное вращение и постепенно понижая температуру, мог изготавливать кристаллы из олова, свинца и цинка с диаметром в несколько миллиметров и длиной до 1,5 см (Czochralski, 1918). Три десятилетия этой техникой пользовались разве что для изучения роста металлических кристаллов, однако с изобретением транзисторов она стала кандидатом на применение в производстве кристаллов из полупроводниковых материалов. Первым таким материалом стал не кремний, а германий; в 1948 году Гордон К. Тил и Дж.Б. Литтл, сотрудники Bell Labs, с помощью метода Чохральского впервые в мире получили кристаллы из чистого германия. К 1950 году, вскоре после появления первых транзисторов на основе Si, Тил и Эрнест Бюлер научились выращивать кристаллы из чистого кремния, а к 1956 году улучшили свои методы вытягивания и легирования кристаллов настолько, что их самый большой кристалл был в восемь раз тяжелее и в два раза шире в диаметре (2,5 см), чем их первые изделия (Buehler и Teal, 1956).

А техники выращивания все совершенствовались и совершенствовались: кристалл диаметром 7,5 см и массой 12 кг был получен к 1973 году, в 1980 году уже выращивались 14-килограммовые 10-сантиметровые кристаллы, а к 2000 году диаметр крупнейших кристаллов составлял уже 30 см, масса — 200 кг (Hahn, 2001; Zulehner, 2003). В следующем поколении удалось достичь диаметра 45 см и массы 1000 кг, однако этот процесс все еще находится на стадии разработки: Intel показала свою первую полноструктурированную пластину в январе 2013 года, а запустить производство планируется в 2015 году. В отличие от темно-коричневого порошкообразного аморфного кремния, кристаллы либо черного, либо черно-серого цвета блестят, а примеси составляют менее одной части на миллиард. Эти идеальные кристаллы нарезают на слои толщиной около 1 мм (при этом отклонение от идеальной плоскости не превышает 1 мкм); полированные пластины затем отправляются на заключительные этапы производства микропроцессоров (Intel, 2011).

Уильям (Williams, 2003) проанализировал цепь производства кремния в 1998 году, Такигути и Морита (Takiguchi и Morita, 2011) реконструировали мировые потоки кремния, использованного в производстве электроники, за период с 1997 по 2009 год. В 2009 году очисткой кремния металлургической марки сименсовским процессом было получено порядка 23 тысяч тонн электронного кремния, из которо-

го изготовили 16,1 тысячи тонн монокристаллического кремния, ушедшего на производство 7500 тонн пластин, из которых изготавливают микрочипы. К 2012 году масса поликристаллического кремния электронного качества составила около 28 тысяч тонн. Одним из основных факторов прогресса в вычислительных технологиях стала возможность наносить на одну пластину все больше и больше транзисторов — процесс, подчиняющийся широко известному закону Мура.

В 1964 году на микрочипе удалось уместить 32 транзистора, а в 1965 — уже 64; тогда Гордон Мур предсказал, что такое ежегодное удвоение будет наблюдаться и дальше, и в 1975 году появится чип с 65 тысячами транзисторов. В 1975 году он внес в свой ставший уже знаменитым закон небольшую поправку, указывая на удвоение каждые два года (Moore, 1975). Именно такие темпы и наблюдаются с той поры по мере прогресса в отрасли производства чипов; Intel представляет новаторские конструкции, конкуренты тоже вносят свой вклад в развитие технологий, продавая все более сложные микросхемы. Первый в мире универсальный микропроцессор Intel 4004 был выпущен в ноябре 1971 года; на нем располагалось 2250 металлооксидных полупроводниковых транзисторов, а по вычислительной скорости он равнялся построенному в 1945 году компьютеру ЭНИАК, который занимал целую комнату (Intel, 2013).

В 1979 году компания выпустила процессор 8088, на котором располагалось уже 29 тысяч транзисторов, а вскоре от широкомасштабной интеграции (до 100 тысяч транзисторов на микрочип) перешла к очень широкомасштабной интеграции (до 10 миллионов транзисторов), а затем, к 1990 году — к ультраширокомасштабной (до миллиарда транзисторов). К 2000 году компания уже размещала на своих процессорах до 42 миллионов транзисторов (Pentium 4), а в 2012 году начала выпуск сопроцессоров Xeon Phi с 5 миллиардами транзисторов (Intel, 2012). Массовое применение все более мощных микропроцессоров в сочетании с все более объемными устройствами хранения данных сказалось на всех без исключения отраслях современной экономики, предоставив невиданные ранее возможности обмена данными, управления процессами, хранения и поиска информации.

Неудивительно, что весь процесс превращения кварца в субстрат для микропроцессоров считается одним из лучших примеров наращивания добавленной стоимости в ходе производственного цикла. В подробном анализе Джексона (Jackson, 1996) и Уильямса (Williams, 2003) показано, что к концу XX века чистый кварц продавался оптом по цене менее 0,02 долл. за кг, металлургический кремний — за 1,10 долл./кг, трихлорсилан стоил порядка 3 долл./кг, поликристаллический кремний — от 50 до 100 долл./кг, монокристаллический — не менее 500 долл./кг, полированные кремниевые пластины — от 1500 долларов за килограмм, а цена эпитаксиальных фрагментов достигала 14 тысяч долларов за кг. К 2012 году поликристаллический кремний электронного качества продавался примерно за 50 долл./кг, то есть 28 тысяч тонн стоили около 1,4 миллиарда долларов. Поставки пластин под полупроводники выросли с примерно 3,5 миллиона м² в 2000 году до 5,9 миллиона м² в 2010 и 5,7 миллиона м² в 2012 (SEMI, 2013). Если посмотреть на мировую статистику, то видно, что суммарная стоимость поставленных пластин составляла менее 4 млрд долларов в 1977 году (самый ранний год, по которому удалось собрать данные по мировым поставкам), возросла до 50 млрд к 1990 году, превысила 200 млрд в 2000 году и

достигла 292 млрд в 2012 (SIA, 2013). В течение первого десятилетия XXI века производители электроники перестали быть крупнейшим потребителем высококачественного кремния, так как теперь этот материал большей частью идет на фотоэлементы. ФЭ из кремния появились почти так же давно, как и транзисторы. Bell Labs получила первый прототип в 1954 году, а в 1958 *Vanguard I* стал первым спутником, работавшим на солнечной электроэнергии; батарея площадью 100 см² генерировала всего 0,1 Вт, чего было более чем достаточно, чтобы питать передатчик мощностью 5 мВт. В 1962 году был запущен Telstar — первый коммерческий телекоммуникационный спутник; его фотоэлементы генерировали уже 14 Вт энергии; в 1964 году появился Nimbus — метеорологический спутник, потреблявший 470 Вт. Прошло полвека, и теперь сотни работающих на солнечных батареях спутников окружают планету Земля и используются для погодного и геологического мониторинга, связи и даже шпионажа; последний спутник, предназначенный для наблюдения Земли — запущенный в феврале 2013 года Landsat 8 — оснащен четырьмя рядами высокоэффективных фотоэлементов, генерирующих 3750 Вт (EMCORE, 2013).

Наземное применение ФЭ началось с менее дорогих (но все равно весьма недешевых) батарей из аморфного кремния в 1976 году; к 2012 году коэффициент преобразования энергии достиг 20% у тонких пленок в лабораторных условиях, у белых кристаллических батарей — 25%, у лучших моделей в открытой продаже — 19–22% (NREL, 2013; Solarplaza, 2013). В течение многих десятилетий фотоэлементы изготавливались из низкосортного поликристаллического материала, непригодного для нужд электроники; однако благодаря значительному субсидированию использования ФЭ их доля в производстве электроэнергии выросла со 100 МВт/год в 1995 году до более 10 ГВт/г в 2009 — так производители солнечных батарей стали нуждаться во все больших количествах чистого поликристаллического Si. В 1997 году ими было израсходовано всего 800 тонн такого кремния, в 2009 потребовалось уже 69,1 тонны — в три раза больше, чем ушло на производство электроники — из которых сделали порядка 44,5 тысячи тонн солнечных батарей, преимущественно изготавливаемых литьем поликристаллического металла (Takiguchi и Morita, 2011).

О потоках материалов

Движение материалов в человеческом обществе и окружающей среде может быть простым, линейным и легко отслеживаемым; но порой материалы попросту пропадают из виду, и отследить этот сложный процесс весьма непросто. Некоторые материалы имеют кратковременный срок службы и выбрасываются после однократного применения; другие же хранятся очень долго, а созданные из них объекты служат человеку десятки, порой даже сотни и тысячи лет. Некоторые металлы можно сколько угодно раз использовать повторно (хотя при этом они теряют в массе); однако переработка большинства материалов влечет за собой существенную потерю качества и функциональности. Идея вести подробную отчетность о приходах и расходах материалов, необходимых для проведения конкретных операций, работы фабрик и компаний, отнюдь не нова: без таких отчетов ремесленники не смогли бы выполнять заказы, инженеры и управляющие — контролировать производственные затраты или принимать меры по повышению производительности и прибыльности своих предприятий. Однако если не рассматривать исключительный случай Великобритании — первого в мире модернизатора, страны, где уже к 1800 году начали вести весьма подробную и точную запись сведений о потоках основных материалов — то окажется, что реконструкция даже нескольких потоков основных материалов за первые десятилетия XIX века требует большой доли приближений и гипотетических допущений по конкретным отраслям промышленности. А если попытаться собрать совокупные данные по странам, то задача оказывается еще более сложной. Данные о производстве, импорте и экспорте отдельных видов сырья до 1850 года зачастую сомнительны, бессистемны или недостаточны для обобщения высокого уровня, будь то информация по функциональным категориям для конкретных отраслей или данные по целым регионам или странам.

С 1850 по 1870 год и в Европе, и в Америке значительно улучшились методы сбора промышленной статистики: записанные данные стали гораздо более доступными и надежными; к концу столетия во многих быстро индустриализирующихся странах заработали статистические службы, собиравшие данные в весьма широком

диапазоне, благодаря чему мы теперь можем реконструировать материальные потоки отдельных секторов (сталелитейной, бумажной или текстильной промышленности), совокупные данные по основным статьям расхода материалов (с точки зрения как исходных материалов, так и конечного продукта и отходов) в США, Канаде, Японии, а также как минимум в полудюжине крупных экономик Европы. Этим странам также удалось сохранить достаточно сведений о сборе урожая сельхозкультур, заготовке леса, ловле рыбы и добыче ископаемых видов топлива. Однако никто не интересовался суммированием всех этих элементов и созданием совокупных расчетов по потокам материалов, необходимых для роста национальных экономик. Статистики, экономисты, инженеры и историки основное внимание уделяли отраслевым потокам материалов, в особенности материалам, которые вносят наибольший вклад в общий объем.

Благодаря этому мы можем проследить эволюцию добычи ископаемых видов топлива или фосфатов, изменения в лесозаготовках в течение XX века и даже реконструировать подробные сведения о потоках материалов в отдельных отраслях промышленности отдельных стран. Новый подход к изучению расхода материалов в современных обществах зародился благодаря озабоченности по поводу все большего загрязнения окружающей среды, а также благодаря критике экономических ученых, склонных игнорировать такие вопросы. Роберт Эйрс и его соавторы (Auges и соавт., 1969, с. 283–84), описывая ситуацию в ясных физических терминах, отмечают, что такие опущения «могут привести к тому, что процессы производства и потребления будут рассматриваться образом, противоречащим фундаментальному закону сохранения массы», а также указывают на очевидные последствия для окружающей среды, а именно, на то, что в отсутствие торговли и чистого накопления запасов «количество остаточных материалов, попадающих в окружающую среду, должно быть примерно равно массе основных видов топлива, продовольствия и сырья, попадающего в обрабатывающую и производственную систему плюс масса кислорода из атмосферы».

Однако прошло почти два десятилетия, прежде чем из этого тезиса выросло первое достаточно полное и тщательное исследование расходов материалов на уровне государства: лишь в конце 1990-х несколько исследовательских групп приступили к реконструкции прямых материальных затрат (ПМЗ, DMI¹⁸), выходных материальных потоков, а также общих материальных затрат (ОМЗ, TMR¹⁹) ведущих экономик мира. Фишер-Ковальски и соавторы (Fischer-Kowalski и соавт., 2011) вкратце описали историю деятельности по сбору такой статистики, а также методологические основания таких исследований (системные границы, разделы, запасы), основные показатели движения материалов, достоверность имеющихся сведений и наличие погрешности в наборах данных. Я подробнее остановлюсь на обзоре таких отчетов по материальным потокам, вначале проведя их общий анализ, а затем рассмотрев результаты исследований на мировом и национальном уровне, задача которых заключалась в отслеживании затрат материалов (в том числе вместе с результатами

¹⁸ Прямые материальные затраты (direct materials input) – все материалы, имеющие экономическую ценность и используемые в производстве или потреблении, за исключением воды. – *Прим. пер.*

¹⁹ Общие материальные затраты (total materials requirements) включают наряду с DMI скрытые потоки, связанные с добычей материалов на территории страны. – *Прим. пер.*

производственной деятельности) в крупнейшей мировой экономике, в европейских странах и Китае (что неизбежно ввиду его существенного экономического роста за последние годы).

Материальные потоки можно исследовать и при помощи других подходов; один из них заключается в попытке проследить жизненный цикл отдельных сырьевых товаров на национальном, региональном или глобальном уровне; другой — в анализе энергозатрат на производство сырьевых товаров и конечных изделий; еще один — в изучении того, как производство, использование и утилизация (или переработка) товаров влияет на окружающую среду. Оценка жизненного цикла (ОЖЦ, англ. Life-cycle assessments, LCA) выполнялась в различных масштабах в отношении многих элементов и соединений; например, Эйрс (Ayres, 2008) оценивал жизненный цикл хлора, а Еврокомиссия — поливинилхлорида (ПВХ) (EU, 2004); ОЖЦ проводилась в отношении изделий от алюминиевых банок (Mitsubishi, 2005) до стальных колес грузовых автомобилей (Alcoa, 2012). Неудивительно, что основное внимание уделялось наиболее распространенным металлам в целом и железу, и стали в частности. Благодаря своей глубине и сложности некоторые из таких аналитических исследований гораздо более показательны и значительно куда более информативны, чем стандартное отслеживание ежегодных потоков производства, торговли и потребления.

Сходным образом всеобъемлющая оценка воздействия на окружающую среду добычи, обработки, использования и утилизации конкретного сырьевого товара или каких-либо произведенных изделий может быть гораздо более важной, чем простое отслеживание движения таких материалов в национальной или мировой экономике. В то время как с конкретными материалами или группами сырьевых товаров могут быть связаны многочисленные проблемы, наиболее важной из них и действительно повсеместной является углеродная нагрузка, а точнее — выбросы парниковых газов (ПГ), связанные с потреблением таких материалов. Основная доля таких выбросов приходится на CO_2 , несколько меньшая — CH_4 и N_2O ; остальные ПГ значимы только в отношении отдельных материалов.

4.1 Ведение отчетности по материальным потокам

Исследование ОМЗ может базироваться на иерархии шкал, начиная со сбора статистики по конкретному производственному процессу, постепенного перехода по данным, касающимся всего сектора промышленности и заканчивая совокупными материальными потоками государства, континента или всего мира. Даже поверхностного размышления о проблемах, связанных с подготовкой обобщенных данных по таким потокам, а также о практической ценности таких совокупных измерений, достаточно, чтобы обнаружить их двойственный характер: они, с одной стороны, полезны и показательны, особенно когда речь идет о приобретательской деятельности человека, ее количественной оценке и влиянии на окружающую среду; а с другой стороны, они нерепрезентативны и обманчивы, в особенности ввиду того, что носят преимущественно количественный характер и не содержат оценки фундаментальных качественных различий.

Наиболее полезными представляются четыре вида отчетности: подробный анализ на уровне отдельного государства, который может быть сопоставлен с данными о группе экономически равных ему стран или с государствами, находящимися на разных стадиях модернизации; долгосрочная историческая перспектива, демонстрирующая эффект технических инноваций, повышение эффективности производств, улучшений качества управления, а также изменения рыночной ситуации; анализ, комбинирующий оба предыдущих подхода и позволяющий сравнить долгосрочные тенденции в разных странах; и общемировая статистика по ОМЗ, а также результирующим выбросам в окружающую среду. Такой анализ хорошо демонстрирует масштаб человеческой деятельности по добыче и производству на цивилизационной шкале и дает нам понять, каким бременем является наша деятельность для биосферы и ее конечной (и все еще плохо изученной) способности справляться с изменениями в атмосфере, воде и экосистемах.

Я бы даже сказал, что основной проблемой в подготовке обобщенных результатов материальных потоков на уровне целого мира и отдельных государств является не присущая таким отчетам неоднородность и запутанность, а скорее определение границ системы. Эту проблему хорошо видно, если взглянуть на то, какие категории выбрали для своего анализа первые исследователи, занимавшиеся составлением материальных балансов на национальном уровне. Впервые подобной работой занялись в конце 1990-х гг., и с 1997 по 2001 год такой анализ ограничивался составлением отчетов за короткий период по всего нескольким богатым странам (Adriaanse и соавт., 1997; Matthews и соавт., 2000; Bringezu и Schütz, 2001); оценки за долгий период были представлены для США (Matos и Wagner, 1998), а первая предпринятая статистической службой попытка вести ежегодный сбор сведений по ПМЗ и выходным материальным потокам, а также ОМЗ (ПМЗ + скрытые потоки и добытые материалы, не идущие на дальнейшую обработку), охватила только европейские страны (European Commission, 2001).

Есть сложности со всеми этими показателями. Если ограничивать отчетность только ПМЗ, будет существенно недооценен совокупный спрос на ресурсы в современных экономиках, участвующих в масштабной международной торговле, особенно в таких державах, как США, Германия или Япония, полагающихся на импорт значительной доли многих материалов. Внесение корректировок путем включения чистого импорта всего сырья решит проблему лишь частично, при этом такое решение будет все более и более недостаточным, так как многие металлы и минералы импортируются не в виде руд, концентратов или сыпучих грузов, а в форме готовых изделий. Определить удельное содержание материалов в таких изделиях (даже ограниченный их перечень будет включать многие сотни разновидностей машин, инструментов, деталей и потребительских товаров) — задача сама по себе непростая, но корректировки на этом не заканчиваются, так как многие изделия, импортируемые из одной страны, содержат компоненты, изготовленные из различных материалов в целом ряде других стран, которые в свою очередь импортировали эти материалы из третьих.

Прекрасной иллюстрацией подобной — в наше время действительно глобальной — проблемы сбора данных является одно весьма популярное изделие потребительской электроники. Если разобрать iPhone 5 компании Apple, то видно, что

производителями его основных компонентов являются почти 20 компаний, расположенных в США, Японии, Южной Корее и Нидерландах, при этом их производственные мощности разбросаны по доброму десятку стран на трех континентах. Например, интерфейс для дисплея этого смартфона изготавливается NXP Semiconductors — основанной Phillips голландской компанией со штаб-квартирой в Эйнховене; ее производственные мощности располагаются в Китае, Германии, Малайзии, Нидерландах, Филиппинах, Сингапуре, Таиланде и Великобритании; в производстве используются сырьевые материалы, добываемые в более чем полудюжине разных странах мира.

Я уже представил серии отчетов по основным материальным потокам, публикуемых Евростатом (Eurostat, 2013) и Геологической службой США (USGS, 2013). Начиная с 2004 года Евростат собирает сведения по всем 27 странам-членам ЕС, а также по Норвегии, Швейцарии, Черногории, Хорватии, Македонии и Турции; работа ведется в соответствии с подробными методологическими руководствами по составлению отчетов о материальных и энергетических потоках в масштабах экономики (ОМП-Э или просто ОМП). Геологическая служба США публикует краткие периодические отчеты о движении материалов (Matos и Wagner, 1998; Matos, 2009; Kelly и Matos, 2013); в ее издании «Ежегодник о минералах» (англ. *Minerals Yearbook*) представлены последние данные о производстве, купле-продаже и расходе более чем 80 ископаемых и материалов в США и на общемировом уровне. Научно-исследовательский институт «Устойчивая Европа» (англ. Sustainable Europe Research Institute) в сотрудничестве с Вуппертальским институтом исследований климата, окружающей среды и энергетики в дополнение к существующим базам данных по материальным потокам создал онлайн-базу, в которой представлены сведения по 12 категориями и более чем 200 странам за период с 1980 года; база также позволяет отследить расход на душу населения, материалоемкость, материалопроизводительность, резервы невозобновляемых ресурсов, а также прогнозы по мировой добыче ресурсов (SERI, 2013).

Также имеется пять глобальных данных по материальным потокам, где представлены сведения по 173–203 странам, при этом они различаются границами анализа: так, два из этих отчетов ограничиваются внутренней добычей (Schandl и Eisenmenger, 2006; Giljum и соавт., 2008); еще два также включают импортно-экспортные показатели почти 180 стран, но только за 1 год (Krausmann и соавт., 2008; Steinberger и соавт., 2010); а в одном из отчетов представлена совокупная общемировая статистика за период с 1900 по 2005 год. (Krausmann и соавт., 2009). К ОМП национального уровня относятся исследования Вайса и соавт. (Weisz и соавт., 2006) — ЕС-15 за 1970–2001 гг.; Шандля и соавт. (Schandl и соавт., 2008) — Австралия за 1970–2005 гг.; Вуда и соавт. (Wood и соавт., 2009) за 1975–2005 гг.; Сингха и соавт. (Singh и соавт., 2012) — Индия за 1961–2008 гг.; Краусманна и соавт. (Krausmann и соавт., 2011) — Япония за 1878–2005 гг.; Шандля и Шульца (Schandl и Schulz, 2002) — Великобритания за 1850–1997 гг.; Кованды и Хака (Kovanda и Hak, 2011) — Чехословакия с 1855 по 2007 год.

В базу данных SERI, а также в охват всех процитированных ранее глобальных исследований вошли данные по биомассе, полученные из статистики ФАО (Food and Agriculture Organization), а также затраты минералов (в основном по данным Ге-

ологической службы США) и энергии из ископаемых источников (из отчетов МЭА). Я также должен отметить, что глобальная интернет-база данных, а также большая часть исследований материальных потоков на мировом и национальном уровнях были подготовлены небольшой группой австрийских и немецких исследователей, при этом такие исследования преимущественно публиковались всего в двух источниках — «Журнале промышленной экологии» (англ. *Journal of Industrial Ecology*) и «Экологической экономике» (англ. *Ecological Economics*). Отчеты о материальных потоках затрагивают универсальный физический фундамент, на котором зиждется всякое общество, однако в основном являются плодами труда всего нескольких человек, большинство из которых связано с Институтом социальной экологии, Вена.

В заключение хотелось бы подвергнуть сомнению полезность этих всеохватывающих отчетов по материальным потокам мира или отдельных государств — этих совокупных данных по кислороду, биомассе, всем видам топлива, минералов, всем скрытым и рассеиваемым потокам, где критически важная качественная разница и не менее важные различия экологических последствий теряются в неизбирательных совокупных данных, в которых основная доля приходится на кислород и скрытые потоки материалов. Почему? Потому что я не уверен, какие еще значимые выводы можно сделать из этих сумм разрозненных категорий расхода материалов и результатов производства, помимо очевидного подтверждения значительной разницы между совокупными показателями и их долгосрочным ростом в разных странах. Конечно, максималистские всеобъемлющие совокупные данные весьма любопытны и несомненно имеют эвристическое значение; они также хорошо передают воистину огромные масштабы мирового движения сырьевых материалов.

В шести исследованиях мировой добычи материалов, проведенных в начале XXI века и охвативших всю биомассу, все ископаемые виды топлива, все руды и нерудные полезные ископаемые, а также сыпучие строительные материалы (но не охватившие скрытые потоки, воду и кислород), называется примерно одна и та же совокупная цифра — около 50 миллиардов тонн в год. Это и неудивительно, ведь авторы всех этих исследований полагались на данные из одних и тех же источников: статистику по биомассе в сельском и лесном хозяйстве от Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, отчеты Геологической службы США, национальные статистические данные по рудам и нерудным ископаемым, данные Международного энергетического агентства, а также базы данных ООН по ископаемым источникам энергии. Наименьшее названное совокупное значение за 2000 год равняется 48,8 миллиарда тонн (Schandl и Eisenmenger, 2006), наибольшее — 58,7 миллиарда тонн (Krausmann и соавт., 2008); год спустя Краусманн и соавт. (Krausmann и соавт., 2009), опубликовав свои подсчеты совокупной массы материальных потоков за 1900, 1925, 1950, 1975 и 2005 гг., назвали для последнего из охваченных лет цифру 59,5 миллиарда тонн. В прочих публикациях цифра за 2000 год варьируется от 48,5 миллиарда тонн (Steinberger и соавт., 2010) до примерно 53 миллиардов тонн (Behrens и соавт., 2007).

Если игнорировать статистический выброс, то среднее значение пяти оценок за 2000 год практически точно соответствует 50 миллиардам тонн в год, при этом примерно 18 миллиардов тонн приходится на биомассу, 10 миллиардов тонн — на ископаемые виды топлива, почти 5 миллиардов тонн — на руды и прочие минералы,

более 17 миллиардов тонн — на сыпучие строительные материалы. При подсчете *sensu stricto* мировые материальные потоки в 2000 году (ограниченные прямыми затратами сырьевых материалов и без учета продовольствия, корма, энергии и скрытых потоков) составляли порядка 25 миллиардов тонн: около 22 миллиардов тонн минералов и 3 миллиардов тонн древесины и прочих биоматериалов. Оценку в соответствии с перечнем Геологической службы США следует увеличить примерно на 500 миллионов тонн, чтобы учесть невозобновляемую органику, потраченную на нужды помимо выработки энергии (основная часть такой органики приходится на лигроин, метановое сырье и битум для покрытия дорог). Но если учесть все погрешности в оценках массы сыпучих строительных материалов (прежде всего — добываемого песка и гравия), на которую приходится как минимум две трети всех материальных потоков, то масса в 0,5 миллиарда тонн находится в пределах минимального диапазона ошибки оценки (± 2 миллиарда тонн); поэтому я предпочту считать, что совокупные прямые расходы материалов в мире составили в 2000 году примерно 25 миллиардов тонн.

На душу населения, таким образом, было израсходовано всего чуть больше 4 тонн (общая мировая численность населения в 2000 году составляла 6,08 млрд человек), при этом как минимум 2,5 тонны (возможно, что и 3 тонны) пришлось на сыпучие строительные материалы и только 0,8 тонны — на металлы и нерудные полезные ископаемые. При этом на каждого жителя Земли в том же году было добыто или собрано около 1 тонны пищевых и кормовых культур (по весу сырой биомассы), почти 0,5 тонны древесины (исключая дрова), порядка 1,7 тонны ископаемого топлива (примерно 0,8 тонны угля, 0,6 тонны сырой нефти, 0,3 тонны природного газа). Затраты сырья в общемировой экономике, а значит, и возможный объем готовой продукции в течение первого десятилетия XXI века резко возросли в абсолютном выражении. Расход сырья увеличился не так существенно в богатых странах - с одной стороны потому, что материалоемкая инфраструктура в них уже была создана к тому времени, с другой — потому, что материалоемкое (и зачастую загрязняющее) производство постепенно переносили в другие страны, чтобы снизить расходы; и, тем не менее, совокупные величины затрачиваемого сырья все еще значительны.

Так, в Европейском Союзе совокупный расход сырья за семь лет с 2000 по 2007 год вырос на 8% (Eurostat, 2013). В США общий расход материалов (даже за вычетом строительных материалов) вырос за два десятилетия с 1986 по 2006 год почти на 34%; при пересчете на душу населения рост составляет менее 0,5%/год. Таким образом, этой стране требуется больший (при расчете на душу населения) приток сырьевой фитомассы, металлов, минералов и ископаемой органики, так как США производят больше промышленных товаров, чем когда-либо в своей истории: дематериализацию можно продемонстрировать только с растущими показателями ВВП в знаменателе. Такая дематериализация, очевидно, полезна, но она не может предотвратить дальнейшего роста общих материальных затрат ни в одной из быстро развивающихся экономик.

Все это интересно, и если бы у нас имелись достоверные исторические сведения, то мы могли бы проследить рост общемировых расходов материалов по каждой из этих основных категорий. Однако имеющиеся совокупные мировые показатели за любой период до 1950 года сомнительны, и даже данные за последние годы сильно

зависят от границ анализа. Например, Краусманн и соавторы (Krausmann и соавт., 2009) оценивают мировую добычу биомассы (культур, пожнивных остатков, грубых пищевых волокон и древесины) за 2005 год в 19,061 Гт, а вот я в своих расчетах по сбору фитомассы (Smil, 2013) указывал на то, что добыча одной только древесной фитомассы в 2000 году могла составить от 2 до 13,4 Гт в зависимости от выбранных границ анализа.

Поэтому не может быть единого точного совокупного показателя материальных потоков, так как расчеты общемировых показателей всегда зависят от допущений, и даже если согласовать границы анализа для всех исследований, то основные результаты будут во многом оценочны. Физические реалии указывают на то, что масса песка и гравия, израсходованного на строительство и поддержание современной инфраструктуры на основе бетона, значительно превосходит массу металлических руд; что масса железа — металла с исключительными свойствами, добываемого без особых энергозатрат из руды, которой на Земле предостаточно — значительно превосходит массу титана, еще более примечательного металла, который приходится добывать из относительно редких руд, затрачивая при этом огромное количество энергии. В то же время нужно иметь в виду, что данные по недорогим и легкодоступным сыпучим строительным материалам (в особенности по песку и гравиям), которые чаще всего продаются рядом с местом их добычи, зачастую менее достоверны, чем статистика по металлическим рудам и промышленным нерудным ископаемым, торговля которыми идет на международном уровне.

Экономические реалии указывают на то, что распространение последовательных изменений в жизни человека — урбанизация, индустриализация, появление постиндустриальных обществ с высокой потребительской активностью — способствует наращиванию масштабов материалопользования, а также все большему увеличению расходов материалов. Хотя конечные результаты должны быть вполне ожидаемы, некоторые контрасты по-прежнему поражают: так, современный мир за один год расходует почти столько же стали, сколько было использовано человечеством за первое десятилетие после Второй мировой войны; еще более удивительно то, что ежегодный расход цемента превышает количество, потраченное за первую половину XX века. В то же время, все эти увлекательные, но чрезмерно агрегированные глобальные отчеты, где собраны количественные оценки, но игнорируются качественные, вряд ли будут полезны для принятия решений в будущем (за исключением очевидного вывода, что наблюдавшийся в последние годы рост не сможет продолжаться много десятилетий).

Полезную информацию можно получить, сосредоточившись на двух аспектах: внимательно изучить потоки материалов на уровне отдельных государств, а также сузить границы анализа в отношении множества изучаемых материалов и отслеживать потоки отдельных сырьевых товаров, держа при этом в уме несколько конкретных целей. Сделать это можно путем детального рассмотрения того, как эти материалы используются, распространяются и сохраняются в обществе, а также проанализировав жизненный цикл материалов, циркуляция которых происходит в течение жизни человека. Необходимо количественно оценить прямые и косвенные энергозатраты, связанные с такими материалами, или определить и оценить воздействие их производства и использования на окружающую среду.

4.2 Материальные потоки США

Очевидно, что крупнейшая экономика мира является кандидатом № 1 на тщательный анализ материальных потоков; к счастью, задача по сбору основных данных упрощается за счет доступности и высокой точности производственной, торговой и потребительской статистики в этой стране. Однако даже эту простую задачу выполнять необязательно, за что стоит поблагодарить исследователей Геологической службы США, собравших воедино основные сведения по более чем 100 отдельным потокам материалов, разложивших их по четко определенным категориям; более того, их работа проведена так, чтобы обеспечить сравнимость и сопоставимость таких сведений, представленных в разных документах и за разные периоды — сначала с 1900 по 1995 год (Matos и Wagner, 1998), затем по 2006 год (Matos, 2009) (Kelly and Matos, 2013), а также в серии регулярно обновляемых исторических отчетов, где собрана статистика за последние годы с категориальной разбивкой.

Как уже объяснялось ранее, данные Геологической службы США содержат информацию по металлам и минералам (разделенную на две категории: первичные и переработанные металлы, промышленные и строительные металлы) и невозобновляемой органике (асфальт, воски, масла и смазки, а также ископаемые виды топлива, используемые в качестве сырья), израсходованным на промышленное производство в США. При этом они не включают пищевые продукты и основную массу ископаемого топлива, используемого в качестве источников энергии (поскольку большая доля этих материалов расходуется потребителями напрямую), но включают всю фитомассу, используемую в производстве (от хлопка до шерсти и от древесины до новой и переработанной бумаги). В анализе столетнего периода прослеживается спрос на материалы с пиковых значений, наблюдавшихся в первой фазе промышленной революции (в немалой степени начавшейся благодаря использованию угля и паровых двигателей и характеризовавшейся растущим, но все еще ограниченным массовым потреблением), затем все еще растущий, но уже стабилизировавшийся спрос во второй фазе (основными движущими силами которой стали продукты нефтепереработки и природный газ, а доминирующими источниками тяги — паровые турбогенераторы, двигатели внутреннего сгорания, газовые турбины; отмечается беспрецедентный рост массового потребления) до возникновения и развития экономики, основанной на сфере услуг, после 50-х гг. XX века.

Такой анализ позволяет провести несколько важных обобщений, которые, несомненно, будут действительны и для других крупных и богатых стран: абсолютные расходы материалов любой категории возросли; биоматериалы стали менее важными; основная доля общей массы приходится на сыпучие строительные материалы; возрос спрос на металлы; переработка стала значительно более важной; стали использоваться (при чем во все больших и больших объемах) невозобновляемые органические ресурсы; при пересчете на душу населения отмечаются изменения в использовании и расходе отдельных материалов (колебания при стагнации, постепенный рост или продолжительное снижение). В течение XX века население США увеличилось за счет естественного прироста и постоянной иммиграции почти в 4 раза (в 3,7 раз), ВВП страны (с поправкой на инфляцию) — в 26,5 раз; неудивительно, что эти два фактора привели к росту абсолютных показателей потребления

и расхода во всех категориях материалов; множитель роста варьируется от 1,7 (материалы сельскохозяйственного производства) до 90 (невозобновляемая органика), равняется 8 для первичных (непереработанных) металлов, 34 для нерудных полезных ископаемых и 47 для строительных материалов. Доля возобновляемых материалов — древесины, волокон, кожи — в общей массе упала с 47% (если включать сыпучие строительные материалы в такую массу) или 74% (если исключить из такой массы камень, песок и гравий) в 1900 году до примерно 5% (22%) в 2000; такую тенденцию нельзя назвать неожиданной, ведь человечество все больше полагается на легкие металлы и пластмассы. Совокупный спрос на древесину за то же столетие вырос менее чем в 1,4 раза, однако расход первично изготовленной бумаги и картона увеличился примерно в 19 раз, к чему следует добавить также постоянно растущие количества переработанной бумаги: когда в 1960 году начали собирать данные по этой категории, переработанная бумага составляла всего 24% всей используемой бумаги и картона, но к 2000 году эта доля возросла до 46% при том, что макулатура в больших количествах идет на экспорт (в 2000 году 22% всей собранной в стране макулатуры отправилось за рубеж), в основном в Китай (FAO, 2013).

То, что сыпучие строительные материалы (щебень, песок, гравий) в течение XX века составляли все большую долю ежегодных материальных потоков Америки (с 38% всех материалов в 1900 году до 77% в 2006), вовсе не удивительно, так как после Второй мировой войны значительно увеличились масштабы работ по строительству материалоемкой транспортной инфраструктуры. В 1956 году началось создание системы федеральных автомагистралей, в рамках которой было построено множество новых мостов (USDOT, 2012), а появление гражданских реактивных самолетов привело к быстрому расширению сети аэропортов — процесс, который не так давно повторился в Китае. Огромный спрос на сыпучие строительные материалы был также обусловлен строительством новых грузовых портов, попытками управлять течением рек (в основном в бассейне Миссисипи), выработкой электроэнергии (возведением плотин гидроэлектростанций, а также строительством атомных электростанций), массовым строительством новых фабрик, коммерческой недвижимости (складов, торговых центров) и жилья.

Масса строительных материалов, используемых в США, увеличилась в семь раз с 1900 по 1940 год, удвоилась с 1945 по 1951 год, затем еще раз удвоилась к 1959 году и составила 1,1 миллиарда тонн, однако следующего удвоения — до 2,26 миллиарда тонн — удалось достичь только к 1997 году. Использование этих материалов значительно снижается в периоды экономического кризиса: так, во время Великой депрессии с 1929 по 1933 год отмечается спад спроса на 50%; с 1979 по 1982 год общий спрос снизился на треть, а в течение недавнего кризиса 2007–2010 гг. расход песка и гравия в США упал на 44%, спрос на щебень — на 29% (Matos, 2009).

Из сведений о конечном использовании видно, что крупнейшей определяемой категорией расхода песка и гравия (на которую пришлось пятая доля общей массы, превысившей 1 миллиард тонн в год) является использование этих материалов в качестве заполнителя, смешиваемого с цементом в производстве бетона; затем идет производство дорожного полотна и покрытия, наполнителей, а также применение песка и гравия в качестве добавки к асфальтным и битумным смесям; однако основную категорию, на которую приходится четверть общей массы, составляет расход

материала на неустановленные цели. Применение щебня в качестве заполнителя в производстве бетона является самой значимой категорией его конечного использования; щебень также незаменим как компонент железнодорожного балласта. Глубина балласта составляет от 15 до 50 см (на высокоскоростных ветках), общая ширина — примерно 4,5 м; то есть на километр путей уходит более 1000 м³ щебня или примерно 3000 тонн при плотности 2,6 т/м³. Блочный камень, как тесаный, так и нет, используется в строительстве для облицовки, укладки бордюров, мощения, а также возведения памятников. Он составляет лишь небольшую категорию, и порядка четырех пятых массы добытого камня даже не вывозится из карьеров (редкий пример скрытого потока, количественная оценка которого дана в отчетах Геологической службы).

По сравнению со строительным песком, объем песка, используемого в промышленности, относительно невелики, но с качественной точки зрения он очень важен. Годовой расход в последние годы колебался вокруг цифры 25 миллионов тонн: 40% от этой массы составляет чистый кремнезем, используемый в стекольной промышленности, порядка одной пятой расходуют в литейных цехах для изготовления литейных форм и огнеупорных материалов, а также в виде карбида кремния в качестве флюса и при выплавке материалов. Меньшую, но функционально незаменимую долю составляют абразивы, используемые для шлифовки и пескоструйной обработки, и песок, применяемый при фильтрации воды, а также для создания искусственных пляжей и спортивных площадок. Новый и быстро растущий рынок представлен специальными видами песка, используемыми в гидравлическом фрекинге газо- и нефтеносных сланцев, а также при цементировании скважин. К другим материалам, включенным Геологической службой в разнородную группу нерудных полезных ископаемых, относятся элементы (углерод в виде графита и алмазов, бор, бром, гафний, гелий, литий, азот, сера, стронций и цирконий), а также как распространенные (фосфаты, калийные соединения, поваренная соль) и относительно редкие (драгоценные камни, промышленный гранат, кварц) соединения.

С точки зрения массы эта группа материалов занимает второе место: в последние годы в США их используется примерно в 2,5 раза больше, чем всех металлов, как первичных, так и переработанных. Совокупная масса израсходованных материалов этой категории составляла всего 10 миллионов тонн в 1900 году, увеличилась до 150 миллионов тонн в 1950 году, превысила 300 миллионов тонн в 1972-м, затем, после двух десятилетий стагнации, увеличилась до 370 и 390 миллионов тонн в 2000 и 2010 гг. соответственно. Крупнейшими составляющими данной группы являются соль (порядка 55 миллионов тонн в 2010 году), рудные фосфаты (примерно 30 миллионов тонн), азот (около 14 миллионов тонн) и сера (приблизительно 11 миллионов тонн). Америка выделяется на фоне всего мира расходами солей (20% от общемировых расходов в 2010 году). Основными статьями (на каждую из которых в том же году пришлось примерно по 18 миллионов тонн) являются производство щелочных соединений и хлора, а также обработка дорог, препятствующая их обледенению. В пищевой и кормовой промышленности соли используется на порядок меньше (примерно по 1,8 миллиона тонн); более 1 миллиона тонн в год уходит на обработку воды (смягчение и деионизация).

Рост расхода металлов и изменение долей отдельных элементов и сплавов в этой широкой категории материалов отличаются предсказуемостью. В 1900 году первич-

ных металлов было израсходовано 10,3 миллиона тонн, за шесть последующих лет эта цифра удвоилась, к 1929 году удвоилась еще раз и составила уже 42 миллиона тонн, а вот Великая депрессия привела к значительному снижению спроса — до 11,3 миллиона тонн в 1932 году. Рекорд, поставленный до начала кризиса, удалось побить в 1940 году, и до 1944 года ежегодный расход составлял порядка 59 миллионов тонн; несколько лет наблюдались колебания и спад, и только к 1963 году удалось достичь цифры 60 миллионов тонн. К тому времени доля переработанных материалов в общей поставляемой массе (примерно 87 миллионов тонн) составляла всего 1/3; к 2000 году — уже 44% (от 144 миллионов тонн общего расхода металлов).

В то время как в переработке металлов в целом отмечались тенденции роста (хотя и со значительными спадами в периоды экономической рецессии), внутреннее потребление первичных металлов колебалось в конце 60-х и начале 70-х гг., а в течение последующих 30 лет в целом снижалось, что, как считается, было обусловлено первой волной деиндустриализации Америки, то есть потери ее мирового лидерства в черной металлургии и спада производства цветных металлов. Производство стали достигло своего пика в 1979 году, составив 91,9 миллиона тонн; десять лет спустя оно снизилось на 52% по сравнению с этим показателем, к концу столетия незначительно возросло и составило 47,9 миллиона тонн. Наибольших показателей внутреннего производства металлов достигло в 1969 (цинк), 1972 (медь и никель) и 1973 (свинец) гг.; только меди удалось превысить пиковые значения тех времен: в течение 8 лет с 1992 года меди ежегодно производилось больше, чем в 1972 году, но затем ее производство снова снизилось. В результате в 1979 году внутреннее потребление металлов было ниже почти на 60%, а пиковые показатели 1968 года (78,2 миллиона тонн) удалось превзойти только в 1998 году.

Если же говорить о доле отдельных металлов в этой разнообразной категории, то в течение первой половины XX века господствовала сталь (92% общей массы как в 1900, так и в 1950 г.); к 2000 году ее доля снизилась до примерно 83%. Вторым по массе идет алюминий, его в США было израсходовано менее 900 тысяч тонн в 1950 году и более 7 миллионов тонн в 1999; рост был в основном обеспечен авиастроительной отраслью, а также повсеместным внедрением алюминия и его сплавов в автомобилестроении и производстве многих потребительских товаров, от кухонной утвари до компьютеров. Затем внутренний расход этого металла снизился до 3,5 миллиона тонн к 2010 году, однако за этой тенденцией скрывается сложное сочетание изменений в методах производства, а также в международной торговле. В 2010 году выпуск первичного алюминия составил всего 1,7 миллиона тонн, а вот вторичного (переработанного) алюминия было произведено уже 2,8 миллиона тонн, из них 1,25 миллиона тонн было получено из старого лома, 1,55 миллиона тонн — из нового; импортировано было 3,6 миллиона тонн, экспортировано немногим меньше (3 миллиона тонн); запасы металла достигли 3,2 миллиона тонн, видимый внутренний расход — 3,46 миллиона тонн. Геологическая служба (USGS, 2005) также подсчитала совокупную массу алюминия в строениях и изделиях: в 2002 году она достигла 142 миллионов тонн (для сравнения, аналогичный показатель меди составил 117 миллионов тонн, стали — 4,13 миллиарда тонн).

Схожие значительные сдвиги наблюдались и у меди: в 2010 году внутреннее производство было почти в два раза ниже, чем в конце 90-х, видимый расход составил

всего 1,74 миллиона тонн (3,1 миллиона тонн в 1999 году). Из прочих металлов ежегодный расход только двух за последние годы превысил 1 миллион тонн: в 2000 году цинка было израсходовано 1,3 миллиона тонн, свинца — 1,4 миллиона тонн. Марганец, в основном идущий на легирование стали, относился к той же группе, пока американская металлургическая отрасль была «впереди планеты всей» (расход составил 1,35 миллиона тонн в 1974 году). Со спадом производства специальных сталей в Америке снизился и спрос на марганец: в 2010 году он не составил даже 800 тысяч тонн, при этом был полностью импортным (внутреннее производство, никогда не отличавшееся большим размахом, полностью прекратилось в 1990 году). А вот потребление молибдена, десятилетиями до конца 20 века колебавшееся в районе 15-25 тысяч тонн, после 2005 года начало бить все рекорды и достигло 46 400 тонн в 2010 году; это единственный металл, показавший такую тенденцию роста. Он также используется в качестве компонента некоторых сталей (применяется для закалки, также обеспечивает лучшую термостойкость); другим важным рынком молибдена является производство катализаторов. Лидирует в производстве молибдена Китай, на втором месте идут США, которые также выделяются значительным нетто-экспортом этого металла.

Прежде чем перейти к последней категории материалов, включенной в отчеты Геологической службы США, я повторюсь, что фактическое внутреннее потребление почти всех металлов в США выше (порой значительно), чем указывается в них, потому что существенная их доля попадает в страну не в виде импортируемого сырья (включенного в совокупные данные внутренних расходов), а в виде импортных изделий, и вот эта доля не входит в статистику видимого внутреннего потребления. К основным компонентам таких неподотчетных потоков относятся не только сталь и алюминий в автомобилях, самолетах, механизмах и приборах, но и высокотоксичные тяжелые металлы, такие как свинец в автомобильных свинцово-кислотных ($\text{PbSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$) аккумуляторах и кадмий в перезаряжаемых никель-кадмиевых батареях.

В 1900 году общий расход невозобновляемой органики (в основном шедшей на дорожное покрытие и смазочные масла) не превышал 2 миллионов тонн, но последующее расширение сети асфальтированных дорог, массовое распространение автомобилей подъем автотранспортной отрасли и, что самое важное, быстрое распространение синтетических материалов на основе сырой нефти и природного газа обеспечили данной категории самый быстрый прирост в США: к 1950 году общий поток превысил 30 миллионов тонн, к 1999 году достиг 150 миллионов тонн, при этом почти две трети приходится на углеводородное сырье (лигроин и природный газ), используемое в производстве аммиака — исходного компонента всех синтетических азотных удобрений. Второй статьей затрат (по массе) являются асфальт и жидкий битум; расход этих материалов на покрытие дорог, составлял 10 тысяч тонн в 1900 году (за пределами городов асфальтированных дорог было совсем немного), но за два десятилетия увеличился более чем в 100 раз, превысил 10 миллионов тонн к 1950 году и до кризиса 2008 года составлял порядка 30 миллионов тонн в год. Еще двумя крупными классами органики являются смазочные материалы и воски.

Я рассмотрю американские показатели материалоемкости — то есть количества материалов на единицу экономического продукта — и долгосрочные тенденции из-

менения таких показателей в следующей главе, посвященной явной дематериализации современных экономик, но прежде, чем завершить этот раздел, хочу вкратце отметить некоторые интересные цифры расхода материалов на душу населения. В совокупности, если судить по данным Геологической службы, внутри США на душу населения тратилось 1,9 тонны материалов в 1900 году, 5,6 т в 1950-м, 12 тонн в 2000; если вычесть сыпучие строительные материалы, то получится 1,2, 2,3 и 3 тонны на душу населения в год соответственно, то есть расход строительных материалов возрос с примерно 0,7 т в 1900 году до 3,3 тонны в 1950 и 9 тонн в 2000. Древесина является единственным материалом, подушный расход которого в течение столетия постоянно снижался (с 800 кг в 1900 году до 400 в 1950 и примерно 300 в 2000-м). Показатель материалов сельскохозяйственного производства несколько увеличился (с 40 до 47 кг на душу населения в первой половине XX века), но затем снизился до 18 кг; следует, однако, отметить, что хлопок и шерсть, из которых сшита готовая импортная одежда (в США сейчас преимущественно носят именно импортную одежду), не входят в данный показатель. Расход бумаги возрос с 35 до примерно 175 кг на душу населения с 1900 по 1950 год, а затем стабилизировался (показатель за 2000 год составил 179 кг на душу населения). Аналогичные тенденции отмечаются в расходе всех металлов: рост со 135 кг в 1900 году до 515 кг в 1950 и практически без изменений в 2000-м (510 кг); однако эти данные не вполне показательны, так как после 70-х гг. значительно возрос нетто-импорт автомобилей, самолетов и оборудования.

Если говорить о трех ведущих металлах, то расход стали на душу населения продолжал расти с некоторыми колебаниями с 1900 года (125 кг) до 1974 года, когда была преодолена отметка 500 кг; затем снизился до 425 кг к 2000 году и составил всего 260 кг на душу населения в 2010 году. Медь достигла пика внутреннего потребления в 1972 году (10,5 кг на душу населения, ср. 2/2 кг в 1900 году); после временного спада этот показатель достиг 11 кг в 2000 году, но к 2010 году упал до 6 кг. Резкое падение в последние годы пережил и алюминий: с пика в 26 кг (1999) снизился до менее чем 11 кг (2010). Что же это: временные снижения, обусловленные экономической рецессией, или начало новой фазы потребления материалов в богатых странах?

4.3 Европейская отчетность

Хотя у некоторых европейских стран имеется превосходная историческая статистика, ни одно из их национальных исследовательских учреждений так и не опубликовало отчеты по материальным потокам с большим временным охватом, которые можно было бы сравнить с работами Геологической службы США. Вместо этого у европейцев имеется четыре разных вида отчетности: несколько долгосрочных реконструкций, выполненных группами исследователей в отношении всего нескольких экономик — Великобритании (Schandl и Schulz, 2002) и Чехии (Kovanda и Hak, 2011); набор ОМП для ЕС-15 за период 1990–2004 гг. (Weisz и соавт., 2006); отчеты Евростата по более чем 30 странам, начатые (как уже отмечалось ранее) только в 2000 году; а также новое исследование о расходах сырьевых материалов (PCM), вы-

раженных в сырьевом эквиваленте (СЭ), в ЕС-27, но только за один год — 2005-й (Schoeg и соавт., 2012).

Эти исследования значительно отличаются друг от друга, но их объединяют общие источники данных, а также максималистский подход: помимо материалов, используемых в производстве товаров и при оказании услуг, они также охватывают все продовольствие и все виды топлива. Как и во всех современных экономиках, крупнейшая категория материальных потоков в Европе представлена сыпучими строительными материалами: в ЕС-27 на душу населения расходуется 4,6 тонны ежегодно, что на порядок выше, чем расход всех металлических руд, и на 70% больше совокупного потока всех других нерудных полезных ископаемых. Страны Евросоюза сильно зависят от импорта, в особенности металлических руд, концентратов и полуфабрикатов: в 2009 году 58% всех израсходованных в ЕС материалов этой категории было импортировано (для сравнения: импорт нерудных полезных ископаемых составил всего 4% от общего расхода); при этом показатели отдельных стран различались от 4% в Швеции до 59% в Великобритании.

По сравнению с США страны ЕС-27 потребляют примерно столько же металла (0,4 и 0,5 тонны на душу населения), но гораздо меньше строительных материалов (4,6 и 10 тонн), что обусловлено гораздо более высокой плотностью населения на континенте и более компактной транспортной инфраструктурой. В некоторых из европейских отчетов страны сравниваются по признаку пространственной материалоемкости (внутренний расход материалов, ВРМ, на квадратный километр), но такой показатель весьма сомнителен, так как добыча как строительных материалов (категория, лидирующая по совокупной массе), так и металлических руд ведется в конкретных регионах и районах, значительно уступающих по своей суммарной площади регионам, где ведутся сельскохозяйственные или лесозаготовительные работы, плотность которых достоверно указывается на преобладающую «урожайную емкость». Как и следовало ожидать, у больших стран с относительно небольшой численностью населения — даже при развитой и обширной горнодобывающей промышленности — значения ВРМ на единицу площади низкие, а вот в маленьких и густонаселенных странах — наоборот. В Европе такие показатели могут различаться на порядок: 200 т/км² в 2000 году у Швеции, порядка 2600 т/км² у Бельгии и Люксембурга.

В материальные потоки ЕС включены все пищевые продукты, учитываются даже дикие ягоды, грибы и дичь. Конечно, в руководстве ЕС (Schoeg и соавт., 2012) по сбору таких данных содержатся списки десятков млекопитающих и птиц с рекомендуемыми значениями живого веса, которые следует использовать в подсчете совокупного потребления биомассы (но я не имею представления, сколько сурков, бурых медведей или короткоклювых гуменников убивают ради пропитания каждый год, и значимо ли их число на фоне общей массы имеющегося продовольствия, особенно если учесть, что невозможно подсчитать миллионы тонн урожая основных зерновых с погрешностью менее $\pm 3\%$). Что еще более важно, в отличие от этих бессмысленных описаний подсчета дичи в тех же руководствах содержатся одинаковые коэффициенты для пересчета массы руды брутто в металлическое содержимое или рудный концентрат; авторы руководств исходят из предположения (довольно нереалистичного), что все железные руды содержат 43,32% Fe, все медные руды — 1,09%

Си. В любом случае, с учетом краткости отчетов Евростата, а также того факта, что материальные потоки после 2007 года подверглись влиянию худшего экономического кризиса со времен Второй мировой войны, ценность таких отчетов заключается в том, что они позволяют сравнить национальные показатели на основе единообразных методов подсчета, а также выявить некоторые значимые особенности расхода материалов в тех или иных странах (Eurostat, 2013). На фоне прочих показателей вполне ожидаемо выделяется расход лесной фитомассы на душу населения в Финляндии (5 т/год) и Швеции (4,2 т/год), более чем вдвое превышающий среднее значение по ЕС-27 (1,9 т/год); отметим также высокий расход металлических руд в Швеции (2,9 тонны на душу населения при среднем показателе по ЕС 0,4 тонны) нерудных ископаемых в Ирландии (где добываются огромные количества торфа).

Некоторые из статистических «выбросов» могут показаться несколько неожиданными, в частности, исключительно высокий расход песка и гравия на Кипре (почти 19 т/год) и в Финляндии (почти 16 т/год при среднем значении по ЕС 4,6 тонны на душу населения), а также расход металлических руд в Болгарии (3,7 тонны на душу населения). Подушный расход строительных материалов, как правило, оказывается выше в менее густонаселенных странах, так как им приходится строить более обширную транспортную инфраструктуру. В Европе эта разница становится очевидной, если сравнивать Финляндию (песка и гравия израсходовано почти 6 тонн на душу населения в 2009 году) и Нидерланды (1,8 тонн), Швецию (9 тонн) и Великобританию (1,9 тонны).

Мне кажется, что авторы последнего исследования, в котором произведена попытка «распутать» материальные потоки части света, сильно зависящей от импорта (Schoeg и соавт., 2012), слишком много взяли на себя; кроме того, в подобном анализе приходится прибегать ко многим весьма спорным заменам и допущениям. При этом по итогам вышеупомянутого исследования не сделано никаких ошеломительных новых выводов; единственной значимой новаторской частью можно назвать представление совокупных значений в материальных эквивалентах с поправкой на валовое капиталобразование, хотя эти расчеты могут быть наименее достоверным компонентом анализа. Самый простой способ описать, каким именно образом авторы попытались измерить РСМ в масштабах экономики Евросоюза, выраженные в сырьевом эквиваленте (СЭ) по сырью, израсходованному на всех этапах цепочки производстве потребляемых товаров, заключается в цитировании их собственного объяснения:

Сначала мы разработали дезагрегированную (разбитую по отдельным статьям) расширенную таблицу затрат и результатов производства (с охватом экологических аспектов), затем применили данные о жизненном цикле импортной продукции, при этом внутреннее экономическое производство не было представлено должным образом. Наконец, капиталобразование мы рассматривали как промежуточное потребление.

Агрегированные значения РСМ в сырьевом эквиваленте, по существу, являются наиболее репрезентативным показателем движения материалов в ЕС; их подсчет, несомненно, более всеобъемлющий и потому более реалистичный, чем подход Ев-

роста к подсчету ВРМ. В показателях ВРМ учитывается внутренняя добыча сырьевых материалов, но импорт при этом замеряется по весу продукции, а вот при расчете РСМ такой асимметрии удастся избежать, так как и импорт, и экспорт замеряется в СЭ. Однако тем читателям, которым знакомы преимущества и недостатки оперирования даже достаточно дезагрегированными матрицами входных и выходных показателей (то есть затрат материалов и результатов производства), а также известно о неизбежности суммирования и упрощений при построении расчетов жизненного цикла, равно как и о многочисленных ловушках, в которые можно угодить, пытаясь конвертировать денежное выражение в массовое (что в данном случае производится на основании неопубликованных таблиц и перечней материальных затрат и результатов производства по Германии, чью экономическую структуру исследователи посчитали образцово-показательной для всего ЕС), сразу становится понятно, что такое сочетание сразу нескольких спорных подходов нельзя назвать надежным способом количественного определения последствий расхода материалов.

Не менее значимая проблема связана с решением произвести количественную оценку сырьевого эквивалента потребленных товаров производственного назначения (в исследовании и приложениях к нему описано решение данной проблемы). Хотя при переработке металлов и затраты материала, и экологические последствия снижены по сравнению с первичным металлопроизводством, на мой взгляд, допущение, что сырьевой эквивалент вторичных металлов равен нулю, не имеет никакого отношения к реальности. Я не знаю, насколько эта чрезмерно амбициозная исследовательская попытка была скомпрометирована множественными допущениями и упрощениями, необходимыми для подсчета, — назову один ключевой пример — среднемировых значений, применимых к структуре импорта руд и металлов, добыча которых в реальности разнится от месторождения к месторождению. Проверять их расширенную гибридную таблицу затрат и результатов, я так и не понял, каким образом 217 тысяч тонн соломы, 452 тысячи тонн кормовых культур для выпаса животных и 7000 тонн улова рыбы связаны с производством радиоприемников и телевизоров.

В заключение сказано то, о чем все и так всегда знали: Евросоюз практически самодостаточен в том, что касается биомассы, песка, гравия и многих других нерудных ископаемых, но сильно зависит от прямого и косвенного импорта ископаемых видов топлива и металлических руд; исследователями обнаружено, что наибольшие значения в сырьевом эквиваленте связаны с импортом сырой нефти, а среди экспортных позиций — с производством оборудования и автотранспортных средств (показатель по каждой из этих категорий составил почти 140 миллионов тонн), в чем тоже нет ничего неожиданного. Интересно, однако, то, что за вычетом топлива наибольшие показатели в сырьевом эквиваленте связаны с импортом золота и изделий из него: совокупное значение равно примерно 300 миллионам тонн, что значительно выше аналогичного показателя железных руд (менее 200 миллионов тонн), железа, стали, ферросплавов (порядка 130 миллионов тонн), а также изделий из меди (примерно 100 миллионов тонн в 2005 году).

Самые интересные результаты получены путем сравнения укрупненных агрегированных показателей с учетом и без учета внутреннего капиталобразования: ключевой вывод исследования заключается в том, что значительная часть добыва-

емых материалов, приходящаяся на счет потребления, теряется, если не включить в анализ потребленный капитал (как это обычно делается в исследованиях затрат и результатов). Сырья, вошедшего в данные по конечному потреблению в ЕС за 2005 год, было израсходовано порядка 4,7 миллиарда тонн, при этом почти 60% пришлось на материалы в составе товаров и изделий (если вычесть капиталообразование). С учетом внутреннего капиталообразования (валовое накопление фиксированного капитала рассматривалось как промежуточное потребление) совокупный показатель по СЭ составляет 8,26 миллиарда тонн; если разбить по категориям конечного пользования, то основная часть придется на услуги в сфере недвижимости (1,58 миллиарда тонн или почти 20%; без внутреннего капиталообразования этот показатель составляет всего 246 миллионов тонн), что напрямую связано со строительной деятельностью, а также торговлей строительной продукцией.

Двумя другими крупнейшими категориями являются торговля, а также государственное управление и оборона (около 700 миллионов тонн на каждую), за ними следуют еще три примерно равных сектора конечного потребления: отели и рестораны, здравоохранение и социальная работа, мясо и мясные продукты (приблизительно 400 миллионов тонн на каждый из них). Если произвести деление по крупным секторальным сегментам, то доминировать будет сектор услуг (4,95 миллиарда тонн или 60% от общего показателя), за которым последуют промышленные товары (2,4 миллиарда тонн или 29% общего числа), за ними (с примерно равными долями по 360 миллионов тонн или чуть больше 4%) — коммунальные услуги (электроэнергия, газ, отопление, вода), сельско- и лесохозяйственная продукция; на последнем месте — горнодобывающая промышленность. Эти результаты интересны, но ничего удивительного в них нет, так как они достаточно точно соответствуют распределению валового экономического продукта на континенте.

Европейские данные также позволяют выявить разницу в продуктивности ресурсов, выраженную в так называемом стандарте покупательной способности (СПС) на килограмм всех израсходованных материалов. По последним данным (за 2009 год) этот показатель в среднем по ЕС-27 составил 1,6 (увеличился на 17% по сравнению с 2000 годом), в Нидерландах — 3,28; в Великобритании — 2,53; во Франции — 2,06; в Германии — 1,80; в Испании — 1,72; в Польше — 0,87 (Moll и соавт., 2012). Однако именно при таком сравнении становятся очевидны ограничения и недостатки «агрегированного» подхода, при котором включаются все материалы без учета их фундаментальных качественных различий. Неужели Германия по продуктивности ресурсов лишь немногим превосходит Испанию и уступает Франции или Великобритании? Нет, если внести соответствующие поправки в способы расчета. Если вычесть все ископаемые виды топлива, песок и гравий, то среднее значение материалоемкости в ЕС-27 составит примерно 280 г/СПС, 165 г у Германии, 285 г у Франции, 190 г в Великобритании, 385 г в Испании; Нидерланды же окажутся наименее материалоемкой экономикой: всего 130 г.

4.4 Материалы в эпоху модернизации в Китае

Модернизация в Китае началась с того, что Дэн Сяопин аннулировал действовавшую на протяжении долгого времени автаркическую политику Мао, во многом ставшую причиной величайшего голода в истории (1959–61) и трех десятилетий массовой бедности. Реформы набирали обороты с 1980 по 1985 год, однако затем приостановились из-за массовых протестов и убийств на площади Тяньаньмэнь в 1989 году. Но хотя эти события вызвали откат назад в сфере прав человека, экономический рост значительно ускорился в 1990-х гг.; набранный темп удавалось поддерживать в течение всего первого десятилетия XXI века. Фактический рост был ниже представленных в официальной — и сильно завышенной — статистике, но все равно превысил пиковые относительные показатели роста японской и южнокорейской экономик. Оглядываясь назад, мы теперь ясно видим, что за три десятилетия после 1980-х гг. Китай пережил не только самый быстрый, но и самый большой экономический рост в истории.

Согласно официальной статистике, с 1980 по 2010 год ежегодный прирост в экономике Китая лишь трижды опускался ниже 5% (в 1981, 1989 и 1990 гг.), при этом 16 раз превышал 10%, а в среднем за три десятилетия составил 9,6% в год. Таким образом, каждые 7,3 года экономика Китая удваивалась, и ВВП 2010 года должен был быть в 17,8 раза больше, чем в 1980 году (в постоянных ценах). При расчете на душу населения увеличение оказывается 13-кратным (NBSC, 2013; IMF, 2013). По официальным курсам обмена валют значения ВВП составляли порядка 200 млрд и 5,9 трлн долларов (в текущем выражении), если пересчитать по паритету покупательной способности (ППС), то эти цифры увеличиваются до 250 млрд и 10,1 трлн. В 1980 году экономика Китая (по ППС) была равна половине экономики Италии; к 2010 стала крупнейшей в мире, более чем двукратно превосходя японскую (IMF, 2013).

Это беспрецедентное достижение легче понять, если рассматривать его в первую очередь как сочетание нескольких факторов: огромное и сдерживаемое прежде желание жителей самой населенной страны мира, десятилетиями живших в нищете из-за маоистского подхода к экономике, повысить свой уровень жизни; значительный прирост населения в сочетании с отложенной урбанизацией, по итогам которой миллионы молодых и трудоспособных рабочих вырвались из деревень в города, став движущей силой роста и создания новых производственных мощностей, благодаря которым страна вскоре превратилась в крупнейшего экспортера в мире; огромные прямые иностранные инвестиции, ежегодный объем которых с середины 1980-х гг. составлял более 50 млрд долларов, а также беспрецедентные масштабы внедрения современных технологий добычи, производства и транспорта — идеальный пример того, какие преимущества открываются у стран, позже других начавших процесс индустриализации.

С учетом того, что пост-маоистский рост начался с относительно низких показателей (в 1980 году ВВП Китая на душу населения составлял всего 250 долларов — меньше, чем у Пакистана), следовало ожидать многократного увеличения материальных потоков, без которого экономика страны не смогла бы удвоиться четыре раза за тридцать лет; кроме того, очевидно, что внутренних ресурсов Китая было бы не-

достаточно для такого роста, а значит, стране приходилось в значительной степени полагаться на импорт. Поэтому неудивительно, что расходы некоторых материалов росли гораздо быстрее, чем ВВП. Получив статус ведущей промышленной державы мира, Китай также стал крупнейшим импортером сырьевых товаров от железной руды до калийных удобрений.

Строительный бум, наблюдавшийся в Китае после 1980-х гг. — самый масштабный и быстрый с точки зрения постройки нового жилья, новых промышленных и коммерческих объектов, новой инфраструктуры — создал беспрецедентный спрос на все строительные материалы. По приблизительным оценкам внутренняя добыча строительных материалов увеличилась с 1980 по 2010 год в 25 раз, практически утроившись за первое десятилетие XXI века (SERI, 2013). Примерно такой же рост отмечен в выпуске двух основных производимых строительных материалов — цемента (как компонента бетона) и листового стекла.

Бешеные темпы «бетонирования» Китая и общие ее масштабы поражают. В 1980 году в стране было произведено чуть меньше 80 миллионов тонн цемента, десять лет спустя — примерно 210 миллионов тонн, к 2000 году этот показатель вырос до 595 миллионов тонн в год, к 2010 году утроился и составил 1,88 миллиарда тонн (почти в 24 раза больше, чем в 1980 году; 57% общемирового производства при менее чем 20%-й доле от мирового населения), затем увеличился до 2 миллиардов тонн в 2011 году (NBSC, 2013). Пожалуй, самой лучшей иллюстрацией таких масштабов является следующее сравнение: в США за весь XX век было израсходовано примерно 4,56 миллиарда тонн цемента, а вот Китай всего за три года (2008–2010) потратил больше цемента на возведение новых объектов (4,9 миллиарда тонн), а с 2009 по 2011 год было потрачено еще больше: 5,5 миллиарда тонн (NBSC, 2013).

Очевидно, что при таких темпах строительства заливаемый бетон по большей части будет низкого качества. Этот вывод подтверждается явным обветшанием бетонных сооружений в Китае, возведенных в конце 1980-х и начале 1990-х, то есть во время первого строительного бума в Китае. Качество бетона, идущего на строительство многих новых плотин в Китае (к 2010 году было возведено более 87 тысяч таких сооружений самых разных размеров, включая крупнейшую в мире плотину Санься), вызывает беспокойство, особенно в свете того, что тысячи подобных плотин расположены в сейсмоопасных зонах. Даже если бы первоначальное качество не оставляло желать лучшего, опыт США с обширной бетонной инфраструктурой заставляет переживать за Китай и его будущие проблемы.

Проблемами производства листового стекла являются низкое качество и чрезмерные масштабы; с 1980 по 2010 год количество ежегодно выпускаемого стекла увеличилось в 25 раз с 25 до 630 миллионов ящиков или с 1,25 до 31,5 миллиона тонн (NBSC, 2013). В 2010 году в Китае было изготовлено 60% всего израсходованного в мире стекла (55 миллионов тонн); производительность его стеклодельных предприятий возросла с 6,5 до 44 миллионов тонн в год; из-за этого средней коэффициент использования производственных мощностей по отрасли снизился до 70%, в результате чего был изменен порядок регламентирования строительства новых заводов (China Daily, 2011). Более того, большая часть этих избыточных производственных мощностей расположена на энергоемких и сильно загрязняющих окружающую среду предприятиях; они выпускают примерно 20 миллионов тонн стекла — поч-

ти две трети общего объема производства, — но это некачественное флоат-стекло (Pilkington, 2010).

Сталелитейная отрасль Китая росла практически вместе с его ВВП: производство необработанной стали выросло в 17,2 раза с 37,1 миллиона тонн в 1980 г. до 637,4 миллиона тонн в 2010 г., что составило почти 45% от всей выпущенной в мире стали (WSA, 2013). Но так как добыча железных руд выросла всего в 14 раз (с 75 тысяч тонн до 1,07 миллиарда тонн), все большая доля китайской стали производится из импортного сырья. В 2010 году Китай импортировал 618 миллионов тонн железной руды — более трети общего расхода доменных печей; таким образом, он со значительным опережением занял первое место по импорту железной руды, закупив почти 60% всего железнорудного экспорта в мире и покрыв таким образом около 70% внутреннего спроса; основными поставщиками стали Австралия и Бразилия. И хотя Китай является практически монополистом в экспорте редкоземельных металлов и основным экспортером молибдена, магния и графита, он также лидирует в импорте бокситов: 44 миллиона тонн в 2010 году; в том же году Китай закупил почти 1,2 миллиона тонн медных руд и концентратов.

Единственным основным строительным материалом, производство которого возросло незначительно, является промышленный круглый лес; объем его заготовки за три десятилетия увеличился менее чем на 30%, с менее 80 до примерно 102 миллионов м³ (FAO, 2013). Масштабное обезлесение Китая до прихода коммунистов к власти, неправильный подход к ведению лесохозяйственной деятельности в оставшихся естественных лесах, а также массовые кампании по лесовозобновлению, приведшие к неправильному (только в высоту) росту нескольких массово высаживаемых пород деревьев (сосны и эвкалипта) — все это объясняет недостаточные внутренние поставки древесины, из-за которых с 1980 по 2010 год пришлось учетверить импорт (с чуть более 8 до 35 миллионов м³). Основным поставщиком стала Канада, росла доля древесины из Африки, что внесло свой вклад в уничтожение тропических лесов на этом континенте (FAO, 2013; Smil, 2013).

Но наибольший прирост наблюдался в сфере синтеза пластмасс, объем которого увеличился с 1980 по 2010 год почти в 70 раз. Конечно, в основном это связано с быстрым развитием практически с нуля (в 1980 году выпущено менее 900 тысяч тонн), однако в абсолютном выражении производство пластмасс в 2010 году составило 62 миллиона тонн, что превысило показатель ЕС-27, равный примерно 57 миллионам тонн (Europe Plastics, 2011). Наконец, необходимость обеспечивать продовольствием все еще растущее население, а также улучшить рацион жителей привела к существенному росту производства и импорта удобрений. Были внедрены новые установки Габера-Боша, что позволило нарастить производство азотных удобрений с 10,3 миллиона тонн в пересчете на чистый азот в 1980 году до 45,2 миллиона тонн в 2010, но рекорд — 48,6 миллиона тонн — был поставлен в 2009 году, ознаменовав практически пятикратное увеличение за три десятилетия; производство фосфатных удобрений при этом увеличилось примерно в 8 раз до 19 миллионов тонн. Разность в скорости роста производства азотных и фосфатных удобрений объясняется попытками Китая уйти от чрезмерного использования азота и обеспечить более сбалансированное соотношение азота, фосфора и калия в общем объеме удобрений, доби-

ваясь таким образом большей эффективности их применения. В результате Китай закупает рекордные количества калия у Канады.

Китай также стал важным импортером материалов для вторичной переработки, при этом ведущим поставщиком являются США. В 2010 году Китай импортировал почти 25 миллионов тонн макулатуры, в основном из США (Magnaghi, 2011). Аналогичным образом в 2010 году Китай купил почти 6 Мт стального лома, заняв третье место в мире после Турции и Южной Кореи (WSA, 2013) по его импорту; ведущим поставщиком опять же стали США. Эту торговлю определенно можно считать весьма примечательным показателем изменений в судьбе этих стран, ведь крупнейшая и богатейшая экономика мира становится главным поставщиком вторичного сырья для второй экономики, которая находится на стадии быстрого роста. В 2011 году США экспортировали в Китай отходов и лома (материалы 910-й категории по Североамериканской промышленной классификации) на более чем 11 миллиардов долларов. Это меньше, чем экспорт транспортного оборудования или сельскохозяйственной продукции, но превосходит экспорт всего неэлектрического оборудования, а также в пять раз превышает поставки всего электрического оборудования и приборов (Smil, 2013). Китай также является крупнейшим импортером отходов пластмасс и электроники.

Схожий анализ главных потоков материалов на уровне государств можно дать и в отношении других ведущих экономик; проще всего это сделать для Японии, так как в ней ведется отличная статистика, а за последние годы было опубликовано множество различных исследований потоков отдельных материалов в этой стране. Наиболее примечательным можно назвать исследование (Krausmann и соавт., 2011), в котором на основе исторической статистики по Японии было прослежено использование материалов в этой стране с 1878 по 2005 год; запасы и потоки меди были проанализированы Теракадо и соавт. (Terakado и соавт., 2009) и Дайго и соавт. (Daigo и соавт., 2009); Дайго и соавт. (Daigo и соавт., 2010) также отследили движение хрома и никеля в составе нержавеющей стали; Курики и соавт. (Kuriki и соавт., 2010) проанализировали потенциал переработки металлов платиновой группы.

Основные выводы этих исследований несложно резюмировать. Общая масса расходуемых материалов за 127 лет с 1878 по 2005 год увеличилась в 40 раз, причем прирост большей частью пришелся на 50-е и 60-е годы XX века, а основным источником стал импорт: зависимость Японии от импортируемого сырья становится еще более очевидной, если включить в анализ ископаемые виды топлива. Рост потребности в материалах после Второй мировой войны достиг пика во время первого раунда повышения цен на нефть, спровоцированного странами ОПЕК (1973–1974). После временного сокращения импорта топлива общее снабжение первичной энергией (ОСПЭ, TPES²⁰) продолжило расти (хотя и медленнее), а вот спрос на металлические руды и нерудные полезные ископаемые stagнировал, а после 1990 года и вовсе стал снижаться. Япония остается богатой страной с точки зрения массового потребления в основном импортируемых материалов, однако после 1990-х сочетание таких факторов, как стареющее население, экономические спады и деинду-

²⁰ Общее снабжение первичной энергией (total primary energy supply) – сумма всех энергетических ресурсов, включая не только уголь и нефть, но и ядерную, гидро- и солнечную энергию. – *Прим. пер.*

стриализация, привело к сокращению импорта, стагнации или снижению расходов и уровня производства.

Аналогичным образом кратко описывать ситуацию в других ведущих индустриализованных странах, общей чертой большей части которых является сильная зависимость от импорта важнейших материалов, было бы не так полезно, как обратиться к некоторым фундаментальным особенностям материальных потоков, их энергостойкости, а также воздействию материалов на окружающую среду. Я посвящу этому два отдельных пункта. В первом дам количественную оценку затрат топлива и электричества, связанных с сырьевыми и обработанными материалами, во втором представлю результаты показательных оценок жизненного цикла — относительно нового аналитического инструмента, цель которого — описать издержки, не являющиеся капитальными или операционными.

4.5 Энергозатраты на производство материалов

Чтобы в экономике началось движение материалов, необходима энергия, которая уходит на добычу их из природных месторождений или на их промышленное производство от простой механической обработки до сложных химических реакций. Эту энергию можно условно разделить на два типа: прямые потоки топлива и электричества, расходуемые в ходе производства на выработку механической энергии, тепла, давления, освещения, а также на электронное управление процессами, и непрямые потоки (скрытые энергетические потоки), включающие энергию, потраченную на производство требуемых материалов, машин, оборудования, а также на строительство инфраструктуры. В современных производственных системах в основном доминирует первая категория энергетических потоков.

Например, чтобы выплавить тонну железа из руды в доменной печи, энергии (в форме кокса, дополнительного угля, газа или нефти) уйдет намного больше, чем ушло на производство стали для самой печи, на футеровку, на изготовление устройств формирования шихты, если рассчитывать пропорционально на единицу продукции. Современные доменные печи обходятся без смены футеровки до двух десятилетий, выплавляя за это время десятки миллионов тонн горячего металла. Схожим образом на обеспечение высоких показателей температуры и давления, необходимых для химического синтеза, уходит гораздо больше энергии, чем было потрачено на производство сосудов, трубок, бойлеров, компрессоров, компьютерных средств управления (опять же при расчете на единицу конечной продукции).

Поэтому вторую категорию затрат энергии почти всегда игнорируют. А чуть больше двух поколений назад в большинстве отраслей промышленности не было причин изучать даже прямые энергопотоки: в течение многих десятилетий реальные цены на топливо и электричество оставались низкими, порой снижаясь еще больше, и только в тех секторах, где затраты электричества и топлива непомерно высоки (например, где используются электрохимические процессы или ведется высокотемпературный синтез под давлением), предприятия пытались снизить общие расходы энергии, чтобы стать более прибыльными. Общераспространенная практика не обращать внимания на энергозатраты внезапно прекратилась, когда страны

ОПЕК запустили первый раунд роста цен на нефть, (1973–1974), в результате чего за несколько месяцев нефть подорожала в пять раз; ситуация стала еще более тревожной после второго раунда ценовых манипуляций со стороны ОПЕК (обусловленных свержением иранской монархии), по итогам которого средняя цена барреля ближневосточной нефти повысилась с 12 долларов в 1977 году до почти 36 долларов в 1980-м (BP, 2013).

Новая дисциплина, именуемая энергетическим анализом, задается целью отслеживать и количественно оценивать расход энергии не только на добычу и переработку естественных сырьевых товаров, производство готовых изделий, но и на выращивание продовольствия и оказание услуг (IFIAS, 1974; Charman и соавт., 1974; Verbraeck, 1976; Thomas, 1979). Выбранное обозначение дисциплины обманчиво широко; формулировка «энергетический анализ» предполагает куда больший спектр сбора данных. Скрытые затраты (или затраты, понесенные до начала непосредственного производственного процесса) энергии — термин с описательной точки зрения более корректный, но я всегда предпочитал простое обозначение: затраты энергии. Я одним из первых начал практиковать этот метод; помимо прочего, я стал основным автором первого всеобъемлющего энергетического анализа американской кукурузы — самой важной культуры для этой страны (Smil и соавт., 1983) — поэтому я очень хорошо представляю себе проблемы и недостатки этого метода.

Большей частью оценка энергозатрат базируется на одном из двух разных подходов: либо это количественная оценка на основе таблиц затрат и результатов производства по экономической деятельности; либо анализ процесса, в котором отслеживаются все важные потоки энергии, необходимой для производства конкретного сырьевого товара или готового изделия. В первом случае на основе актуальных цен значения энергопотоков в матрице входных и выходных экономических показателей (по основным секторам промышленности, а там, где это возможно — с разбивкой на уровне групп товаров или отдельных основных видов продукции) конвертируются в энергетические эквиваленты, что позволяет собрать данные по прямым и косвенным расходам энергии. В отличие от такого агрегационного подхода (собирающего данные из дезагрегированных таблиц) процессный анализ (process analysis) фокусируется на конкретном продукте, конкретных обстоятельствах и условиях, связанных с ним: такой анализ определяет все прямые затраты энергии и максимально возможное число категорий непрямых затрат, поэтому сам по себе достаточно ценен как управленческий инструмент.

Как и в случае со всеми оценками, основанными на сложных исходных данных и охватывающими многостадийные процессы, результат анализа процесса зависит от того, как установлены границы этого анализа. В большинстве случаев ошибка усечения, связанная с тем, что учитываются исключительно прямые затраты энергии (закупленного топлива и электричества), будет незначительной, но в некоторых ситуациях может оказаться неожиданно весомой. Например, по расчетам Ленцена и Дея (Lenzen и Dey, 2000) затраты энергии на производство стали в Австралии составили 19 ГДж/т если считать с помощью процессного анализа, и 40,1 ГДж/т — если использовать анализ энергозатрат. Схожим образом Ленцен и Трелоур (Lenzen и Treloar, 2002), проведя анализ энергозатрат, получили цифру затрат энергии на строительство четырехэтажного многоквартирного дома в Швеции, в два раза пре-

вышавшую аналогичный показатель по результатам процессного анализа Бёрйессона и Густавссона (Börjesson и Gustavsson, 2000).

Затруднения возникают еще и из-за увеличения доли сырьевых товаров и продукции, идущих на импорт и экспорт: в отдельных случаях дополнительные затраты энергии на импорт сырья и экспорт готовых изделий совершенно незначительны, в других случаях пренебрежение этими затратами приведет к серьезному занижению показателей. Пусть, например, на двух разных строительных площадках в Нью-Йорке используются две внешне идентичные стальные балки, но одну из них изготовили в США из лома при помощи непрерывного литья и электродуговой печи на интегрированном производстве в Пенсильвании, а другую сделали в Китае, для чего железную руду из Австралии и кокс из индонезийского угля сплавляли в доменной печи в одной провинции, а сами балки нарезали из болванок в другой, а затем отправили на кораблях через Тихий океан, а потом еще и перевезли по железной дороге через весь континент.

Приблизительные энергозатраты при перевозке на дальние расстояния можно легко подсчитать, исходя из следующих принимаемых средних значений (даны в тонна-километрах для простоты сравнения, упорядочены от наибольших к наименьшим): 30 МДж при перевозке воздушным транспортом, от 1 до 2,5 МДж при использовании грузовых автомобилей с дизельными двигателями (точное значение зависит от размера грузовика), 600–900 кДж при перевозке на дизельных поездах, 200–400 кДж у электропоездов, 100–150 кДж затрачивают малые грузовые суда, и всего 50 кДж на тонна-километр — большие танкеры и сухогрузы (Smil, 2010). Очевидно, что энергоемким воздушным транспортом пользуются только для перевозки грузов с высокой добавленной стоимостью; затраты энергии на перевозку железной руды сухогрузом на расстояние 3000 км от шахты до доменной печи в Китае составят менее 10% от всех энергозатрат на производство стали; а вот на транспортировку строительного камня из Европы или Азии в США может уйти 25–50% от всей энергии, потраченной на обтеску и полировку этого камня.

Эти факты следует учитывать при изучении и сравнении показателей, описываемых в текущем разделе. Затраты энергии, которые я даю единообразно в виде гигаджоулей на тонну (ГДж/т) сырья или готовой продукции, весьма информативны с точки зрения расходов и экологического воздействия разнообразных материалов, а также полезны в сравнительном анализе. Но, как и любой аналитический инструмент, такие данные нельзя использовать в качестве единственного основания для принятия решений об использовании те или иных материалов: их необходимо дополнять соображениями о доступности, качестве, долговечности, наконец, эстетичности; если бы все строители мира игнорировали эстетику, то бетон — материал с низкой энергоемкостью — господствовал бы в еще большей степени, чем сейчас. Энергозатраты в настоящем разделе будут представлены в том же порядке перечисления материалов, что и в предыдущей главе: начну с биоматериалов и закончу кремнием.

Затраты энергии на производство товарных **пиломатериалов** (древесины) низки и сопоставимы с аналогичным показателем для многих сыпучих материалов и основных строительных материалов, полученных при их переработке. На валку леса, вывоз стволов, их брусовку и воздушную сушку суммарно уходит не более 500

МДж/т; даже при относительно энергоемкой сушке в печах (на нее уходит 80–90% всей затраченной тепловой энергии) суммарный показатель может достигать 1,5 или превышает 3,5 ГДж/т (если включать резку и строгание) у таких весьма распространенных пиломатериалов, как «брус 2×4», используемый в Северной Америке для строительства каркасов жилых домов. Фактический размер этих брусьев, являющихся прямоугольными призмами, несколько меньше, чем 2×4 (1,5×3,5 дюйма или 38×89 мм), а стандартная длина равняется 8–9 футам. Низкие энергозатраты на древесину также хорошо иллюстрируются тем фактом, что в Канаде они составляют менее 5% энергозатрат на всю продаваемую продукцию (Meil и соавт., 2009). Энергозатраты порядка 1–3 ГДж/т, конечно, являются лишь малой долей затрат на производство древесины, которые для материалов, подвергавшихся воздушной сушке, составляют от 15 до 17 ГДж/т.

Очевидно, что энергозатраты на **изделия из древесины** зависят от степени обработки (FAO, 1990). На тонну ДСП (с плотностью от 0,66 до 0,70 г/см³) уходит от 3 до 7 ГДж, при этом почти 60% этой энергии тратится на сушку стружки, 20% — на горячую прессовку. Затраты энергии на производство фанеры могут различаться в два раза (в зависимости от вида дерева и конкретного производственного процесса) от 7 до 15 ГДж/т, при этом, опять же, 60% тратится на сушку, 10% на прессовку. Все более популярная в коммерческом строительстве **клееная древесина** производится с расходом от 5 до 12 ГДж на тонну.

Энергоемкость бумаги относительно высока. Химический процесс получения древесной массы требует кипячения измельченной древесины в кислотных растворах под давлением, после этого производится еще более энергоемкое обезвоживание свежесваренных волокон, из которых формируются слои бумаги; на тонну бумаги уходит 2,2 тонны древесины, при этом с каждой тонны древесной массы в качестве побочного продукта получают черный щелок, сжигание которого позволяет получить 22 ГДж энергии (сжигая его, бумажный комбинат может поставлять энергию внешним потребителям). Напротив, если древесную массу получают механическим способом, то на ее тонну уходит менее 1,1 тонны древесины, но данный процесс является весьма энергоемким. Максимизировать энергоэффективность бумагоделательного процесса можно путем комбинации этих двух способов. Расход первичной энергии при использовании наиболее эффективных технологий равняется 11 ГДж на тонну воздушно-осушенной крафт-целлюлозы (включая около 650 кВт·ч электричества), может достигать 23 ГДж/т в термомеханическом процессе, а вот при переработке макулатуры минимальные затраты составляют всего 4 ГДж/т (Worrell и соавт., 2008).

Расход энергии в бумажном производстве зависит и от того, какой нужен конечный продукт, однако с учетом размера и производительности современных бумагоделательных машин (обычно их длина составляет 150 м, проход — 1800 м/мин, а ежегодный сход бумаги — 300 тысяч тонн) разница оказывается незначительной. Небеленая упаковочная **бумага**, изготовленная из термомеханической массы, отличается наименьшей энергоемкостью (23 ГДж/т). На тонну тонкой беленой немелованной бумаги из крафт-целлюлозы тратится уже как минимум 27 ГДж, а зачастую более 30 ГДж (Worrell и соавт., 2008). Многие люди удивляются, что энергии на бумагу тратится столько же, сколько уходит на высококачественную сталь. А вот

лучший печатный материал — мелованная бумага для коллекционных изданий — фактически может быть менее энергоемкой (примерно 25 ГДж/т), потому что производить и наносить филлер (как правило, мел) выходит дешевле, чем получать волокно из дерева. На переработку газетной бумаги и ткани, а также на их очистку от типографской краски и чернил энергии тратится еще меньше (менее 18 ГДж/т), однако при их переработке можно получить разве что низкокачественную упаковку.

На производство **строительных заполнителей**, обычно заключающееся в добыче сырья и некоторой механической обработке (сортировке, в т.ч. по размеру, дроблении, измельчении, сушке), энергии, как правило, расходуется очень немного; высокий расход топлива и электричества характерен только для термической обработки при изготовлении кирпича, плитки, стекла и, прежде всего, цемента. Энергозатраты на изделия из природного **камня** низки, обычно составляют порядка 500 МДж на тонну карьерного блока, немногим меньше на тонну щебня, в два раза больше для колотого или грубого тесаного камня, в три-четыре раза (до 2 ГДж/т) - для полированного декоративного камня с высокоточной резкой. Затраты энергии на добычу и переработку **песка** могут различаться в два раза, но даже при максимальных затратах этот материал относится к наименее энергоемким при расчете по массе.

Простейшая последовательность добычи и подготовки, позволяющая получить достаточно чистый песок с одинаковыми по размеру гранулами, затрачивает не более 100 МДж/т; даже на более затратную сортировку гравия (или на дробление при необходимости) уходит значительно меньше 500 МДж/т. Наиболее высокими энергозатратами отличается процесс подготовки промышленного песка, используемого в стекольной, производств керамики и огнеупорных материалов, плавке и литье металлов, а теперь еще и в гидравлическом фракционировании газо- и нефтеносных сланцев: содержание влаги в них понижается до значений менее 0,5% с помощью высокоомощных вращающихся сушилок или сушилок с кипящим слоем, на что уходит почти 1 ГДж/т энергии. На обжиг **кирпича** в низкоэффективных печах в сельских районах Азии затрачивается до 2 ГДж/т; на китайских предприятиях та же процедура расходует 1,1–1,2 ГДж/т (Global Environmental Facility, 2012; Li, 2012). В США на производство качественного кирпича тратится 2,3 ГДж/т (USEPA, 2003).

Производство **цемента** отличается достаточно высокой энергоемкостью, так как для термохимической обработки минерального состава требуются высокие температуры. Кальций и оксиды получают из известняка, кремний, алюминий и железо — из глины, сланцев или отходов; для производства одной тонны цемента (клинкера) измельчается порядка 1,8 тонны сырья, затем их смесь нагревают как минимум до 1450°C. Полученный после спекания клинкер снова измельчают с добавлением других материалов для получения мелкофракционного портландцемента. Зола, захватываемая на угольных электростанциях, и шлак из доменных печей могут добавляться в смесь, чтобы снизить расход клинкера. Дополнительная энергия затрачивается на вращение больших печей. Эти наклонные (3,5–4°) металлические цилиндры, как правило, достигают примерно 100 (максимум — 230) метров в длину, 6–8 метров в диаметре, совершают 1–3 оборота в минуту; сырьевой материал (шихта) подается вниз, где сталкивается поднимающимися горячими газами (Peray, 1986; FLSmidth, 2011).

Если же анализировать энергозатраты с поэтапной разбивкой, то наименьшую энергонагрузку представляет добыча минералов (известняка, глины и сланцев), а

также их доставка к цементным печам. Подготовка сырья для печей — процесс весьма электроемкий, так как на дробление и измельчение шихты тратится примерно 25–35 кВт·ч на тонну, на измельчение и транспортировку конечного продукта (клинкера) — как минимум 32–37 кВт·ч/т (Worrell и Galitsky, 2008). Основная часть энергии тратится на пирообработку — процесс, состоящий из нескольких фаз. Сначала производится испарение воды, затем разложение глин, из которых получают SiO_2 ; известняк или доломит кальцинируется, чтобы получить CaCO_3 , затем формируется белит (Ca_2SiO_4 , на него приходится примерно 15% всей массы клинкера), после чего наконец осуществляется спекание и производство алита ($\text{Ca}_3\text{O} \cdot \text{SiO}_4$, составляет примерно 65% массы клинкера) (Winter, 2012).

Общий расход энергии в производстве цемента разнится в зависимости от основного вида использованного топлива, источника электроэнергии, а также технологии производства. Средний удельный энергозатрат в цементной промышленности снизился, так как на смену старому «влажному» методу пришел более эффективный «сухой» процесс. Наибольшим расходом энергии в сухом процессе отличается фаза измельчения сырья и клинкера; немало энергии уходит и на питание и охлаждение печей. Суммарно на все это приходится более 80% совокупных энергозатрат, составляющих 90–120 кВт·ч на тонну цемента (Madloul и соавт., 2011). На разогрев сушильных печей (большой частью на это тратят уголь, нефтяной кокс, а также отходы (в США); в Китае — в основном только уголь) уходит 3–4 ГДж/т; печи с четырьмя или пятью стадиями преднагрева расходуют 3,0–3,5 ГДж/т, при шестистадийном нагреве достаточно 2,9–3 ГДж/т (IEA, 2007; Worrell и Galitsky, 2008).

При максимальной достигнутой к текущему моменту производительности затраты первичной энергии на производство портландцемента составляют 3,3–3,5 ГДж/т, на производство цемента с золой-уносом или шлаком из доменных печей — 2,4 ГДж/т и 2,1 ГДж/т, соответственно (Worrell и соавт., 2008). А вот в бедных странах заводы до сих пор тратят 4,5 ГДж энергии на производство одной тонны портландцемента. Как и следовало ожидать, затраты энергии на производство цемента максимальны в Китае. Несмотря на постепенную оптимизацию удельной энергоэффективности, в среднем по Китаю расходовали почти 5 ГДж/т в 2000 году и немногим более 4 ГДж/т в 2007 (тогда на эту отрасль пришлось 7% всего энергопотребления в стране (Sui, 2010)). Внедрение более эффективных сушильных печей позволило снизить среднекитайский показатель до примерно 3,3 ГДж/т к 2010 году. Сейчас принимается множество мер по сокращению выбросов, производимых предприятиями данной отрасли.

Расход энергии в **стеклоделии** составляет от 4 до 10 ГДж/т, в среднем — 7 ГДж/т; тарное и листовое стекло по этому показателю отличаются совсем незначительно (IEA, 2007). Теоретический минимальный расход в стеклоделии (на химические реакции между компонентами, а также на выплавку) равняется примерно 2,4 ГДж/т для боросиликатного и свинцового стекла, 2,8 ГДж/т для общераспространенного натриево-известкового стекла. Как и следовало ожидать, энергозатраты на керамические изделия пропорциональны качеству продукции и степени пирообработки: на неглазурованную плитку уходит всего 6 ГДж/т, на глазурованную уже до 10 ГДж/т, на тонкую керамику вплоть до 70 ГДж/т, на санитарную керамику — около 30 ГДж/т.

Стандартным подходом к количественной оценке энергозатрат в **железо- и сталелитейной** промышленности является включение энергозатрат на уголь, комкование и спекание руды, производство железа и стали, холодный и горячий прокат, цинкование и покрытие; не учитываются энергозатраты на добычу и транспортировку угля и руды, а также на такие энергоемкие исходные материалы, как электроды и огнеупорная футеровка; первоначальная энергоемкость металлолома также игнорируется. Анализ, выполненный (более или менее) в соответствии с такими ограничениями, показывает, что в среднем мировая металлургия тратила примерно 60 ГДж/т в 1950 году, чуть более 30 в 1975-м, около 20 к 2000 году (Yellishetty и соавт., 2010).

Сокращение расходов кокса в доменных печах стало основной причиной, почему минимальные затраты энергии на выплавку железа сократились с 30 ГДж/т в 1950 году до 12,5 ГДж/т к концу 90-х гг.; эта цифра всего в два раза больше термодинамического минимума в 6,6 ГДж/т, необходимых для восстановления железа из гематита (de Veer и соавт., 1998). Обычный диапазон затрат энергии составляет 10–13 ГДж/т на функционирование доменной печи, 2–3 ГДж/т на спекание, 0,75–2 ГДж/т на коксование, 1,5–3 ГДж/т на прокат (IEA, 2007). Анализ максимальной результативности, достигнутой в металлургической промышленности при выполнении всего цикла производства железа и стали, показал, что непрерывное литье с использованием доменных и конвертерных печей расходует 16,3–18,2 ГДж/т; прямое восстановление железа с последующим производством стали в электродуговой печи (ЭДП) и разливкой тонкого сляба расходует 18,6 ГДж/т, плавка металлолома в ЭДП и разливка тонкого сляба — всего 6 ГДж/т (Worrell и соавт., 2008).

То есть средняя энергоемкость сталелитейного производства значительно ниже в тех странах, которые предпочитают пользоваться наиболее энергоэффективной технологией. МЭА (IEA, 2007) подсчитала энергоемкость необработанной стали в разных странах; из полученной пошаговой прогрессии видно, что средние значения варьируются от 10 ГДж/т (при производстве стали только с ЭДП) до почти 40 ГДж/т; обобщенное значение составило 26 ГДж/т, 90% стали до сих пор производится с разбросом от 14 до 30 ГДж/т. Сравнительный анализ энергозатрат железо- и сталелитейной промышленности в США и Китае хорошо иллюстрируют это обстоятельство: совокупный расход в 2006 году составил 14,9 и 23,11 ГДж на тонну необработанной стали, соответственно (Hasanbeigi и соавт., 2012). Более высокая производственная эффективность в целом является лишь косвенной причиной таких различий; в основном они объясняются значительно более высокой долей электродуговых печей в США: в 2006 году 57% американской стали было выплавлено именно в таких печах, и лишь 11% — китайской, где до сих пор в основном пользуются доменными печами. В результате доля электричества во всей затрачиваемой американской сталелитейной промышленностью первичной энергии составляла 20%, в Китае — всего 10%. Если взять 25 ГДж/т за средний показатель, то получится, что в 2010 году мировой железо- и сталелитейной промышленностью потрачено около 36 ЭДж энергии, то есть около 6% всего мирового потребления первичной коммерческой энергии. Для сравнения, Оллвуд и Каллен (Allwood и Cullen, 2012) оценили этот показатель в 38 ЭДж.

Алюминий по сравнению со сталью гораздо более энергоемок в производстве. Расход топлива и электричества в байеровом процессе — от 10 до 13 ГДж

на тонну глинозема — составляет лишь малую долю общих расходов, где основным компонентом является электролиз, на которых предпочитают тратить самую дешевую электроэнергию, вырабатываемую большими гидроэлектростанциями. Такие станции поставляют примерно 60% всей электроэнергии, затрачиваемое на производство алюминия в мире. При использовании электродов с обжигом на месте, электричества расходуется чуть-чуть больше, чем при наиболее распространенной технологии, базирующейся на применении предварительно обожженных анодов из каменноугольной смолы или кокса в нефти. На тонну металла уходит не менее 400 кг анодов; само их производство затрачивает около 2,5 ГДж/т топливной энергии и порядка 140 кВт·ч/т электричества.

Электролиз постепенно становится более энергоэффективным: с 1900 по 2000 год средний размер батарей, используемых в процессе Холла-Эру, удваивался каждые 18 лет, а расходы электричества сократились с 50 МВт·ч/т в 1900 году до 25 МВт·ч/т к 1950 году, а в 2000 году составляли уже менее 13 МВт·ч/т (Beck, 2001). В среднем затраты на тонну металла в последние годы составляют от 13 до 18 МВт·ч; взвешенное среднее значение по миру равнялось 15,3 МВт·ч/т в 2004 году, наименьшими расходами — 14,3 МВт·ч/т — могла похвастаться Африка (IEA, 2007). Если учесть теоретический минимум — 6,3 МВт·ч/т — то окажется, что сейчас КПД процесса составляет в лучшем случае 45%.

Наименьший расход (13 МВт·ч) при поставке электроэнергии с гидроэлектростанций эквивалентен почти 50 ГДж/т, наибольший расход — при получении электричества из ископаемых видов топлива — составлял бы почти 200 ГДж/т первичной энергии. Энергия дополнительно тратится на отливку и прокат слитков; на прочие виды деятельности алюминиевых комбинатов тратится еще 7–8 ГДж/т. По данным МЭА взвешенные энергозатраты на всю цепочку производства алюминия составляли в 2004 году 175 ГДж/т; наилучшим результатом в отрасли стало практически то же самое значение — 174 ГДж на тонну металла (Worrell и соавт., 2008). То есть алюминий по энергоемкости в два раза превосходит медь, почти в 10 раз — наиболее экономичные технологии производства стали (непрерывное литье с доменными и конвертерными печами). Всего в 2010 году было произведено 40,8 миллиона тонн алюминия, на что, соответственно, было потрачено порядка 7,1 ЭДж энергии — менее 1,5% совокупных коммерческих поставок первичной энергии. Из-за огромных затрат электроэнергии на производство этого металла его в основном выпускают в странах, где достаточно гидроресурсов, при этом четыре крупнейших производителя — Китай, Россия, Канада и США — выпускают половину всего алюминия в мире. Энергоемкость вторичного (переработанного) алюминия составляет всего 7,6 ГДж/т: эта энергия тратится только на переплавку.

Как уже отмечалось ранее, наибольшей энергоемкостью на фоне прочих относительно часто используемых металлов отличается титан (400 ГДж/т), за ним идут никель (160) и медь (в среднем по миру 93 ГДж/т); энергозатраты на производство хрома, марганца, олова и цинка примерно равны и составляют около 50 ГДж/т (IEA, 2007). Неудивительно, что из-за очень низкой концентрации металла даже в самых богатых эксплуатируемых залежах энергоемкость золота и серебра на несколько порядков превышает аналогичный показатель часто используемых металлов: у сере-

бра он в среднем составляет 2,9 ГДж/т (в 30 раз выше, чем у меди), у золота — 53 ГДж/т, примерно в 300 раз больше, чем у алюминия.

Пластмассы все без исключения энергоемки, но опубликованные данные по расходам энергии удивительным образом разнятся. В середине 70-х были проведены первые сравнительные исследования затрат энергии на производство этих материалов; оказалось, что весь процесс получения полиэтилена (ПЭ) расходует от 50 ГДж/т в Нидерландах до 116 ГДж/т в США (Вегу и соавт., 1975). В отношении полипропилена (ПП) таких расхождений не наблюдалось (расход составлял от 111 до 125 ГДж/т), в отношении ПВХ показатели нидерландских, британских и американских предприятий оказались почти одинаковыми — 69,8, 66,0 и 60,8–70,8 ГДж/т, соответственно. При наиболее подробном отраслевом анализе энергозатрат в химической промышленности США обнаружилось, что в 1997 году на производство ПЭ в среднем уходило 77,4 ГДж/т (20,1 ГДж/т на сырье), энергоемкость ПП составляла в среднем 54,7 ГДж/т, ПВХ — 44,7 ГДж/т, из которых 17 ГДж/т приходилось на сырье.

Всемирный банк провел свой анализ энергозатрат на производство ПЭ и выяснил, что на полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) тратится от 87,4 до 107,8 ГДж/т, на полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) — от 74,4 до 116,3; при этом затраты на переработку варьируются от 25–28 ГДж/т до 45 ГДж/т (Vlachopoulos, 2009). Берге (Berge, 2009) в своем обзоре строительных материалов назвал следующие цифры для Европы: 110–115 ГДж на тонну ПЭ и ПП, 80–90 на тонну ПВХ. В своем обзоре передовых практик Уоррелл и соавт. (Worrell и соавт., 2008) обнаружили, что энергозатраты на получение этилена из лигроина и из этана примерно равны и составляют 14–22 ГДж/т и 12,5–21 ГДж/т соответственно. Зависимость современного производства пластмасс от углеводородного сырья не представляла до сих пор большой проблемы, так как данной отрасли расходуется менее 5% всего производимого в мире объема природного газа и сырой нефти.

Возросший спрос на пластмассы и высокая стоимость сырья, в особенности сырой нефти, изменяют эту ситуацию; в долгосрочной перспективе единственным практичным ответом на постепенное снижение запасов нефтехимического сырья, а также на присутствие в окружающей среде не биоразлагаемых материалов, кажется применение биопластмасс на растительной основе. Однако высокий спрос на композитные материалы, все чаще применяемые как в аэрокосмической, так и в автомобильной промышленности, приведет к увеличению энергозатрат даже после поправок на низкую плотность и великолепную прочность таких инновационных материалов. Например, чтобы уменьшить вес легковых автомобилей и прочих транспортных средств, в них используют углеродное волокно из лигнина; затраты энергии на его получение составляют 670 ГДж/т; на производство армированного углеродными волокнами полимера (полиакрилонитрила) уходит чуть более 700 ГДж/т (Das, 2011) — в три раза больше, чем на производство алюминия.

Из-за того, что каталитический синтез *аммиака* из элементов в его составе требует высоких значений давления и температуры, процесс Габера-Боша долгое время оставался одной из самых энергоемких технологий химической промышленности; первые промышленные установки Габера-Боша, работавшие на коксе, тратили на получение 1 тонны NH₃ более 100 ГДж/т; работавшие на угле установки, появившиеся до начала Второй мировой войны, все еще расходовали порядка 85 ГДж/т. После

1950 года переход на природный газ и конверсия под низким давлением с использованием поршневых компрессоров позволили снизить энергозатраты до 50–55 ГДж/т. На современных установках азот получают фракционным выделением из воздуха, а водород — пароконверсией природного газа, который также используется как топливо для двигателей компрессоров, выступая таким образом в качестве сырья, так и источника энергии; наилучшие достигнутые показатели удельных энергозатрат сейчас весьма близки к стехиометрическому минимуму, равному 20,9 ГДж/т (Smil, 2001; Wortell и соавт., 2008).

Важнейшее новшество появилось после 1963 года с изобретением и внедрением центробежных компрессоров: работавшие от электричества поршневые компрессоры расходовали 520–700 кВт·ч на тонну NH_3 , а паровые турбинные центробежные компрессоры — всего 20–35 кВт·ч — на 95% меньше. Конверсия под высоким давлением (более 3 МПа) стала еще одной важной инновацией 60-х гг.; к 70-м комбинирование этих двух изобретений позволило снизить расходы энергии до 35 ГДж на тонну NH_3 . Сочетание новых конструкций установок, более высокая эффективность отдельных рабочих процессов, а также улучшенные катализаторы — все это обеспечило снижение энергоемкости до 27 ГДж/т NH_3 к 2000 году. Когда Уоррелл и соавт. (Wortell и соавт., 2008) проводили свой анализ передовой промышленной практики, они посчитали, что на синтез на основе природного газа тратится 28 ГДж/т (примерно на треть больше стехиометрического минимума), процесс на угле расходует 34,8 ГДж/т.

Естественно, обычно расход несколько превышает эти цифры, составляя около 30 ГДж/т NH_3 у газовых установок, 36 ГДж/т при использовании тяжелой топливной нефти в качестве сырья, более 45 ГДж/т при синтезе на основе угля (Rafiqul и соавт., 2005). МЭА (IEA, 2007) в своих расчетах использовала средние значения по регионам, от 48,4 ГДж/т в Китае до 35 ГДж/т в Западной Европе; средневзвешенное значение по всему миру в 2005 году было равно 41,6 ГДж/т. Таким образом, наиболее точный взвешенный показатель энергоемкости синтеза аммиака составил бы 45 ГДж/т в 2000 году, 40 ГДж/т в 2010. Преобразование NH_3 в $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (мочевину) расходует 10–12 ГДж на тонну азота, а гранулирование (изготовление небольших одинаковых шариков из расплавленных твердых веществ, которые затем пойдут на производство гранулированных удобрений), упаковка и дистрибуция этого соединения увеличивают совокупный расход энергии на это твердое удобрение до 55–58 ГДж/т.

Поверхностная добыча **фосфатов** затрачивает всего 4–5 ГДж/т, а вот обработка нерастворимых пород серной и азотной кислотами для получения водорастворимых фосфорных соединений — процесс значительно более энергоемкий. Совокупный расход энергии варьируется от 18 до 20 ГДж/т для суперфосфатов (простые суперфосфаты содержат всего 8,8% фосфора, тройные — 20%) до 28–33 ГДж/т для диаммонийфосфата с содержанием 20% растворимого фосфора (Smil, 2008). На добычу **калийных солей** (сильвинитов) энергии тратится немного: в Саскачеване их добывают традиционным способом, затем измельчают, и на все это уходит всего 1–1,5 ГДж/т; при поверхностной добыче и измельчении и вовсе тратят около 300 МДж/т (NRC, 2009).

Так как при производстве **кремния электронного качества** (электронного кремния) в основном используется электроэнергия, энергоемкость производствен-

ной цепочки в данном случае чаще выражают в киловатт-часах, а не мегаджоулях на килограмм; конвертация в первичную энергию зависит от источника электропитания. Кристаллы электронного кремния в миллиард раз чище, чем кремний, используемый в металлургии для раскисления и легирования (Föll, 2000). На получение Si металлургического качества из кварца тратится 12–13 кВт·ч/кг, сименсовский процесс расходует порядка 250 (200–300) кВт·ч/кг, процесс Чохральского — примерно столько же, а на выработку пластин из слитков затрачивается еще 240 кВт·ч/кг; всего, таким образом, получается примерно 750 кВт·ч. Фактические расходы же намного выше, так как на разных этапах производственной цепочки теряется значительная часть материала.

Выход Si при конверсии из кварца в материал металлургической марки составляет 90%, а по итогам сименсовского процесса — менее 50%. Процесс Чохральского, посредством которого из поликристаллического Si (на производство которого уходит не менее 400 МДж/кг) получают монокристаллический, расходует порядка 1 ГДж/кг электричества, общий расход составляет, таким образом, почти 1,5 ГДж/кг (Kato и соавт., 1997). Получение пластин из кристаллов Чохральского — процесс весьма расточительный, Si теряется как в верхней, так и в задней части слитка (из-за прорезей); немало Si остается в отходах от выращивания кристалла, а также расходуется на пробную нарезку пластин. Уильямс и соавт. (Williams и соавт., 2002) выяснили, что в результате на изготовление килограмма конечных изделий — микроциповых пластин — тратится 9,4 кг сырьевого Si.

То есть на протяжении всей производственной цепочки — от Si из кварца и углерода через трихлорсилан, поликремний, монокристаллические слитки, пластины до фактического производства и сборки микрочипа — на один двухграммовый чип тратится примерно 41 МДж энергии. То есть на отгружаемые пластины расходуются как минимум 2100 кВт·ч/кг. Даже если пользоваться только электричеством с ГЭС, пропорциональный расход составит примерно 7,6 ГДж/кг, а если все это электричество получать из ископаемого топлива, то совокупный расход первичной энергии превысит 20 ГДж на кг готовых пластин из Si, что на 2 порядка величины, выше, чем при производстве алюминия из бокситов, на три порядка выше по сравнению с получением стали из железной руды. Шмидт и соавт. (Schmidt и соавт., 2012) подробно проанализировали энергорасходы в течение всего жизненного цикла кремниевых пластин, используемых как в электронике, так и в солнечных батареях, однако выразили полученные ими значения в расчете на производственный час и на квадратный метр пластин.

Стандартные значения расхода, представленные в данном параграфе, можно (предварительно округлив во избежание возникновения впечатления мнимой и необоснованной точности) использовать в расчете общемировой потребности основных материальных производств в энергии, а также подсчитать отраслевые доли в ОСПЭ (превысивших 500 ЭДж) по состоянию на 2010 год (ВР, 2013). Неудивительно, что относительно высокая энергоемкость стали (25 ГДж/т) и масштабы ее производства (1,43 Гт в 2010 году, 1,5 Гт в 2011) выводят этот материал на первое место по энергозатратам среди металлов, на производство которых в 2010 году в совокупности ушло 50 ЭДж или 10% ОСПЭ. Далее идут пластмассы (около 25 ГДж/т, произведено в 2010 году 265 Мт), на получение которых потрачено примерно

20 ЭДж (4% ОСПЭ), что значительно больше затрат на строительные материалы (цемент, кирпич и стекло), составивших суммарно около 15 ЭДж или 3% ОСПЭ. Бумагоделательная промышленность израсходовала около 10 ЭДж, а на производство удобрений ушло менее 8 ЭДж; общая абсолютная энергоемкость перечисленных категорий материалов составила в 2010 году чуть более 100 ЭДж или 20% ОСПЭ. Для сравнения: по оценке МЭА (IEA, 2007) в 2005 году вся мировая промышленность израсходовала почти 88 ЭДж.

Бумага (вместе с картоном) находится примерно на одном уровне с алюминием — по обеим «статьям» потрачено почти 10 ЭДж (2% ОСПЭ), что обусловлено значительно более высокой энергоемкостью алюминия (175 против 25 ГДж/т) при меньшем совокупном производстве (53 против 400 Мт в 2010 году). Наиболее интересны, пожалуй, энергозатраты на получение неорганических удобрений: при том, что они важны для самого нашего существования, отрадно осознавать, что расход энергии на их производство на удивление мал и незначителен на общем фоне. Если исходить из средних значений энергоемкости 55, 20 и 10 ГДж/т у азота, фосфора и калия соответственно (с учетом затрат на окончательный состав, его упаковку и реализацию), то получится, что всего на производство удобрений в 2010 году ушло чуть больше 5 ЭДж (из них примерно 90% на азотные удобрения) — всего лишь около 1% ОСПЭ.

Должно быть, удобрения — одна из самых полезных энергоинвестиций в истории, так как без применения этих соединений мы не могли бы прокормить семи-миллиардное население; спешу также добавить, что по-прежнему большое число недоедающих в мире связано с неравномерной доступностью пищи, а не ее дефицитом. Еще одним интересным примером выгодных вложений энергии является производство кремниевых пластин. Как уже объяснялось ранее, их энергоемкость на несколько порядков превышает аналогичный показатель любого другого распространенного материала (составляет порядка 20 ТДж на тонну, для сравнения: энергоемкость стали равна примерно 20 ГДж/т); однако на одной и той же плате размещается все больше транзисторов, благодаря чему в 2009 году для производства всех микрочипов в мире оказалось достаточно всего 7500 тонн пластин; совокупные затраты энергии составили 150 ПДж — всего 0,03% ОСПЭ.

Из этих расчетов становится ясно, что современная цивилизация может позволить себе производство всех этих сталей, удобрений и микрочипов благодаря достижениям научного и технического прогресса, значительно снизившим энергоемкость. Если бы сталь до сих пор плавилась по тем же технологиям, что в 1900 году, то на производство 1,5 миллиарда тонн металла (показатель 2010 года) ушло бы почти 20% ОСПЭ, а не 6%. Еще сильнее впечатляет другая цифра: суммарные энергозатраты на производство стали, алюминия, бумаги, пластмасс и удобрений составили в 2010 году 90 ЭДж — примерно столько же, сколько в 1900 году ушло бы на получение 1,5 миллиарда тонн стали. Даже если весьма вольно оценивать энергоемкость других биоматериалов помимо бумаги, строительных материалов помимо цемента, металлов помимо стали и алюминия, совокупные энергозатраты не превысят 120 ЭДж, что меньше 25% ОСПЭ. Значит, на создание материального богатства современного мира уходит не более четверти всей потребляемой нами энергии.

4.6 Оценки жизненных циклов

Количественные оценки энергоемкости материалов полезны и показательны; они хороши как дополнение к стандартному массо-стоимостному анализу материальных потоков. Но не нужно долго размышлять, чтобы понять: даже сочетание массы, стоимости и энергии не дает достаточных оснований для сбалансированной и сознательной оценки, так как при таком анализе из виду упускается широкая категория воздействий на окружающую среду. Более того, такая оценка не должна ограничиваться затратами и влиянием на стадии производства, так как многие материалы становятся частью изделий или сооружений, служащих годами и десятилетиями; полностью их последствия можно оценить только в долгосрочной перспективе. Как заявляет ОЭСР, «все фазы организованной материи и энергии, каким-либо образом связанные с производством и использованием продукта, могут также быть ассоциированы с воздействием на окружающую среду» (OECD, 1995). Есть и научная дисциплина, которая занимается именно количественной оценкой показателей воздействия, которое тот или иной материал в течение всего срока своего существования оказывает на окружающую среду. Она называется оценкой (или анализом) жизненного цикла, ОЖЦ. Теперь это широко признанная процедура, которая была кодифицирована в рамках международных стандартов экологического менеджмента, используемых при оценке экологической нагрузки, связанной с производством, использованием, утилизацией или повторным использованием различной продукции, а также с предоставлением услуг (ISO, 2006 a, b). ОЖЦ уже стала полноценной и зрелой научной дисциплиной с собственным периодическим изданием, которое называется «Международный журнал оценки жизненного цикла» (англ. *International Journal of Life Cycle Assessment*), публикуется с 1995 года; также выпущено множество методологических указаний (Horn и соавт., 2009; Jolliet и соавт., 2013), также имеются обширные базы данных с перечнями жизненных циклов; такие базы ведут Национальная Американская лаборатория возобновляемой энергии (US National Renewable Energy Laboratory) (NREL, 2009; 2013a), Европейская комиссия (EC, 2009) и Швейцарский центр баз данных по жизненным циклам (Swiss Centre for Life Cycle Inventories) (Ecoinvent, 2013).

ОЖЦ может охватывать как полный цикл «от колыбели до могилы» (то есть от сырья до окончательной утилизации), так и частичный (то есть цикл жизни готовой продукции до ее дистрибуции на продажу). Базы данных с перечнями содержат информацию по входным и выходным потокам (то есть затратам и результатам производства) многих материалов, но если систематически оценить недавно опубликованные ОЖЦ (поиск которых лучше всего осуществлять на Web of Science), то сразу становится понятно, что выбор объекта оценки (продуктов или процессов) не определяется ни важностью того или иного материала для современной цивилизации (в таком случае в основном бы исследовались сталь, бетон и разного рода пластмассы), ни задачей оценить количественно наиболее тревожные ситуации (что привело бы к избыточному исследованию тяжелых металлов). Напротив, диапазон недавних исследований ОЖЦ весьма широк: ими охвачены наиболее распространенные сельскохозяйственные культуры, продовольствие, включая хлеб, молоко и томаты, системы производства энергии из возобновляемых источников (биомассы,

ветра и растительных масел), а также самые разнообразные изделия: от крошечных микрочипов и гранитных тротуаров до целых жилых или офисных зданий.

Очевидно, что результаты одних исследований будут достаточно долго оставаться актуальными, а в других случаях потребует частая переоценка: процесс получения стали непрерывным литьем с использованием доменных и конвертерных печей меняется не так быстро, как технологии производства потребительской электроники. ОЖЦ весьма полезна, но также имеет ряд проблем и нередко осуществляется весьма поверхностно или ограниченно. Конечно, наиболее очевидным полезным аспектом такой оценки является то, что она указывает о стоимости владения продуктом или изделием после его приобретения или установки, а также служит напоминанием о тех нередких ситуациях, в которых затраты на эксплуатацию или использование различной продукции и объектов инфраструктуры значительно превышают расходы на их создание (и связанное с этим влияние на окружающую среду); именно эта информация является ключевой при разработке стратегий рационального реагирования. Эти реалии хорошо иллюстрируются примерами из ОЖЦ различных объектов и процессов, от зданий и автомобилей до пошива и стирки одежды.

С учетом различий в размерах домов, а также в энергоемкости древесины, стали и бетона — трех основных конструкционных материалов в современном жилищном строительстве — не вызывает удивления тот факт, что пожизненные энергозатраты на строительство, поддержание, эксплуатацию и снос жилых строений могут различаться трехкратно, составляя от 3 до 9 ГДж/м². Неудивительно и то, что энергоемкость дома на одну семью может составлять от 200 ГДж у небольшой деревянной постройки до 500 ГДж (средний показатель для данной категории вообще) у бунгало с деревянным каркасом и тремя спальнями, или вовсе превосходить 2 ТДж у больших домов или двухэтажных особняков (Canadian Wood Council, 2004; Smil, 2008). Стремление к экономии энергии в доме путем контроля температуры, вентиляции и уровня влажности привело к ужесточению строительных норм и правил, а также к применению широкого спектра изоляционных материалов. Стекловолокно, пенопласты, засыпная изоляция из растительных волокон и целлюлозы — все это повсеместно используется для изоляции стен и потолков; пластиковые листы и пленки защищают от влаги, а газобетон и гипсовые плиты позволяют снизить уровень шума.

Как и следовало ожидать, из ОЖЦ жилых домов в зонах с холодным климатом становится ясно: энергоемкость строительства очень мала на фоне общих затрат энергии за время эксплуатации дома. ОЖЦ трех типов жилых зданий (с бетонными, стальными и деревянными каркасами) Пекина (где летом жарко, а зимой очень холодно) демонстрируют следующую тенденцию: энергоемкость зданий не превышает 13–27% от суммарных затрат энергии за время эксплуатации (Gong и соавт., 2011). Даже если взять большой канадский дом площадью 200 м², то на его постройку уйдет примерно 1,5 ТДж, а вот на обогрев и освещение (около 25 Вт/м²) за 60 лет израсходуется примерно 9,5 ТДж, то есть доля строительства в общих энергозатратах составит всего 14%. Совпадение или нет, но такая же доля отмечается у среднегабаритных американских автомобилей: на производство уходит около 100 ГДж, а вот при расходе 8 литров на 100 км и годовом пробеге 20 000 км, за 10 лет авто израсходует порядка 550 ГДж энергии, полученной из топлива и масла — то есть изначальный выпуск машины затрачивает всего около 15% общих энергозатрат

(и даже меньше, если включить в расчеты ремонт и содержание в гараже) (Smil, 2008). Относительная энергоемкость оказывается еще ниже в жизненных циклах транспортных средств непрерывной эксплуатации, составляя 6–7% от общих энергозатрат у реактивных самолетов, товарных поездов и грузовых судов (Allwood и Cullen, 2012).

Однако разграничение первоначальных и эксплуатационных расходов не всегда однозначно. В нескольких ОЖЦ их авторы пришли к выводу, что на эксплуатацию персонального компьютера или ноутбука энергии расходуется существенно больше, чем на его производство — полученное соотношение составляет от 74:26 до 93:7 (Andrae и Andersen, 2010). При этом Уильямс (Williams, 2004) получил совершенно противоположную картину. Согласно его анализу, на производство настольного ПК с процессором Pentium III, 30-гигабайтным жестким диском и монитором с диагональю 42,5 см уходит 6,4 ГДж энергии, при этом за свой трехлетний срок службы такая система расходует примерно 420 кВт·ч электричества или примерно 1,5 ГДж первичной энергии, то есть соотношение затрат на производство и эксплуатацию составляет 81:19. Если же взять компьютер, эксплуатируемый в Швейцарии, то такое соотношение составит 46:54 (Ecoinvent, 2013).

Из ОЖЦ также видно, что расходы поддержание и обслуживание многих инфраструктурных объектов в течение срока их службы могут превышать затраты на их строительство. Например, в Канаде, чтобы построить бетонное шоссе с двумя полосами (в каждую сторону) с расчетом на высокую транспортную нагрузку, расходуют порядка 6,7 ТДж/км, ремонт обходится в 4,1 ТДж/км, что составляет 38% от общего расхода 10,8 ТДж/км за 50 лет; однако совершенно другое распределение энергозатрат наблюдается в отношении дорог из гибкого асфальтобетона: 15 ТДж уходит на строительство одного километра, на 16% больше (17,4 ТДж/км) — на ремонтные работы в течение 50 лет (Cement Association of Canada, 2006).

Еще одной отличной иллюстрацией проблемы определения границ, отмеченной в начале параграфа об энергозатратах, являются ОЖЦ многократно стираемой одежды, так как изделия из разных материалов различаются в плане долговечности и правил ухода за ними; в итоге полный учет таких реалий может привести к тому, что предпочтительным окажется не дешевый материал, а более энергоемкий, ведь энергозатраты на уход за изделием из более качественных материалов могут в целом быть существенно ниже. Вся Америка носит рабочие рубашки с коротким рукавом (65% ПЭ, 35% хлопок); оценка жизненного цикла такой рубашки, постиранной 52 раза и затем выброшенной, показывает, что из всех связанных с ней энергозатрат на пошив изделия приходится 36%, 26% CO₂-эквивалента, 24% затрат воды (Cartwright и соавт., 2011).

Сравнительно-сопоставительный анализ тканей из 100% хлопка, хлопка/полиэстера и 100% полиэстера, проведенный ван Винкле и соавт. (van Winkle и соавт., 1978), стал одним из первых исследований затрат энергии с включением ОЖЦ. Исследователи обнаружили, что на производство полиэстера уходит в два раза больше энергии, чем на производство хлопкового волокна (очевидное преимущество хлопка), однако из-за более высоких расходов на изготовление ткани и пошив одежды общая энергоемкость футболки из хлопка на 20% выше, чем аналогичный показатель такой же футболки из чистого полиэстера; а если учесть энергозатраты на уход —

стирку, сушку, глажку — то хлопковая футболка окажется в 3,6 раза более энергоемкой (очевидное преимущество полиэстера). Схожим образом в соответствии с ОЖЦ, выполненной Каллиалой и Ноусийненом (Kalliala и Nousiainen, 1999), энергозатраты на простыни из чистого хлопка (100 циклов стирки) оказываются на 72% выше затрат на простыни из 50% хлопка и 50% полиэстера, так как последними может пользоваться в два раза дольше.

Хлопок оказывается в еще более невыгодном положении при учете неэнергетических факторов: так, расход воды на производство и использование изделий из смеси «хлопок-полиэстер» составляет менее трети аналогичного показателя чистого хлопка; с точки зрения глобального потепления и подкисления совокупное воздействие производства и стирки простыни из смеси на 38% ниже, чем то же значение для двух простыней из чистого хлопка. Можно пойти еще дальше и проанализировать долгосрочные затраты в связи с эрозией почв в хлопковых полях; качество почвы снижается из-за засоления орошаемых полей в засушливых регионах; кроме того, в почвах и водах остаются пестициды (Smil, 2008). Этого можно избежать, если пользоваться синтетическим волокном, однако для его производства нужно невозобновляемое сырье. Но то же самое касается выращивания хлопка: синтез ПЭ расходует примерно 1,5 кг углеводов на килограмм волокон, однако для получения килограмма хлопка приходится тратить почти 500 г удобрений и 15 г пестицидов, также производимых из углеводородного сырья; кроме того, используемые сельскохозяйственные машины заправляются жидким топливом, производимым из ископаемого сырья. Кроме того, во всех этих сравнительно-сопоставительных исследованиях из внимания упущен один важный момент, а именно — потребительские предпочтения. Неужто превосходное качество хлопковой одежды не следует учитывать?

Кроме того, если на основе ОЖЦ сравнивать экологические последствия производства и эксплуатации различных изделий, то их вес, используемый в качестве общего знаменателя, может ввести в заблуждение. Поэтому Шэдман и Макманус (Shadman и McManus, 2004, 1915) посчитали выполненный Уильямсом и соавт. (Williams и соавт., 2002) анализ энергоемкости и материальных затрат производства микрочипов не вполне корректным, заявив, что сравнение на основе одного только веса «ненаучно, неточно и произвольно», так как в таком анализе «не учитываются производительность, полезность и преимущества» сравниваемых продуктов. Конечно, с фундаментальной точки зрения это всего лишь очередной пример упущения качественных характеристик — один из недостатков, присущих ОЖЦ на основе массы.

Однако ОЖЦ позволяют сравнивать экологические последствия в пределах одной и той же категории (то есть там, где это возможно, выбрать материал с наименьшим загрязнением воды или наименее вредным и расточительным ее расходом), а также формировать всеобъемлющий рейтинг материалов по нескольким категориям воздействия на окружающую среду. Это важно, так как использование материалов является одним из трех процессов человеческой деятельности, вызывающих значительные изменения в биосфере. Двумя другими процессами являются производство продуктов питания и поставка энергии (где в основном господствуют добыча и сжигание ископаемых видов топлива). Если же рассматривать в комплексе, то замысловатая система добычи, переработки, транспортировки, использования, по-

вторного использования и утилизации материалов охватывает все значимые типы воздействия на окружающую среду, начиная с изменений в землепользовании (от обезлесения ввиду заготовки древесины и производства целлюлозы до разрушения растительного покрова и нарушения круговорота воды из-за массовой поверхностной добычи руд) и заканчивая выбросами в атмосферы (от окисляющих газов до антропогенного потепления).

Должен подчеркнуть, что составить рейтинг разных видов воздействия человека на окружающую среду невозможно, так как они различаются самим своим механизмом, качественными последствиями (включая физические изменения, химические преобразования, влияние на структуру и функционирование экосистем), пространственным воздействием (от местного до глобального) и длительностью (от краткосрочных эффектов до тех, которые будут сохраняться тысячелетиями). Нет такой единой метрики, которая позволила бы заявить, что эрозия почвы более критична, чем фотохимический смог, а вырубка тропических лесов куда страшнее, чем чрезмерный расход воды на ирригацию в современном сельском хозяйстве. Очевидно и то, что было бы крайне непрактично производить анализ жизненных циклов с попыткой количественно оценить все известные виды экологического воздействия. Именно поэтому в большинстве исследований используется небольшое число основных показателей изменения или ухудшения состояния окружающей среды.

Расчет общего потенциала глобального потепления (ПГП) — относительного показателя интенсивности поглощения конкретными парниковыми газами (ПГ) исходящего земного инфракрасного излучения, а также показателя времени сохранения таких газов в атмосфере — являются общим компонентом многих недавно проведенных ОЖЦ. Все ПГ оцениваются относительно CO_2 , ПГП которого приравнивается к 1 (IPCC, 2007). Значения двух других основных ПГ составляют 21 у CH_4 и 310 у N_2O , наибольшим эквивалентом отличаются SF_6 (гексафторид серы, используется как электроизоляция) — 23 900, и C_2F_6 (перфторэтан, используется в производстве электроники) — 11 900. Очевидно, что если упустить значения данных выбросов или недооценить их, то окончательный результат расчета будет искажен. ПГП обычно выражают в эквиваленте CO_2 на единицу массы материала (кг CO_2 -эквивалента на кг), однако в отношении зданий данные значения могут пересчитать на единицу площади (кг CO_2 на m^2).

Расчет начинается с выражения удельных выбросов в тоннах $\text{CO}_2/\text{ТДж}$ энергии; МГЭИК по умолчанию рекомендует использовать следующие значения: 56,1 для природного газа, 73,3 для сырой нефти, 94,6 для битуминозного угля, 101,02 для лигнита, однако фактические значения в пределах государства или даже региона могут различаться на несколько процентов у углеводородов, более чем на 10% у твердого топлива. Так, показатели европейского лигнита варьируются от 90,7 до 124,7 тонны CO_2 на ТДж (Herold, 2003). Так как CO_2 обычно вносит наибольший вклад в загрязнение атмосферы, именно этот показатель отличается высокой корреляцией с массой ископаемых видов топлива, затраченных в первоначальном производстве. Например, при производстве одного кг цемента в атмосферу выбрасывается порядка 0,5 кг CO_2 , а вот при изготовлении килограмма горячекатаной листовой стали из ископаемого топлива высвобождается уже порядка 2,25 кг CO_2 (NREL, 2013b).

Двумя другими часто оцениваемыми переменными являются подкисление и эвтрофикация. Выбросы серных и азотных оксидов при сжигании ископаемого топлива, выплавке руд и иной промышленно-производственной деятельности являются прекурсорами атмосферных сульфатов и нитратов, которые, откладываясь в жидком и сухом виде, способствуют подкислению вод и почв. В ОЖЦ потенциал подкисления различных продуктов или процессов рассчитывается в граммах водород-ионов на квадратный метр ($\text{г Н}^+/\text{м}^2$) или единицу объема воды ($\text{г Н}^+/\text{л}$). Эвтрофикация — процесс обогащения пресных и прибрежных вод питательными веществами, в основном за счет выброса и выщелачивания нитратов и фосфатов), что приводит к чрезмерному росту водорослей, разложение которых уменьшает концентрацию растворенного в воде кислорода и приводит к появлению бескислородных зон, из-за чего погибают или страдают гетеротрофные формы жизни (Harper, 1992). В ОЖЦ такое воздействие обычно выражают в килограммах PO_4^{3-} эквивалентов. Пожалуй, реже всех прочих в ОЖЦ включают такую переменную, как потенциал смогообразования, выражаемый в граммах NO_x на квадратный метр.

Как уже объяснялось в предыдущем параграфе, на производство материалов тратится примерно четверть всех мировых поставок первичной энергии. Так как большую часть этой энергии получают сжиганием ископаемых видов топлива (около 87% по всему миру в 2010 году), а остальная доля приходится на первичное электричество, преимущественно от ГЭС и АЭС (BP, 2013), производство материалов является основным источником выбросов твердых частиц (включая технический углерод), SO_x и NO_x (превращение которых в сульфаты и нитраты является главной причиной кислотных дождей), а также ПГ. Вода, необходимая для обработки, реакций, а также охлаждения в ходе производства, в конечном счете оказывается загрязненной или выпускается при повышенных температурах; кроме того, многим предприятиям приходится утилизировать большие количества твердых отходов, а также малые, но также вызывающие беспокойства объемы опасных отходов. К счастью, у общих экологических проблем имеются и общие (а точнее, универсальные) решения. В то же время есть и специфические трудности, связанные с уникальными физическими или химическими свойствами особенно сложных промышленных процессов.

Во многих исследованиях предлагаются либо достаточно полные и подробные экологические профили материалов (включая, где применимо, оценку их ПГП, потенциала подкисления, расхода и загрязнения воды), либо сравнение конкретных последствий (причем в последнее время предпочтение отдается оценке ПГП, что неудивительно). Далее я вкратце опишу то, как некоторые наиболее распространенные материалы воздействуют на окружающую среду. При производстве килограмма стандартных строительных стальных секций вырабатывается примерно 1,5 кг CO_2 -эквивалента, 50 г SO_2 эквивалента (мера потенциала подкисления), при этом создается совершенно незначительный потенциал эвтрофикации (0,36 г); также производится всего 0,8 г этана, вызывающего фотохимический смог (WSA, 2011b).

На производство килограмма ПВХ тратится 60 МДж энергии, 10 кг воды (за вычетом расхода на охлаждение), при этом вырабатывается 1,9–2,5 кг CO_2 -эквивалента, 5–7 г потенциала подкисления (выражается в SO_2), 0,6–0,9 г потенциала нитрификации (PO_4), почти 0,5 г этана (мера генерации фотохимического озона), 0,4–0,8 г отходов в виде твердых частиц, 5–8 г опасных отходов (Sevenster, 2008).

Что мне больше всего нравится в ОЖЦ, так это их результаты, зачастую весьма интересные и противоречащие здравому смыслу. Какие тротуары меньше влияют на окружающую среду: плита из природного гранита или бетонный тротуар? Мендоза и соавт. (Mendoza и соавт., 2012) пришли к выводу, что экологическое воздействие гранитного тротуара примерно на 25–140% сильнее, чем у бетонного, причем это обусловлено в основном затратами энергии на резку и перемещение камня. У какой упаковки для перевозки фруктов и овощей CO_2 -эквивалент будет ниже: у обычных легких (менее 1 кг) одноразовых деревянных ящиков, которые, очевидно, сделаны из возобновляемого материала, при этом затраты энергии на их производство можно частично скомпенсировать сжиганием? Или у еще более легких одноразовых картонных коробок, которые можно сжечь или переработать? Или все же у гораздо более тяжелых (2 кг) многоразовых пластмассовых ящиков, которые приходится мыть после каждого использования? При шкалировании их показателей до 10 оборотов тары на человека в год оказывается, что ППП пластмассовых ящиков на 10% ниже, чем у деревянных и составляет менее половины аналогичного показателя картонной упаковки; при шкалировании до миллиона оборотов тары в год пластиковые ящики генерируют порядка 332 кг CO_2 -эквивалента, деревянные — около 367 кг, картонные — примерно 708 кг (University of Stuttgart, 2007).

Еще один парадоксальный результат был получен в недавнем тайском исследовании ЖЦ одноразовых термоформованных коробок, часто используемых для упаковки пищевых продуктов (Suwanmanee и соавт., 2013). Исследователи сравнили ящики из полистирола (ПС), полученного из углеводов, с ящиками из полимолочной кислоты (ПМК), производимой из кукурузы, маниона или сахарного тростника; исходя из материальных и энергетических затрат, свойственных данной стране, они вычислили три показателя экологического воздействия: ППП (рассчитан на основе прямых выбросов ПП и непрямых выбросов, связанных с изменениями в землепользовании), потенциал подкисления и выработку фотохимического озона. Обобщенное экологическое воздействие ящиков из ПС оказалось гораздо более низким, что прежде всего связано со значительным косвенным эффектом выращивания кукурузы и маниока. Хотя пластмассы относительно энергоемки, ОЖЦ с расчетом энергозатрат и ППП европейских пластмасс ясно дает понять, что при их замене на другие материалы потребуется дополнительно 53 миллиона тонн сырой нефти, а выбросы увеличатся на 124 миллиона тонн CO_2 -эквивалента (Pilz и соавт., 2010).

Однако иногда природные материалы предпочтительны, что весьма очевидно в случае биоматериалов. Так, Болин и Смит провели комплексное исследование (Bolin и Smith, 2011) и выяснили, что при использовании настилов из деревянно-пластиковых композитов расход ископаемых видов топлива оказывается в 14 раз выше, выбросы ПП — в 3 раза больше, расход воды — в 3 раза, потенциал подкисления — в 4 раза, смоговый потенциал и экотоксичность — в 2 раза выше, чем при использовании обычных настилов из древесины, обработанной щелочной медью. Достоинства биоматериалов наиболее важны в долговечных строениях; многими исследованиями были показаны экологические преимущества деревянных зданий и строительных компонентов.

Так, если в строительстве крыши использовать клееный брус, то энергоемкость составит всего около 500 МДж на m^2 крыши; если использовать стальные балки

из переработанного металла, что тот же показатель достигнет значения не менее 1 ГДж/м^3 , а при использовании стали, полученной из выплавленного в доменных печах железа — и вовсе составит $1,6 \text{ ГДж/м}^3$ (Petersen and Solberg, 2002). Схожим образом можно отметить гораздо более низкую энергоемкость деревянных полов по сравнению с альтернативными вариантами: на уход за 1 квадратным метром деревянных полов тратится $1,6$ МДж (обычно такие полы делаются из дуба или клена); для линолеума и винила эта цифра равняется $2,3$ и $2,8$ МДж, соответственно (Jönsson и соавт., 1997). В еще одном исследовании обнаружилось, что доска из твердого дуба превосходит не только линолеум и винил, но также и полиамидные и шерстяные ковры (Petersen и Solberg, 2004).

Из ОЖЦ видно, что выбросы ПГ у деревянных строений значительно (до 65%) ниже по сравнению со зданиями из железобетона (как сборного, так и монолитного); аналогичной экономии можно достичь также в случае с напольным покрытием или мебелью. Эрикссон (Eriksson, 2004) сравнил разные дома в Швеции и продемонстрировал экономию энергии и сокращение ПГП на их примере. Так, на строительство четырехэтажного дома на деревянном каркасе уходит 960 МДж/м^2 энергии, но если вычесть вторичную энергию (которую можно получить при переработке материала) — 1460 МДж/м^2 , то затраты оказываются отрицательными, так как фактически мы приобретаем 530 МДж/м^2 ; для сравнения: чистые энергозатраты на строительство дома из бетона составляют 1770 МДж/м^2 ; ПГП равен (за вычетом эксплуатации) 30 и 400 кг CO_2 -эквивалента на м^2 , соответственно. Кроме того, если увеличить долю древесных пиломатериалов в типичном шотландском жилом доме, то можно сократить выбросы ПГ на 75% за все время эксплуатации такого здания, если речь идет о небольшом двухквартирном домике, а в случае с большим отдельным домом — до 86% (Edinburgh Centre for Carbon Management, 2006). Более того, древесина, которую можно собрать после сноса дома или утилизации старой мебели, позволяет выработать гораздо больше энергии, чем было потрачено на ее производство.

Еще одним преимуществом «контролируемых» лесопосадок и плантаций является выделение ими кислорода и поглощение углерода; если рубить деревья по плану и проводить оперативную повторную посадку, то такие плантации смогут долго служить нам в качестве углеродных резервуаров. Что еще более важно, адекватное лесохозяйственное управление может увеличить объемы фитомассы и годовую продуктивность естественных лесов, что видно из почти векового опыта Финляндии. В южной части страны имеется специальный периодически исследуемый район, где древостой с 1912 по 2005 год увеличился в 2,15 раза, при этом в среднем один кв. км леса поглощает за год около 30 тонн углерода (Kauppi и соавт., 2010). Кроме того, за исключением тех случаев, когда срубленное в естественном лесу дерево идет на уголь или топливо, его эффект углеродопоглощения можно продлить на многие десятилетия после изготовления конструкционных пиломатериалов или мебели (Berge, 2009). Неудивительно, что типичный срок службы деревянных изделий может сильно различаться, при этом наибольший разброс наблюдается именно в строительной древесине (Lauk и соавт., 2012). Пиломатериалы служат менее двух десятилетий в мобильных домах, но могут легко прослужить 80–100 лет в составе хорошо построенного американского или канадского деревянного дома. Срок службы деревянной мебели обычно намного короче, 10–30 лет; два десятилетия можно назвать хоро-

шим средним показателем. Деревянная упаковка (ящики, коробки, поддоны) может подвергаться незамедлительной утилизации или повторно использоваться в течение нескольких лет; то же самое касается упаковочной бумаги и картона (от одного до шести лет, в среднем два-три года). Постоянством также отличаются некоторые элементы дома (лестницы, двери, дверные и оконные рамы, полы), бочки и бочонки под вино и спиртные напитки, специальная древесина, из которой изготавливают музыкальные инструменты и спортивный инвентарь, а также деревянные игрушки и паззлы (небольшая, но весьма полезная ниша).

Но, как и в случае с прочими разновидностями комплексного анализа, при обращении к ОЖЦ следует проявлять осторожность, ведь у таких оценок имеется множество проблем и недостатков; зачастую всесторонний учет «от колыбели до могилы» провести все равно не удается. Одна из очевидных проблем связана со сравнением материалов, изготавливаемых из сырья с высоким содержанием энергии, с материалами, энергоемкость которых обусловлена исключительно топливом и электричеством, потраченным в производстве. Например, согласно ОЖЦ энергоемкость дороги из гибкого асфальтобетона в два раза выше аналогичного показателя жесткого бетона из портландцемента, однако эта разница обусловлена практически исключительно энергосодержанием сырья (Cement Association of Canada, 2006). Асфальт (битум) представляет собой смесь тяжелых углеводородов с высокой энергетической ценностью (40 ГДж/т), однако не может использоваться в качестве источника энергии и является побочным продуктом нефтепереработки, при этом затраты энергии на его производство составляют всего 0,5–6 ГДж/т, что, как правило, не превышает тот же показатель портландцемента. Следовательно, было бы логичнее сравнивать только энергозатраты на производство этих двух видов покрытия, и при таком подсчете результаты будут примерно одинаковы.

Примечательно, что многие ОЖЦ отличаются весьма небрежным подходом к замеру самого срока службы тех или иных материалов; зачастую безо всякого обоснования принимаются кажущиеся адекватными сроки эксплуатации, названные в предыдущих исследованиях. Наиболее заметен такой подход в исследованиях зданий, долгий срок службы которых может означать весьма неточную оценку последствий их эксплуатации, если такая оценка основывается на произвольных допущениях. Современные здания, как правило, должны эксплуатироваться от 50 до 100 лет (по заявляемому сроку службы), однако нынешние дома и торговые помещения, по факту, могут простоять всего лишь 12–50 лет при регулярном (особенно в отношении магазинов) капитальном ремонте. Акташ и Билек (Aktas и Bilec (2012) оценили среднестатистический срок службы жилых строений в Америке и пришли к выводу, что он составляет 61 год при среднеквадратичном отклонении 25 лет. В том исследовании были определены сроки службы основных элементов дома: краска на стенах сохраняется примерно 7 лет, ковры — 10 лет, линолеумные и виниловые полы — 22 года, полы и отделка из твердых сортов древесины — 42 года, керамика — до 48 лет.

Ошибки также возникают из-за принятия обобщенных значений вместо определения специфичных потоков. Лучше всего, пожалуй, эту проблему иллюстрирует промышленное производство, которое во многих все еще развивающихся странах, а также Китае до сих пор крайне неэффективно. Согласно ОЖЦ выбросов ПГ при производстве первичного алюминия в Китае, в 2003 году на тонну металла выраба-

тивалось 21,6 тонны CO₂-эквивалента, что на 70% выше среднего значения по миру за 2000 год (Gao и соавт., 2009). Однако важнейшим недостатком ОЖЦ является тот факт, что во многих случаях до сих пор речь идет об усеченной, неполной оценке, и лучше всего это видно на примере пластмасс.

Поверить в это, пожалуй, будет нелегко, особенно после ознакомления баз данных ЖЦ по основным синтетическим соединениям; так, в базе данных Национальной лаборатории возобновляемой энергии (NREL, 2013a) содержится количественная оценка результатов производства ПЭВП, охватывающая примерно 220 химикатов, включая органику (от ацетона до фталатов), тяжелые металлы, радионуклиды и ПГ. В некоторых из опубликованных ОЖЦ по конкретным видам пластмассы и конкретным обстоятельствам их производства и применения, как, например, в процитированной ранее работе Суванмани и соавт. (Suwanmanee и соавт., 2013), учитываются даже косвенные последствия изменений в землепользовании, вызванных культивацией растений с целью получения возобновляемого сырья. Однако никакая ОЖЦ не учитывает долговечность некоторых пластмасс (могут храниться сотни лет), а также их повсеместное и, очевидно, весьма разрушительное присутствие в водной среде.

Плавуность, распад на все более мелкие частицы, а также постепенное опускание сквозь толщу воды на дно океана — все это в совокупности представляет действительно глобальный и повсеместный экологический риск для морской биоты. Пластмассу обнаруживают даже на самых удаленных островах, во впадинах, однако наибольшая концентрация наблюдается в поверхностных водах и на пляжах (Moore, 2008; Varnes и соавт., 2009). Масштабы этой новой разновидности деградации окружающей среды стали понятны после обнаружения пластмассовых отходов в тихоокеанском водовороте; открытие совершил в 1997 году Чарлз Мур вместе со своим экипажем, возвращаясь из транс-тихоокеанской парусной гонки; вскоре данное новообразование стало известно как «большое тихоокеанское мусорное пятно» (Moore и Phillips, 2011). Согласно более поздним оценкам каждый год в океаны попадает не менее 6,4 миллиона тонн пластмассовых отходов; каждый день выбрасывается примерно 8 миллионов кусочков пластика; пластикового мусора в океане плавает больше 13 тысяч единиц на кв. км водной поверхности; примерно 60% всего морского мусора попадает туда в результате деятельности на суше (UNEP, 2009).

Кроме того, если судить по последним оценкам, то, несмотря на многочисленные попытки ограничить такую всепланетную деградацию, мусор продолжает накапливаться (STAP, 2011). Для жителей океана любой кусок выброшенной пластмассы, независимо от своего размера, представляет опасность. Рыбы, дельфины, порой даже киты путаются в выброшенных или поврежденных сетях; водоплавающие птицы принимают маленькие кусочки пластика за рыбу или беспозвоночных и отрыгивают их в попытках накормить своих птенцов: такие объекты стали часто находить в желудках представителей многих видов. Маленькие частицы пластика (менее 5, 2 или 1 мм), используемые в производстве косметики, лекарств, в иной промышленности, а также появляющиеся в результате истирания и разложения под воздействием света (фотодеградации) больших кусков, могут проглатываться морскими обитателями, что приводит к серьезным отравлениям и плохо сказывается на их метаболизме

(Cole и соавт., 2011). Неизбежно происходит накопление микрочастиц пластмассы на береговых линиях, где они представляют угрозу прочим организмам (Browne и соавт., 2011).

Этот важный пример хорошо демонстрирует неполноту и неточность даже лучших методик анализа, используемых с целью оценить затраты и последствия производства, использования и утилизации материалов; он также служит серьезным доказательством необходимости более рационального использования материалов; очевидно, что ключевым компонентом таких мер является переработка. Если же поближе взглянуть на переработку материалов, то можно обнаружить огромные и без каких-либо понятных причин игнорируемые возможности, но также и вполне очевидные проблемы (включая некоторые факты, кажущиеся весьма нелогичными). Переработка — это весьма практичный и эффективный инструмент, и использовать его стоит как можно шире, однако масштабы его применения следует определять с большой осторожностью, чтобы избежать пустых трат материалов.

4.7 Переработка

Переработка — это поток, закрывающий цикл движения материалов; собственно, именно за счет переработки однонаправленное движение от добычи к производству, эксплуатации и утилизации становится циклом. Так функционирует сама биосфера: без биогеохимических циклов Земля не смогла бы обеспечить все формы жизни на ней водой, углеродом и азотом. Если же говорить о цивилизации, ежегодно расходуемой миллиарды тонн материалов, то очевидно, что переработка весьма полезна и желательна; за ее счет можно значительно продлить срок эксплуатации известных запасов полезных ископаемых, снизить потребность в новых биоматериалах, а также гораздо дольше пользоваться теми материалами, из которых изготавливаются промышленные товары. Не менее полезно и сокращение энергоемкости (расход энергии на единицу продукции может различаться на порядок величины), что существенно ослабляет негативное воздействие производства и бездумного выбрасывания материалов на окружающую среду.

Термин «переработка» охватывает несколько результатов обозначаемой им деятельности. Переработка материалов может заключаться в повторном использовании целого изделия или его компонента, восстановлении оригинальных составных частей путем разделения, дробления или плавки выброшенных изделий, а также сжигании собранных материалов для выработки тепла или электричества. Материалы могут использоваться повторно как в том виде, в котором их собрали (самым распространенным примером такой практики являются, пожалуй, кирпичи), или после минимальных восстановительных процедур (древесина снесенных старых зданий часто идет на новые пиломатериалы). Как правило, переработку производят, чтобы восстановить первоначальные составляющие перерабатываемого предмета, которые затем могут как использоваться самими перерабатывающими предприятиями, так и продаваться другим предприятиям в качестве сырья. При переработке металлов количество отходов минимально, а получаемый материал по качеству (почти) не отличается от оригинальных, «первичных» металлов. Однако чаще всего переработка

приводит к снижению качества. Так, из превосходной изначально бумаги получают упаковочную, из дорогих пластмасс — дешевую.

Наиболее привлекательными — и самыми изученными — преимуществами переработки являются экономия энергии и снижение негативного воздействия на окружающую среду. Затраты энергии на производство вторичной (переработанной) стали примерно на 75% ниже по сравнению с первичной; ОЖЦ распространенной стальной продукции (секций, горячекатаной бухты, горячеоцинкованной стали) демонстрирует очевидные преимущества переработки в виде 50%-ного снижения как ППП, так и потенциала подкисления (WSA, 2011b). Переработка алюминия дает еще больше преимуществ по сравнению со сталью — хотя эти преимущества не так существенны, как порой заявляют. Обычно считают, что переработка алюминия экономит до 96% энергии по сравнению с производством из бокситов, расходуя около 200 ГДж/т. Однако это утверждение верно только для плавки старого металла. На делакировку (удаление покрытий) тратится порядка 7 ГДж/т, на плавку — примерно столько же, добавление чистого алюминия для регулировки состава сплава затрачивает еще около 8 ГДж/т, на производство контейнеров (литье, прокат, формование, формирование подушки) — еще 30 ГДж/т, в итоге получается 52 ГДж/т, то есть по сравнению с первичным производством тратится не на 96, а на 74% меньше (Luo и Soria, 2008). Алюминиевые банки повсеместны, и значительная их часть отправляется на переработку, поэтому они стали объектом подробного анализа жизненного цикла в Японии (Mitsubishi, 2005) и США (PE Americas, 2010); в сравнительно-сопоставительных европейских ОЖЦ алюминиевые банки анализируются вместе с пивными бутылками (Green Delta, 2013).

Однако преимущества переработки не ограничиваются экономией энергии: она также снижает ППП, сокращает расходы воды, позволяет уменьшить загрязнение вод и воздуха. В работах Граймса и соавт. (Grimes и соавт., 2008) представлено множество сравнений по производству стали, алюминия и бумаги. Переработка бумаги расходует на 40% меньше энергии по сравнению с первичным производством, при этом вырабатывается на 45% меньше сточных вод, на 50% меньше твердых отходов (EPN, 2007). Экономия энергии, достигаемая переработкой высокоплотного полиэтилена, составляет 45–50%, в случае с ПВХ — 40–45%. Что касается выбросов ПП, то при производстве килограмма горячекатаной стальной бухты генерируется 2,2 кг CO_2 -эквивалента, а при переработке — только 1,8 кг, то есть выбрасывается на 0,4 кг CO_2 меньше; пластмассы в этом отношении еще результативней: переработка как ПП, так и ПВХ позволяет снизить выбросы на 2 кг CO_2 на килограмм; однако максимального сокращения выбросов (по сравнению с первичным производством) удастся добиться благодаря переработке алюминия, при этом разница составляет 10 кг CO_2 на кг алюминиевого лома (GHK, 2006).

Следует отметить, что переработка еще и весьма сложна в реализации (как из-за логистических проблем, так и ввиду чрезмерных затрат или незначительной экономии энергии); кроме того, в отличие от циркуляции атомов углерода или азота в биогеохимических циклах, повторное использование материалов нередко приводит к снижению качества. Некоторые проблемы переработки повсеместны, другие затрагивают только конкретные материалы. Очевидно, что проще всего осуществлять переработку отходов масштабного промышленного производства (будь то выплавка,

литье, механическая обработка металлов, производство пластмасс, стекла или бумаги) — и это самый дешевый и эффективный способ повторно использовать ценные отходы. В некоторых отраслях (прежде всего в сталелитейной и алюминиевой промышленности, а также в производстве изделий из пластмасс) производственные отходы являются одним из основных источников перерабатываемого материала.

Напротив, дороговизна процедур по сбору затрудняет переработку отходов с низкой пространственной плотностью, неоднородным качеством и разной степенью пригодности к переработке. Здесь в качестве примера отлично подойдет бумажный и пластиковый мусор, выбрасываемый из городских жилищ. Однако наибольшую сложность представляет переработка отходов производства электроники, которых становится все больше и больше, при этом, хотя по массе большую их часть составляет всего несколько видов пластмассы, несколько металлов и экранное стекло, такие отходы в целом содержат очень большое количество весьма разнообразных элементов.

Общий вывод об усилиях современного человечества по переработке отходов сделать несложно: до сих пор такие усилия были недостаточны по сравнению даже с тем, что можно было бы считать минимальными удовлетворительными мерами. Например, из 60 металлов и полуметаллов, включенных в отчет ООН, у более чем половины (включая все редкоземельные элементы, а также германий, селен, индий и теллур) коэффициент переработки составляет менее 1%; лишь для пяти элементов он находится в диапазоне 1–25%, а у 18 распространенных или относительно распространенных металлов превышает (по окончании срока службы изделий) 50%, однако редко оказывается выше 60% (Graedel и соавт., 2011). На нынешнюю эффективность и масштабы переработки можно взглянуть и под другим углом, а именно выразить массу вторичных материалов как долю от ежегодного производства за последнее время. Данный показатель для металлов окажется где-то в районе 30: согласно Международному бюро по переработке (Bureau of International Recycling, 2011) у цинка он равен 30%, у алюминия — 33%, у свинца — 35%, у стали — 37%, у меди — 40%. У Америки показатели переработки по расчетам за период 1998–2004 гг. сильно разнятся, превышая 90% у золота и серебра (97%), свинца (95%) и титана (94%), но при этом равняясь 19% у цинка и 15% у кадмия. В середине рейтинга оказываются железо и сталь (52% в среднем), медь (43%) и алюминий (42%) (Sibley, 2011).

Расчет количества металлов, доступного для переработки, зависит от оценок среднего срока службы металлических изделий. Например, алюминиевые изделия могут отправляться в утиль в год их выпуска (алюминиевые банки, прочие контейнеры, упаковочная фольга), однако в более долговечных изделиях этот металл сохраняется десятилетиями, а в конструкционных элементах, деталях машин и оборудования — более 30 лет (Natayama и соавт., 2009). К сожалению, степень переработки некоторых токсичных тяжелых металлов, попадание которых в окружающую среду крайне нежелательно, очень низка. Например, единственным относительно распространенным способом сбора кадмия на переработку является специализированная утилизация никель-кадмиевых батарей (которых удастся собрать совсем немного). Коэффициент переработки флуоресцентных ртутьсодержащих ламп также весьма низок.

Остаток этого параграфа (и главы) я посвящу кратким оценкам мер по переработке четырех материалов — двух ключевых металлов (стали и алюминия), пластмасс, бумаги, а также отходов электронной промышленности (именно она могла бы извлечь максимальную выгоду из переработки). Переплавка стали является наиболее масштабной среди вариантов переработки материалов, если судить по массе; достижение таких результатов упростилось за счет повсеместного присутствия данного металла, а также благодаря простоте его отделения от прочих отходов (осуществляется магнитной сортировкой) и идеальной перерабатываемостью: переплавленный металл по физическим свойствам не отличается от первоначального. В 2010 году стального лома было израсходовано 530 миллионов тонн, что эквивалентно более чем 37% всей необработанной стали.

Около 190 миллионов тонн (36% всего лома) были отнесены к категории, которую в промышленности называют «собственными» или «внутренними» отходами. Это лом, произведенный заводами и литейными в ходе выплавки, литья, проката и дальнейшей обработки металла (WSA, 2011a). Остальная часть (64%) стального лома закупается сталелитейными заводами, причем такой лом может быть импортным, в том числе привезенным с других континентов. Крупнейшими экспортерами в 2010 году стали США (около 20 миллионов тонн) и ЕС-27 (около 19 миллионов тонн). Около трети всего закупленного лома (110 миллионов тонн в 2010 году) составила новая сталь (так называемый производственный лом), остальное — старые металлические изделия (крупный лом).

Соотношение стального лома и необработанной стали внутри конкретных государств сильно варьируется, от 14% в Китае до 100% в Люксембурге, составляя 43% в Германии, 56% в ЕС-27, 68% в Польше, 79% в Италии; в 2010 году данный показатель у США, Японии и России равнялся, соответственно, 75, 35 и 32%, что в том числе говорит и о наличии в разных странах лома из старых стальных изделий и новой стали; в США лома стало значительно больше благодаря нескольким поколениям массового владения автомобилями и бытовыми приборами из металла. Переработка очень важна в производстве нержавеющей стали (легированной молибденом, титаном, ванадием и вольфрамом), спрос на которую постоянно растет.

Благодаря значительной экономии энергии алюминий стал самым перерабатываемым в мире металлом: около трех четвертей от 700 миллионов тонн алюминия, произведенного в мире с 80-х гг. XIX века, все еще находится в обращении, пережив уже по несколько реинкарнаций (AA, 2013). Общемировое производство переработанного алюминия (очищенного и переплавленного) достигло 8 миллионов тонн в 2007 году, составило 7,7 миллиона тонн в 2010, из них 4,3 миллиона тонн было произведено в Евросоюзе, что практически равно производству первичного алюминия, масса которого равнялась в том же году 4,4 миллиона тонн (ЕАА, 2013). Однако возможности переработки этого металла ограничены. Хатаяма и соавт. (Hatayama и соавт., 2009) подсчитали, что в течение ближайших десятилетий Япония, США, ЕС и Китай могут сократить расходы первичного алюминия до, соответственно, 60, 65, 30 и 85 процентов от уровня 2003–2005 гг., однако уже к 2050 году накопится порядка 12,4 миллиона тонн устаревшего алюминиевого лома, непригодного к переработке из-за высоких концентраций различных легирующих элементов.

Известно, что около 90% алюминия, использованного в производстве транспортных средств (в особенности самолетов) и в производстве строительных материалов (ОЕА, 2010), подвергается вторичной переработке, однако наиболее часто перерабатываемым изделием из этого металла является алюминиевая банка. Переработка алюминиевых банок в Америке — процесс, за которым следит Ассоциация алюминия (Aluminum Association, 2013) — колебалась от 50 до 58% в течение первого десятилетия XXI века, достигнув примерно 800 000 в 2011 году (по всей стране было собрано 58% банок). Однако этот высокий показатель обусловлен тем, что в числителе стоит сумма всего баночного лома — как американского производства, так и импортных банок — а вот в знаменателе указано только количество собственно американских банок; с учетом того, что США сейчас импортируют такие банки миллионами, более подходящим методом расчета, в поддержку которого выступает Институт исследований контейнеров (Container Research Institute, 2013), является учет только тех переработанных банок, которые изначально были произведены в США. Тогда показатель за 2010 год снижается с 58,1 до 49,6%.

Однако коэффициенты значительно выше в тех штатах США, которые взимают сбор за продажу контейнеров; если же сравнить разные страны по доле банок, отправленных на переработку в 2010 году, то первые три места займут Германия, Финляндия и Норвегия, в которых данный показатель равен 96, 95 и 93%, соответственно. Следует отметить, что во всех этих странах работает система залога за тару (ЕАА, 2012). Однако даже значения в 50–70% — наиболее частые показатели вторичной переработки алюминия у богатых стран — значительно превышают коэффициент сбора и возврата ПЭТ-бутылок. В США доля переработанных бутылок достигла максимального значения около 37% в 1995 году, а к 2000-ому упала до 25%, затем еще немного снизилась, в результате чего миллиарды бутылок оказались на свалках, улицах городов, дорогах, в лесах и на пляжах. Малый вес этих контейнеров вкупе с их разбросом серьезно затрудняет задачу по переработке, ведь чтобы получить 1 тонну вторсырья (то есть отходов, пригодных к переработке), нужно собрать 20 000 ПЭТ-бутылок.

Переработка пластмасс, как и следовало ожидать, позволяет снизить затраты энергии до 55–60 МДж/кг ПЭ, что экономит порядка 60–80% (Vlachopoulos, 2009), а также соразмерно сократить выбросы в окружающую среду. Однако сбор и обработка пластмасс — задачи значительно более сложные, чем повторное использование металлов и бумаги, потому что в отходах домохозяйств и учреждений содержатся смеси пяти основных полимеров (иногда один и тот же контейнер состоит из двух соединений, причем их соотношение может ощутимо варьироваться), которые приходится — уже потратив немало времени на сбор — разделять вручную. Правильно отсортировать такой мусор может быть непросто, но сделать это необходимо, ведь одна-единственная бутылка из ПВХ в куче из 10 тысяч ПЭТ-бутылок испортит весь расплав (ImpEE Project, 2013). После сортировки бутылки чистят (однако принты и этикетки удалить удастся не всегда) и сжимают до равноразмерных гранул, которые уже готовы к применению, но, как правило, только там, где не требуется высокое качество материала. Например, из них делают дешевые коврики, мусорные корзины, парковые скамейки.

Даже в Европе, с ее обилием как государственных нормативов, так и директив ЕС, показатели переработки остаются весьма низкими. Сбор пластмассовых потребительских отходов в Европе впечатляет: в восьми странах ЕС и Швейцарии удается собрать более 90% таких отходов, в среднем по ЕС-27 – 43% (25,1 миллиона тонн) по данным за 2011 год; однако более 40% (10,3 миллиона тонн) собранных пластмасс затем отправилось на свалку, а из оставшихся 14,9 миллиона тонн (60%) почти 9 миллионов тонн было сожжено (для получения энергии) и лишь 6 миллионов тонн (около 10% годового производства) — переработано (Plastics Europe, 2012). Конечно, энергосодержание у пластмасс достаточно высоко (как правило, 41–45 ГДж/т), и по этой причине лучше использовать пластмассы как источник энергии, а не отправлять их на свалку, однако в США, где в 2010 году мусоросжигающие заводы могли перерабатывать лишь 14% всех твердых бытовых отходов, от такого решения проблемы, как правило, отказываются (USEPA, 2011).

Практически везде имеются возможности увеличить долю перерабатываемых пластмасс. Бутылки из-под напитков (в наше время ставшие уже вселенской разновидностью отходов, которые портят вид и загрязняют собой как сушу, так и море) все так же толком не перерабатываются: в 2010 году на переработку ушло всего 28% бутылок из ПЭВП, 29% бутылок и кувшинов из ПЭТ (USEPA, 2011). В Евросоюзе собираемость варьируется от 5% (пластиковые пакеты и мешки) до 10% (пластиковые подносы, пленки, стрейч, оберточная пленка) и даже 25% (бутылки и контейнеры). В 2011 году в США было выброшено 1,7 миллиона тонн использованных ковриков, и несмотря даже на значительный прирост доли перерабатываемых ковриков, волокна которых разделяются механически, измельчаются, промываются и переплавляются, лишь 9% старых ковров стали частью новых изделий (CARE, 2012). Общий рекорд также оставляет желать лучшего: в 2010 году переработано было лишь 8% всех пластмасс в составе твердых бытовых отходов (USEPA, 2011). Схожая ситуация наблюдается и в ЕС, где почти 50% всех пластмасс оказывается на свалках, что примерно соответствует 12 миллионам тонн сырой нефти в год (Potočník, 2012).

Все богатые страны, а также Китай, в последние годы куда лучше — и, можно сказать, все лучше — справляются с переработкой бумаги. Мировой расход вторичного волокна вырос со 152 миллионов тонн в 2000 году до почти 224 миллионов тонн в 2010, что на 20% больше производстве первичного волокна, то есть примерно 55% всей бумаги и картона в мире в 2010 году было получено из переработанных материалов (Magnaghi, 2011). Ставшая уже привычной для Китая нехватка древесины привела к тому, что для производства бумаги стали использовать недревесное волокно (в основном солому), превращение которого в целлюлозу расходует меньше энергии; кроме того, Китай в значительной степени полагается на вторичную бумагу: почти 60% целлюлозы получают из недревесного волокна и импортированной макулатуры. С 2000 по 2010 год расход макулатуры в Китае вырос с 18 до 66 миллионов тонн, а ее импорт учетверился (BIR, 2011).

Сбор бытовых бумажных отходов стоит дорого, а для получения чистого волокна, пригодного для повторного использования, необходима тщательная обработка материала. Для этого бумагу сначала разделяют на волокна, очищают, удаляют все неволокнистые ингредиенты (чаще всего это клейкая лента, пластмассы, скрепки

и скобы); для производства белой бумаги необходимо также очистить макулатуру от чернил. Новые изделия можно производить полностью из такого вторичного волокна, но чаще его смешивают с первичным. Такая переработка уменьшает длину целлюлозных волокон, поэтому переработать бумагу больше 4–7 раз не получится. Наибольшим усердием в сборе и повторном использовании макулатуры отличается Япония.

В 1960 году японцы перерабатывали 34% бумаги, в 1985 — уже 50%, в 2010 — 78% (PRCP, 2012). С учетом того, что в знаменатель, используемый при расчете данных показателей, входит также большое количество бумаги, не подлежащей восстановлению или переработке (санитарная бумага, ткани, бумага со специальной обработкой), японский Центр по продвижению переработки бумаги (Paper Recycling Promotion Center, 2009) был вправе заявить, что достигнутый показатель в почти 80% является «очень значимым достижением». Для сравнения: в США этот показатель тоже очень высок, в 2010 году достиг практически 65%. Однако Япония в последние годы стала опережать Америку в этом плане на 12–13%, хотя еще в 2000 году разница составляла всего около 5%.

Наиболее проблематична переработка отходов электроники, так как в производстве таких устройств используется множество различных соединений и элементов, для разделения которых требуется целый цикл механических и химических манипуляций. Ключевым материалом в современных компьютерах является, безусловно, кремний, однако транзисторы и микрочипы не могли бы функционировать без целого ряда прочих материалов, включая многие тяжелые металлы. Как уже отмечалось ранее, для допирования кремния используются в том числе такие вещества, как мышьяк и фосфор, а также бор и галлий. Печатные платы, дисковые накопители, карты расширения памяти, электротехнические принадлежности и соединения дополняют перечень материалов, количество некоторых из которых на единицу оборудования может быть ничтожно мало, но в совокупности весьма значимо. Большая часть массы электронных устройств приходится на сталь, стекло, пластмассы, медь и алюминий, из которых изготавливаются корпуса, кожухи, экраны, разъемы и соединения, однако в малых количествах присутствует еще более десятка других металлов, восемь из которых (As, Cd, Cr, Co, Hg, Pb, Sb и Se) считаются опасными (USGS 2001; Williams, 2011).

Наибольшее беспокойство вызывает свинец. Ли и соавт. (Li и соавт., 2006), определяя токсичность с помощью выщелачивания (ОТПВ), показал, что концентрация этого элемента в полученном посредством выщелачивания компьютерных плат концентрате в 30–100 раз превышала порог содержания свинца (5 мг/л), достаточный для определения отходов как опасных; при этом другие тяжелые металлы не могли привести к токсичности через выщелачивание. Беспокойство вызывает и содержание свинца в батареях, питающих компьютеры, которые производители аппаратного и программного обеспечения в сотрудничестве с правительствами и благотворительными организациями пообещали подарить странам с низким уровнем доходов, где у многих людей нет постоянного доступа к электросетям. Черри и Готтесфельд (Cherry и Gottesfeld, 2009) пришли к выводу, что с каждой 12-килограммовой батареей 3,5–4,5 кг свинца попадает в окружающую среду даже при очень высоких (90–100%) коэффициентах переработки.

Но даже будь такие батареи бессвинцовыми, компьютеры нельзя было бы выбрасывать просто так, ведь в них содержится больше драгоценных металлов, чем в металлических рудах. Это особенно касается золота, так как на тонну печатных плат приходится 1,5 грамма золота, что в 40 раз превышает концентрацию этого металла в рудах, добываемых в США (USGS, 2001). Концентрация меди в выброшенных компьютерах также очень высока, а проблемы, связанные с загрязнением тяжелыми металлами, переработкой редких элементов, пластмасс и стекла, затрагивают весь все еще расширяющийся спектр электронных изделий, в конструкцию которых входят печатные платы, микропроцессоры и соединения (а в портативных устройствах — еще и источники питания). Эта категория «электронных» отходов теперь охватывает весьма обширный ряд аппаратов, от светокопировальной техники и факсимильных машин до электронных игр и сотовых телефонов (Robinson, 2009).

Что происходит со всеми этими устройствами — практически неизвестно. Удивительно, что многие люди не выбрасывают подобные устройства (в особенности компьютеры), а хранят их в подвалах и гаражах. Огромное количество изделий выбрасывается вместе с остальным мусором и оказывается в итоге на свалках; из некоторых извлекают какую-то часть материалов. Значительная доля отходов электроники экспортируется в Азию (прежде всего в Китай и Индию) на разборку и переработку, что связано порой с ужасающими условиями труда (людям приходится работать с высокотоксичными веществами безо всяких средств защиты) и значительными экологическими проблемами (кислоты и тяжелые металлы просачиваются в почву, попадают в водоемы); особенно это касается печально известного центра утилизации в Гуйю, провинция Гуандон, Китай.

Неопределенность итоговой участи таких отходов хорошо иллюстрируется тем фактом, что анализируя материальные потоки США, связанные с б/у-компьютерами, Каххат и Уильямс (Kahhat и Williams, 2012) смогли лишь назвать весьма обширные диапазоны цифр, описывающих судьбу 40 миллионов бывших в употреблении и сломанных устройств, придя к выводу, что 6–29% ушло на экспорт, 17–21% оказалось на свалках, 20–47% было собрано и переработано внутри страны (фактически показатель переработки был значительно ниже). Проблемы с «традиционными» отходами электроники (выброшенными телевизорами, проигрывателями компакт-дисков, настольными компьютерами, ноутбуками, игровыми консолями) только усугубились с приходом сотовых телефонов. Эти устройства появились в 90-х гг. (я начинаю отчет с внедрения цифровых сотовых сетей связи, не учитывая тяжелые и неудобные устройства с сильно ограниченными возможностями, существовавшие до 1991 года), и с тех пор ими владеет все больше и больше людей.

В 1997 году впервые было продано более 100 сотовых телефонов; в 2009 году продажи превысили 1 миллиард, к концу 2012 года в мире эксплуатировалось уже более 6,5 миллиарда таких устройств, из них более 1 миллиарда — в Китае; совокупные поставки мобильных гаджетов, включая планшеты, ноутбуки и нетбуки, превысили 1,9 миллиарда штук, из которых 1,7 миллиарда составляют сотовые телефоны (dotMobi 2013). Срок эксплуатации телефона составляет в среднем всего 18–24 месяца, так как каждый год выбрасывается 800–1100 миллионов таких устройств. Согласно наиболее точным данным по США, опубликованным Агентством по защите окружающей среды, мобильных устройств на переработку отправляется ничтожно

мало (около 8% в 2009 году — менее 12 млн шт.; всего в том же году было выброшено 129 миллионов аппаратов); для телевизоров тот же показатель равен 17%, для компьютеров — 38% (USEPA, 2012).

Хотя сотовые телефоны являются самыми легкими электронными устройствами, совокупное содержание металлов в выбрасываемых каждый год телефонах, весьма значительно. В среднем одно устройство содержит около 15 г меди, 0,3 г серебра, 0,03 г золота (USGS, 2006), то есть в 130 миллионах аппаратов, выбрасываемых в одних только Соединенных Штатах в течение года, находится около 2000 тонн меди, 45 тонн серебра, 4 тонн золота, а также почти 9 тысяч тонн пластмасс (на которые приходится 55–60% всей массы) и 2500 тонн керамики и стекла — а совокупные значения по всему миру будут как минимум в шесть раз больше.

5

Дематериализация: миф или реальность?

Оксфордский словарь английского языка определяет глагол *dematerialize* («дематериализовать», «дематериализовываться») как «освободить(ся) от физического тела». Это определение имеет очевидные паранормальные и религиозные коннотации: явление дематериализации используется в научной фантастике (наиболее известный в США пример – сериал «*Звездный путь*»), где объекты и люди исчезают с помощью необъяснимых процессов; дематериализацией тела Христа объясняют отпечаток корпуса, конечностей и ран на ткани Туринской плащаницы (Berard, 1991); знаменитый йог Парамаханса Йогананда утверждал, что человек будет свободен только после того, как он «... сможет дематериализовать свое человеческое тело... а затем материализовать его снова» (Yogananda, 1946).

К счастью, меня интересуют более приземленные материи. В качестве примера дематериализации в реальном мире *Оксфордский словарь* приводит замену физических записей и документов «бумажной компьютеризированной системой». Этот пример представляется мне фактически верным, и сегодня мы наблюдаем его реализацию по всему миру. Печатные акционерные сертификаты (в том числе множество больших и витиевато украшенных экземпляров) превратились в строки нулей и единиц в электронной памяти, но стоит взглянуть поближе – и окажется, что это только мнимая дематериализация, одна из многих замен материального на электронное, которые привели либо к незначительной экономии материала (новая инфраструктура тоже нуждается в материалах, хотя их использование может быть не так очевидно), либо, как чаще всего случается, к использованию большего количества бумаги (эта тенденция четко коррелирует с массовой компьютеризацией).

Гораздо более распространен вид дематериализации, когда тот или иной материал не полностью выходит из обихода, но его использование значительно сокращается, будь то в готовом продукте, услуге (на единицу мощности движущей силы или единицу производительности компьютера) или элементе национального экономиче-

ского продукта. Эта **удельная дематериализация** стала одной из ключевых тенденций в современном производстве, когда стремление к повышению производительности и снижению цен привело к использованию меньшего количества материалов (традиционных и дешевых или современных и дорогостоящих) в любых продуктах – от банок для напитков до реактивных авиалайнеров и от простых структурных элементов зданий до компьютеров.

Есть и другие виды дематериализации. Джон Герман и его коллеги (Herман и соавт., 1990, стр. 334) утверждают, что с экологической точки зрения важно не сокращение массы на единицу продукции (более компактные и легкие предметы могут оказаться менее долговечными, и их частая замена приведет к большему количеству отходов): дематериализацию, «возможно, следует определить как изменение объема отходов на единицу промышленной продукции». Казалось бы, это отличный вариант, но сбор необходимой информации обо всех возможных источниках отходов и относительных оценках различных выбросов (так как масштабное сокращение одного источника отходов может привести к намного меньшему количеству более вредных или менее разлагаемых отходов) – дело, очевидно, непростое. Цель ОЖЦ (оценки жизненного цикла) – как раз предоставить эту информацию, но, как мы уже говорили в предыдущей главе, такие оценки следует применять с осторожностью.

Аналогичным образом, два других вида дематериализации – снижение потребления товаров и использование меньшего количества энергии на единицу экономического продукта – связаны с несколькими неразрешимыми проблемами учета общего объема производства; достаточно достоверные корректировки с учетом инфляции сделать довольно просто, а вот перевод в паритет покупательной способности (ППС) уже представляется намного более неоднозначным. Кроме того, объем энергопотребления на единицу ВВП, может, и является общепринятой мерой общего энергопотребления, но (даже если мы не будем принимать во внимание неточности, неизбежно возникающие при приведении различных видов потребляемой энергии к общему знаменателю) при ближайшем рассмотрении оказывается, что она в корне ошибочна, и что такая узкая интерпретация дает очень ограниченное и приблизительное представление об изменениях в потреблении материалов в процессе роста экономики в настоящее время и в прошлом. Ниже приведен мой обзор, анализ и оценка всех этих видов дематериализации.

5.1 Мнимая дематериализация

В качестве примера отказа от использования бумаги Оксфордскому словарю английского языка следовало бы упомянуть переход от чертежей к системе автоматизированного проектирования (CAD): это явление куда более важное, чем замена печатных акционерных сертификатов на их электронные версии. В ходе этой мнимой дематериализации были сокращены целые бюро чертежников с кульманами, а множество бумажных чертежей, хранившихся в тяжелых стальных шкафах, сменились изображениями на экранах и электронными документами сначала на пленках, а затем на магнитных носителях, жестких дисках и различных портативных устройствах. Системы автоматизированного проектирования, которые изначально

позволяли работать с двухмерными изображениями, а сегодня дают возможность создавать сложные трехмерные чертежи, сначала использовались военными. Компания General Motors начала разрабатывать свою систему CAD в конце 1950-х, в 60-х к ним присоединились конструкторы коммерческих самолетов (Weisberg, 2008).

Количество чертежей, используемых в производстве сложных машин, быстро росло – сначала в период с 1890 по 1920 год с появлением двигателей внутреннего сгорания и заменой паровых моторов турбинами, а затем, с 1900-х по 1930-е гг., - в связи с применением бензиновых и дизельных двигателей в более продвинутых конструкциях легковых и грузовых автомобилей. Усложнение конструкции самолетов привело к увеличению количества чертежей еще на порядок. Чтобы построить бомбардировщик времен Второй мировой войны, нужно было около 8000 чертежей, а начало использования реактивных двигателей (в 1940-х годах для военных образцов и десять лет спустя для гражданских) и внедрение широкофюзеляжных реактивных лайнеров в 1960-х потребовало увеличения количества чертежей еще на порядок.

Для Боинга-747, сконструированного в 1965 году и запущенного в производство в 1969-м, требовалось около 75 тысяч чертежей, а это почти 8 т бумаги (Boeing, 2012). Именно поэтому в 70-х гг. компания Боинг разработала на базе вычислительных машин CAD-систему, в которой хранилось более миллиона чертежей и которую через более чем 25 лет службы заменили на серверную операционную систему SunSolaris (Nielsen, 2003). В 1990-е годы такие самолеты, как Боинг-767 и Аэробус-340, стали наиболее впечатляющими воплощениями технологий CAD. Даже самые ранние системы CAD часто вдвое сокращали время, необходимое для реализации конкретной задачи, а дальнейшее их развитие позволило уменьшить потребности в рабочей силе до 10–20% от первоначального уровня.

Не менее важным следствием перехода на автоматизированное проектирование была экономия бумаги: если раньше для исправления целых чертежей требовалось много расчетов и труда, то теперь это лишь несколько кликов мышкой. Например, при проектировании B-29 (Stratofortress – крупнейшего и наиболее сложного американского дальнего бомбардировщика Второй мировой войны) на каждый окончательный чертеж в конечном промышленном образце приходилось более 4000 предварительных, которые просто выбрасывались (Herman, 2012). CAD же значительно упрощает эксперименты с различными вариантами и правками: программное обеспечение отслеживает изменения по всему проекту и самостоятельно корректирует все нужные чертежи. Когда использование систем CAD стало нормой, они заменили экспериментальные, пробные, предварительные и окончательные чертежи почти во всех отраслях строительства, промышленности и проектирования сетей нематериальными электронными версиями. Менее чем за два поколения в развитых странах произошла практически полная дематериализация проектирования.

Конечно, лишь оценив то, от чего мы отказались, мы сможем понять, было ли это дематериализацией или нет, и поэтому я называю этот вид дематериализации «мнимой». Благодаря CAD, в прошлое ушли большие и маленькие листы бумаги, чертежные столы, стулья, инструменты и огромные железные шкафы, в которых все это хранилось, но создание и хранение нематериальных чертежей требует развитой инфраструктуры: современных компьютеров, устройств хранения резервных копий больших массивов данных и коммуникационных сетей, от специализирован-

ного программного обеспечения (для разработки которого нужны другие компьютеры) до широких плоских экранов и целых помещений с серверами, необходимыми для обработки Интернет-трафика (глобализация проектирования и использование труда субподрядчиков с других континентов, будь то проектирование мобильных телефонов или самолетов, требующие постоянного обмена предложениями и документацией в мировом масштабе), не говоря уже о значительно более активном использовании электричества и инфраструктуры, необходимой для его бесперебойной подачи (выработка электричества методом сжигания ископаемого топлива или из возобновляемых источников, преобразование тока и его передача по высоковольтным и распределительным сетям к конечным потребителям).

Таким образом, даже, казалось бы, яркие примеры дематериализации в действительности представляют собой всего лишь сложную форму замены одних материалов на другие. Распространение CAD позволило сократить вырубку лесов, производство целлюлозы, бумаги и чертежных инструментов, а также мебели для их хранения – но вместе с тем создало дополнительную потребность в сложной (и энергоемкой) материальной инфраструктуре современного электронного мира, а, следовательно, и в материалах, необходимых для бесперебойного энергоснабжения этих систем. Учитывая сложность современных электрических и электронных систем, их активное использование и различные сроки службы (программное обеспечение или интерфейсы заменяются через несколько месяцев, тепловые электростанции работают на протяжении десятилетий), очень трудно придумать метод общей оценки баланса материалов, используемых в работе и эксплуатации таких сложных структур, пришедших на замену бумаге. Даже если бы такие замены были проще, нет сомнений, что они бы вызвали множество различных последствий.

Микропроцессоры помогли провести дематериализацию огромного количества продуктов и услуг, от книг (электронные книги, которые можно читать на компьютерах и различных электронных устройствах) и учебных материалов (онлайн-уроки иностранных языков и семинары с преподавателями из других стран) до банковских ведомостей, счетов-фактур от поставщиков, корреспонденции (e-mail), билетов на транспорт (электронные билеты на экранах мобильных телефонов), телефонных справочников (несмотря на то, что толстые сборники телефонных номеров можно найти и сейчас) и карт. Новые электронные формы искусства не требуют полотен, красок, камня и глины, электронные палитры состоят из миллионов оттенков; и, хотя большие музеи мира явно не исчезнут вслед за печатными акционерными сертификатами, многие из них предоставляют возможность не выходя из дома посетить все их залы онлайн (список музеев, которые предлагают виртуальные туры, есть на сайте <http://www.virtualfreesites.com/museums.museums.html>).

Очевидно, что для создания виртуального тура по небольшому музею потребуется совсем другая электронная инфраструктура (в том числе резервные копии материалов и разработок), нежели для создания и эксплуатации системы бронирования и электронных билетов крупной международной авиалинии. А рассчитать последствия такой дематериализации будет еще сложнее. Доступность онлайн-бронирования для всех авиалиний, осуществляющих перелеты по определенному маршруту, способствовала росту конкуренции, снижению цен и увеличению частоты перелетов. Бумажные билеты ушли в прошлое, но для поддержания сложных систем, обе-

спечивающих международные перелеты, требуется еще больше материалов. Аналогичным образом, виртуальный тур по музею может побудить кого-то поехать и увидеть экспозицию своими глазами, но мы никогда не узнаем, как виртуальные экскурсии в действительности влияют на количество материалов, необходимых для работы современного музея. Ясно одно: эти материалы никуда не денутся.

5.2 Удельная дематериализация: снижение удельного веса

Сокращение материальных затрат в производстве может быть достигнуто четырьмя основными способами: путем постепенного улучшения, не связанного с новыми материалами; путем замены (часто сравнительно быстрой) составных материалов на более легкие или долговечные альтернативы; путем повторного использования, что особенно эффективно в тех случаях, когда это приводит к значительной экономии энергии; а также путем внедрения совершенно новых устройств, которые позволяют выполнять ту же работу, тратя лишь малую часть той массы материалов, которая требовалась ранее.

Первый подход обычно сводится к рационализации конструкции, что позволяет сократить затраты определенных материалов без ущерба для работы устройства. Облегченные стальные балки и композитные материалы на основе древесины – хороший пример такой рационализации, но наибольшее распространение получили легкие банки для напитков.

На их примере можно объяснить и второй, и третий способ снижения удельного веса материалов, а именно относительно быструю замену материалов и их повторное использование. Замена стали на алюминий позволила снизить вес банок для прохладительных напитков, но, учитывая высокую энергоемкость производства первичного алюминия, эта замена привела к увеличению затрат на электроэнергию. Однако распространение использования переработанного алюминия позволило снизить первичные затраты на материалы и привело к значительной экономии энергии в целом. В глобальных масштабах повторная переработка стали – наиболее яркий пример такой благоприятной тенденции; в настоящее время стараются максимально избегать материалоемкого процесса получения металла из руды.

Что касается последней категории, то, пожалуй, лучший пример разработки новых решений – это замена тяжелых и громоздких электронных ламп на крошечные транзисторы, а затем и на микропроцессоры из кремниевых чипов с транзисторами. На самом деле, процессы удельной дематериализации не являются взаимоисключающими и, как и в случае с банками для напитков, часто одновременно применяются несколько подходов к сокращению материальных затрат. Впрочем, все это не означает, что стремление к дематериализации стало основным фактором эволюции продукта. История практически любого вида выпускаемой продукции может быть представлена как история снижения затрат и повышения производительности, будь то в плане удобства использования, увеличения мощности, долговечности или надежности (в соответствии с логической кривой роста: дополнительные улучшения приводят к убыванию доходности).

В некоторых случаях сокращение использования материалов возглавило эти благоприятные тенденции или стало для них одним из решающих факторов: сокращение массы используемых материалов и повышение безопасности их использования явно было основной целью в процессе замены стекла на металл в банках для пива и прохладительных напитков. Сначала появились стальные банки, затем алюминиевые; и те, и другие постоянно улучшались: корпуса становились тоньше, а крышки меньше. В других случаях удельная дематериализация оказалась удачным следствием инноваций, движимых другими целями.

Замена кафеля на пластиковые напольные покрытия, имитирующие кафельную плитку, была обусловлена нежеланием сделать покрытие более легким, а стремлением удешевить материалы и их укладку. На смену тяжелому стеклу, чугуну, керамическим мискам и кастрюлям на традиционной кухне пришли пластик и более тонкие металлы: основной причиной этому было снижение веса, но еще и то, что новые материалы были дешевле и, чаще всего, безопаснее.

Эволюция банок для прохладительных напитков также иллюстрирует и зачастую затяжной процесс замещения материалов, и удивительные масштабы возможных улучшений. Стальные банки для хранения различных пищевых продуктов имеют долгую историю, которая восходит к началу XIX века, когда консервы впервые начали изготавливать промышленным способом Николя Аппер во Франции и Питер Дюран в Великобритании (Shepard, 2000). Впрочем, для пива и безалкогольных напитков стальные банки стали использоваться только в 1930 году и достигли наибольшей популярности в 1950-е. Первые алюминиевые банки были введены фирмой Coors в 1959 году; первой компанией, разливавшей свои напитки в них, стала Royal Crown Cola 1964 году, а в 1967 году к ней присоединились Coca Cola и Pepsi Cola (Aluminum Association, 2013).

Через десять лет стальные банки для напитков стали уходить в прошлое, а затем и совсем перестали использоваться для пива в 1994 году, а для прохладительных напитков с 1996 г., но по-прежнему остались наиболее популярной упаковкой для консервированных фруктов, овощей и мяса (СМІ, 2013). Алюминиевые банки изготавливаются из сплавов (содержащих около 5% магния, менее 2% марганца, а также следы железа, кремния и меди), внутри часто покрыты защитной оболочкой и имеют обжимные крышки с металлическими ушками для открывания. Первые алюминиевые банки были необычайно тяжелыми – 85 г; к 1972 году составные банки из двух деталей весили уже меньше 21 г, к 1988 году – меньше 16 г, через десять лет – в среднем 13,6 г, а в 2011 году их вес достиг 12,75 г (СМІ, 2012).

Это значит – допустим, что в 1980 году (когда было изготовлено 41,6 млрд банок) средний вес банки составил 19 г, а в 2010 году (когда было изготовлено 97,3 млрд банок) уже 13 г – что рост потребления банок в 2,3 раза за три десятилетия сопровождался увеличением массы алюминия лишь на 60%. Чтобы проиллюстрировать эту удельную дематериализацию, отмечу, что если бы все банки, изготовленные в 2010 году, весили бы столько же, сколько в 1980, то дополнительно потребовалось бы 580 тыс. тонн алюминия – достаточно, чтобы построить восемь самолетов «Боинг-747» или более 25 самолетов «Боинг-787» (это связано с более низким содержанием алюминия в материале последних – лишь 20% от собственного веса).

Кроме того, как уже отмечалось в предыдущей главе, алюминиевые банки являются самыми перерабатываемыми контейнерами (да и вообще самым перерабатываемым предметом) – более половины всех банок, производимых ежегодно в США (не важно, как измеряется этот показатель) сегодня приходится на переработанный металл; на энергоёмкость производства банок и его воздействие на окружающую среду удельная дематериализация, и переработка влияют совместно. 13 грамм вовсе не предел: в 2012 году один европейский производитель представил свою последнюю разработку - банку объемом 330 мл (в США выпускаются банки объемом 355 мл, это на 7,5% больше), вес которой всего 9,5 г (Ball Packaging Europe, 2012). Этот часто приводимый пример удельной дематериализации покажется вам незначительным в сравнении с намного более важным, но, тем не менее, почему-то игнорируемым эволюцией движущей силы от использования человеческого или животного труда к работе механизмов и последующим развитием двигателей. Несмотря на то, что этим фундаментальным событием пренебрегают, оно заслуживает более пристального рассмотрения.

Мышцы, преобразовывающие химическую энергию пищи и корма в кинетическую энергию человека и животных, были основной движущей силой во всех доиндустриальных цивилизациях. Механические (неживые) движущие силы мало использовались в традиционном обществе, но стали необходимым условием современного экономического развития, характеризующегося индустриализацией, механизацией сельского хозяйства и урбанизацией, и приводящего к беспрецедентному улучшению качества жизни. Первые механические устройства были простыми деревянными машинами, водяными колесами (начиная с Античности) и ветряными мельницами (с раннего Средневековья), преобразующими энергию проточной воды и ветра в возвратно-поступательные или круговые движения, которые использовались для помола зерна, отжима масла из семян, распила дерева, перекачки воды и вдувания воздуха.

Двигатели внутреннего и внешнего сгорания преобразуют химическую энергию топлива или биомассы в механическую энергию возвратно-поступательных или круговых движений. Внешнее сгорание стало использоваться в паровых двигателях (вода в котлах нагревалась, и пар - рабочее тело - подавался на движущие части машин) в первой половине 18 века очень неэффективно, а затем эффективность повышалась до тех пор, пока к концу 19 века она не достигла своего плато. Двигатели внутреннего сгорания начали продаваться с 1860 года, сначала стационарные, малоэффективные, тяжелые, сжигающие угольный газ, а затем более легкие бензиновые автомобильные двигатели, появившиеся в конце 1880-х. Двигатели, впервые разработанные Рудольфом Дизелем в 1890-х, были еще относительно тяжелыми, но по своей природе более эффективными.

Двадцатый век принес с собой две новые категории двигателей внутреннего сгорания: газовые турбины, работающие либо на жидком топливе (керосин для реактивных самолетов), либо на газе (крупные стационарные газовые турбины – на природном газе) и ракетные двигатели, для которых используются различные виды жидкого и твердого топлива. Третий класс современных двигателей используется для преобразования кинетической энергии воды, ветра и пара в электричество. Паровые турбины появились в 1880-х годах, но и сейчас их более мощные аналоги

работают с перегретым паром из больших котлов, нагреваемых с помощью угля или газа, и уже больше столетия являются основным способом генерации электрического тока. Во многих странах с богатыми водными ресурсами значительная часть электричества вырабатывается водяными турбинами, а в последние десятилетия, особенно в Европе, – огромными трехлопастными ветряными турбинами.

Вероятно, самая заметная долгосрочная тенденция, затронувшая все категории современных двигателей – это, помимо роста мощности единицы оборудования, снижение отношения удельной массы к мощности (г/Вт). Обратное этому соотношение (Вт/г), известное как отношение мощности к весу (или удельная мощность) – один из наиболее информативных параметров при оценке и сравнении производительности двигателей и машин; его вариант – тяговооруженность – описывает газовые турбины и ракетные двигатели, используемые в коммерческих и военных реактивных судах и для запуска полезной нагрузки в космос. Примем за точку отсчета производительность первых топливных механических двигателей – паровых двигателей восемнадцатого века. К 1750 году, после десятилетий мелких улучшений, паровая машина Ньюкомена стандартного размера – неэффективный паровой двигатель мощностью около 15 кВт и весом почти в 9,6 т – имела отношение массы к мощности примерно в 640 г/Вт (Smil, 2008).

Три десятилетия спустя даже знаменитая паровая машина улучшенной конструкции Джеймса Уатта (запатентованная в 1765 году) остается очень тяжелой (9,2 т, 15 кВт): отношение ее массы к мощности чуть более 600 г/Вт. Эта величина сравнима с показателями двух важнейших живых сил – работающего человека и рабочей лошади. Хотя мощность кратких (анаэробных) человеческих усилий может достигать 400 Ватт (что дает нам менее 200 г/Вт), мощность непрерывного человеческого труда составляет 60-80 Вт, то есть около 1000 г/Вт полезного труда. Наиболее мощные рабочие лошади (английские Клейдесдаль, французские Першерон) весят около 1 т и развивают более 1 л.с. (745 Вт), то есть, опять же, их удельная мощность составляет около 1000 г/Вт при длительной работе (Smil, 1994).

К середине девятнадцатого века удельная масса многих паровых двигателей не достигала и 500 г/Вт, а лучшая конструкция конца девятнадцатого века (паровая машина тройного расширения) – чуть менее 100 г/Вт и оставалась по-прежнему слишком тяжелой, чтобы использовать ее для недорогого автодорожного транспорта. Ситуацию изменили двигатели внутреннего сгорания. В 1874 году первый (атмосферный и стационарный) двигатель внутреннего сгорания Отто, оборудованный цилиндром высотой почти в 4 м, был очень тяжелым: его отношение массы к мощности (900 г/Вт) было в несколько раз больше, чем у лучших паровых двигателей того времени. Компрессия позволила уменьшить размер и вес двигателя и сократила это отношение примерно до 270 г/Вт к 1890 году – меньше, чем в маленьких стационарных двигателях, которыми оборудуются заводы и мастерские.

Первое значительное (на порядок) улучшение было связано с появлением бензиновых двигателей, разработанных в 1880-х гг. Карлом Бенцом, Готлибом Даймлером и Вильгельмом Майбахом. К 1890 году Даймлер и Майбах представили свой первый 4-х цилиндровый двигатель, чье соотношение массы к мощности составило 30 г/Вт (Beaumont, 1902). В 1901 году Майбах представил Mercedes 35 – прототип всех современных автомобилей – чей 4-хцилиндровый двигатель обладал мощностью 26

кВт при весе алюминиевого блока и радиатора всего в 230 кг – соотношение массы к мощности 8,8 г/Вт. Второе значительное улучшение было сделано уже в XX веке: автомобили из дорогостоящих причуд превратились в доступные механизмы.

Первый в мире автомобиль массового производства – Model T Генри Форда – вышедший в 1908 году, изначально был оборудован 2,9-литровым четырехцилиндровым двигателем, чье соотношение массы к мощности составило 15 г/Вт. Но к тому времени, когда автомобиль был снят с производства (в 1927 году, хотя производство сменных двигателей к нему продолжалось до августа 1941 года), это соотношение снизилось до менее чем 5 г/Вт. К началу 1930-х даже такие мощные двигатели, как V12 в автомобиле «Пирс-Эрроу», обладали соотношением массы к мощности минимум в 4 г/Вт, а постепенные изменения, вносимые в двигатели до и после Второй мировой войны, постепенно привели его менее чем к 2 г/Вт к 1950-м и 1,5 г/Вт к середине 1960-х: даже 298 V8 Форда в «Мустанге» 1965 года обладал соотношением в целых 1,4 г/Вт. В самом начале двадцать первого века большинство легковых автомобилей оборудованы двигателями с соотношением массы к мощности от 1 до 1,5 г/Вт, а в наиболее мощных турбодвигателях этот показатель составляет намного меньше 1 г/Вт.

Аналогичным образом, низкое отношение массы к мощности было необходимо для перехода от ранних одно- и двухместных самолетов ко все более и более тяжелым пассажирским и военным самолетам. Уилбур и Орвилл Райт разработали двигатель, который обеспечил их первый успешный полет 17 декабря 1903 г. (построенный опытным велосипедным механиком Чарльзом Тейлором): его вес составил 91 кг, а мощность – до 12 кВт, что привело к соотношению массы к мощности в 7,6 г/Вт. Две мировые войны принесли с собой новые рекордные соотношения: Liberty – первый серийный авиадвигатель в Америке – в 1917 году показал 1,34 г/Вт, а радиальный двигатель Wright R-3350 в бомбардировщиках B-29 (Superfortress) – всего 0,74 г/Вт (Gunston, 1986). Пришедший им на смену Wright R-1820-82A начал применяться перед самым переходом от крупномасштабных коммерческих перелетов к реактивным лайнерам в 1960-х; его показатель составил всего 0,59 г/Вт.

Вес по своей природе более тяжелых дизельных двигателей, используемых в тяжелом дорожном, рельсовом и водном транспорте (а также пассажирских автомобилях, особенно в Европе), тоже уменьшился. Третий прототип двигателя Рудольфа Дизеля – крупная (почти 4,5 т) вертикальная стационарная машина с ходом поршня в 4 метра, используемая в испытаниях на соответствие эксплуатационным характеристикам в 1897 году, – показала максимальную мощность 13,5 кВт и соотношение массы к мощности 333 г/Вт – в три раза больше, чем лучшие крупные паровые двигатели того времени и на порядок больше, чем развивающиеся в то время бензиновые двигатели (Diesel, 1913). Первый стационарный коммерческий двигатель, поступивший в продажу в 1898 году, был очень тяжелым (296 г/Вт), но вес начал снижаться по мере развития передвижных моделей. К 1910 году морские дизельные двигатели показывали около 120 г/Вт, а в 1930 немецким инженерам удалось довести отношение массы к мощности в авиадвигателе Jumo Junkers 205 (595 кг, 647 кВт) до небывалого уровня – 0,92 (Wilkinson, 1936).

Современные дизельные двигатели легковых автомобилей ненамного тяжелее, чем их бензиновые варианты: две версии Mercedes Benz OM 651, представленные

в 2008 году, имеют удельную массу 1,5 и 1,35 г/Вт соответственно (Daimler, 2008), а показатель отношения массы к мощности у тяжелого транспорта (автобусы, грузовики) всего 3 г/Вт (Smil, 2010). Гораздо более тяжелые двигатели, применяемые на неэлектрифицированных железных дорогах, имеют удельную массу от 3 до 10 г/Вт, а мощнейшие морские дизельные двигатели, применяемые в крупных контейнерных судах – около 30 г/Вт: 14-цилиндровый турбодвигатель Wärtsilä RT-flex96С мощностью 80,1 МВт с длиной хода поршня 2,5 м обладает удельной массой 28,72 г/Вт (Wärtsilä, 2013).

Начиная с 1940-х, удельная масса легчайших моделей реактивных двигателей (газовых турбин) сократилась еще на порядок – до менее чем 0,1 г/Вт. Первый турбодвигатель Уиттла W.1, разработанный в начале 1940-х годов, имел удельную массу 0,38 г/Вт, ранние коммерческие турбореактивными двигателями середины 1950-х годов – примерно 0,25 г/Вт, а новейшие турбовентиляторные двигатели имеют удельную массу менее 0,1 г/Вт (Smil, 2010).

Стандартный способ определения зависимости мощности авиадвигателей от их массы – расчет их тяговооруженности: она выросла с 1,6 в прототипах Уиттла в начале 1940-х до почти 4 в турбореактивных двигателях конца 1950-х; 5,5 в крупных турбовентиляторных двигателях 1990-х и достигла 6,3 в GE90-11В – крупнейшем турбовентиляторном двигателе, запущенном в производство в 2003 году. Это значит, что новейшим турбовентиляторным двигателям нужна лишь четверть своей массы, чтобы обеспечить единицу тяговой мощности.

Но даже такие показатели недостаточны, чтобы преодолеть силу притяжения Земли – такими отношениями массы к мощности обладают только ракетные двигатели. С точки зрения тяговооруженности, ракетные двигатели продвинулись от менее чем 20 в PGM-11, установленном в Redstone - первой американской баллистической ракете – в 1958 году до почти 140 в начале 1970-х, когда группа Кузнецова разработала НК-33 – мощнейший в мире двигатель на жидком кислороде/керосине, который, впрочем, так и не был использован для своей изначальной цели – полета на Луну. Сравним эти удельные веса в тех же единицах, что и в случае с автомобильными и авиадвигателями: когда ракета Saturn V выводила Аполлон-11 на траекторию к Луне (в июле 1969 года), отношение ее массы к мощности (даже с учетом всего топлива) составило всего лишь 0,001 г/Вт.

Снижение удельного веса крупнейших стационарных двигателей тоже впечатляет: отношение массы паровых турбогенераторов тепловых электростанций к их мощности сегодня на 2 порядка меньше, чем лучшие показатели паровых машин девятнадцатого века. Эти машины с удельной массой почти 100 г/Вт использовались почти во всех угольных электростанциях, но в 1891 году, всего через семь лет после получения патента, паровая турбина Чарльза Парсона весила не более 40 г/Вт; к 1914 году этот показатель снизили до 10 г/Вт; удельный вес современных крупных турбогенераторов ненамного превышает 1 г/Вт, а крупнейшие стационарные газовые турбины весят чуть больше – около 2 г/Вт.

Наконец, поговорим об удельной дематериализации электронных устройств в целом и компьютеров в частности. Эти проявления процесса дематериализации считаются одними из самых ценных, и в случае с компьютерами тенденция была даже более выраженной, ведь вес устройств оказался обратно пропорционален их

производительности: с уменьшением веса они стали не только меньше, но и мощнее. Это явление описывает закон Гордона Мура, сформулированный еще в 1965 году, когда наиболее сложная микросхема состояла из 50 транзисторов, и действующий уже необычайно долго. Изначально Мур предполагал, что количество транзисторов на каждой микросхеме будет удваиваться каждый год, но через десять лет продлил период удвоения до двадцати четырех месяцев (Moore, 1965, 1975). Вес компьютеров обычно сравнивают с весом системы наведения Аполлона-11, которая использовалась для управления и посадки капсулы на Луну в августе 1969 года. Этот компьютер с 2 КБ оперативной памяти весил 32 кг, что пропорционально 16 грамм/Байт (Hall, 1996). В 1981 году первый персональный компьютер IBM имел 16 КБ оперативной памяти и весил 11,3 кг, что пропорционально 0,7 г/Б.

В 2011 году мой новый ноутбук Dell Studio при 4 Гб оперативной памяти и весе 3,6 кг имел удельный вес 0,0000009 г/Б. Это означает, что за 42 года, с 1969 по 2012, отношение массы к оперативной памяти снизилось на 7 порядков – такая скорость удельной дематериализации впечатляет. Впрочем, при оценке общего воздействия этой дематериализации следует начать с компьютера IBM 1981 года, поскольку система «Аполлон-11» не была ни коммерческой, ни портативной. Совокупный объем оперативной памяти около 2 миллионов компьютеров, проданных в 1981 году, составил чуть больше 30 Гб, а их совокупная масса – 22 тысячи тонн; спустя 30 лет совокупный объем оперативной памяти более чем 300 миллионов компьютеров, проданных в 2011 году, был порядка 1,2 Эб (1018 байт), а масса – около 1,2 миллиона тонн: следовательно, совокупный прирост оперативной памяти на 7 порядков (40 миллионов раз) сопровождался увеличением общей массы лишь в 60 раз.

Это исключительный пример удельной дематериализации, связанной с огромным приростом производительности, однако такое увеличение соотношения производительности и массы ограничилось только лишь устройствами, работа которых основана на микропроцессорах. Современные фотокамеры, конструкция которых изменилась с появлением микрочипов и последующим развитием цифровой фотографии, на порядок легче, чем их предшественники всего лишь 30 лет назад (я сравниваю по качеству изображения и не учитываю маленькие фотокамеры типа Instamatic, появившиеся в 1960-х). Множество новых цифровых конструкций весит всего около 100 г, в то время как стандартные зеркальные камеры 70-х и 80-х годов весили примерно по килограмму, а с теле- и макрообъективами, защитными чехлами и рулонами пленки – еще больше.

Мобильные телефоны – еще более наглядный пример, так как в их развитии впечатляющая удельная дематериализация объединилась с не менее выдающимися достижениями в качестве связи и общей функциональности. В 1973 году первый мобильный телефон компании Motorola весил 1135 г; в 1984 году первое коммерческое устройство - Motorola DynaTAC 8000 X - весило 900 г; в 1994 году телефоны Nokia по-прежнему весили около 600 г; к 1998 году у компании уже были устройства весом всего 170 г; а в 2000 году мобильные телефоны в среднем весили 120 г, а самый легкий из них – всего 96,35 г (GSM Arena, 2013). С 2005 года средний вес мобильного телефона устанавливается в пределах 110 – 120 г, ведь несмотря на то, что новые телефоны становятся тоньше (средняя толщина телефона в 2000 году – 22 мм, в 2010 году – 14 мм), их дисплеи увеличиваются: средняя ширина в 2000 году

составила 3,75 см, а в 2010 году – уже 7,5 см (GSM Арена, 2013). Популярные телефоны iPhone компании Apple отражают эти изменения: модель 2007 года с дисплеем шириной 6,2 см весила 135 г, iPhone 5, вышедший в 2012 году с дисплеем шириной 7,6 см, – 112 г (Apple, 2012).

Мариан Тупи (Tupi, 2012) составил список 16 устройств или функций, замененных приложениями на iPhone: камера, компьютер для общения по электронной почте, радио, стационарный телефон, будильник, газета, фотоальбом, видеомagni-тофон, стереомagniтофон, карта, DVD-плеер для фильмов, картотеку контактов, телевизор, диктофон и компас. Даже если мы не будем учитывать функции, которые эти устройства не могут заменить совсем хорошо (сокращенные новости не заменят настоящей газеты, крошечный экран не идет ни в какое сравнение с широкоформатным телевизором с высоким качеством изображения), останется множество эквивалентных, а иногда и превосходящих оригинал, замен: телефон – это прекрасные часы, будильник или радио; контакты в телефоне искать удобнее, чем в картотеке; GPS – лучшее средство определения местонахождения и направления, чем компас и карты; мобильный телефон может с успехом использоваться как диктофон, а многие телефоны позволяют делать лучшие фото, чем большинство стандартных зеркальных камер, не говоря уж об отсутствии необходимости покупать и проявлять пленку и печатать фотографии.

Даже если мы просто сложим массы современных, то есть в основном электронных, версий замененных устройств – часов, будильника, маленького портативного радиоприемника, карманного диктофона и цифровой фотокамеры, каждый из которых весит порядка 100 г – то получим сумму в 500 г (тогда как мобильный телефон весит чуть больше 100 г); а если более либерально подойти к выбору устройств и складывать массы их механических предшественников из 1950-х, то масса замененных телефоном устройств составит несколько килограммов, что уже говорит об удельной дематериализации на несколько порядков. Запомните это впечатляющее сравнение – я вернусь к нему в предпоследнем разделе последней главы!

Однако в устройствах, не основанных на микросхемах, даже близкого снижения массы не наблюдалось, а в некоторых случаях дематериализация за счет использования микропроцессоров и вовсе сопровождалась значительным увеличением общей массы продуктов. Легковые автомобили (и другие двухосные четырехколесные транспортные средства), возможно, лучший пример этой противоположной тенденции. Хотя они остаются сложными совокупностями механических компонентов (содержащих порядка 30 000 деталей), все их ключевые функции (прежде всего, синхронизация работы двигателя) и многие вспомогательные задачи (надувание подушек безопасности, возможно, является наиболее важной из них) контролируются микропроцессорами и более сложным программным обеспечением, чем в истребителях и реактивных авиалайнерах (Charette, 2009). Современные автомобили являются электронно-механическими гибридами, и на долю электроники в наиболее дорогих из них может приходиться до 40% стоимости самого автомобиля. Однако в следующем разделе я покажу, что масса среднего автомобиля, используемого для пассажирских перевозок в Америке, неуклонно растет, и причина тому не инженерная необходимость, а личные предпочтения.

Кроме того, среди огромного количества потребительских товаров ежедневного спроса, которые до сих пор не оснащены микропроцессорами (от одежды до посуды и от простых инструментов до мебели ручной сборки), не было ни одного примера, в котором масса на единицу продукта или на единицу производительности снизилась бы на несколько порядков. А примеры снижения массы на порядок (то есть так, чтобы производительность оставалась той же, а продукт стал весить 10% от своего изначального веса) чрезвычайно редки, в большинстве случаев удельная дематериализация составила менее 30% по сравнению с теми же типами продуктов, используемых предыдущим поколением.

5.3 Последствия дематериализации

Прежде чем подробно рассматривать материальные последствия дематериализации, я хотел бы подчеркнуть, что этот важный показатель неизбежно дает нам ограниченное и несовершенное представление о ходе вещей. Более реалистичный показатель, который учитывает в том числе и влияние снижения веса материалов на окружающую среду (землепользование, выбросы диоксида углерода, токсичность водных ресурсов), подсказывает, что этот фактор, возможно, не самый важный: небольшое количество тяжелых металлов в электронике может оказать большее влияние, чем сравнительно большое количество пластика (van der Voet и соавт., 2005). Для надежной оценки этих последствий необходимо проводить сравнительный анализ жизненного цикла конкретных продуктов, а в некоторых случаях и часто повторять ее, поскольку в дематериализации участвуют все новые и новые материалы и устройства.

Постоянное снижение отношения массы продуктов и двигателей к их производительности и мощности позволяет нам делать много показательных сравнений, вроде тех, что я привел в разделе, где выразил массу алюминия, сэкономленного благодаря более легкой конструкции банок, в количестве новых Боингов, которые можно было бы из него построить. Но все эти сравнения блекнут перед фактом, что если бы среднее соотношение массы и оперативной памяти более 300 миллионов компьютеров, проданных по всему миру в 2011 году, осталось на уровне начала 1980-х, то общий вес всех материалов (металла, кремния, пластика, стекла), необходимых для производства всех этих разных видов персональных компьютеров, составил бы почти 850 миллиардов тонн, что на 2 порядка больше, чем весь углерод, добытый в мире в этом году из всех видов ископаемого топлива, и в 200 раз больше массы всех материалов, израсходованных США в этом году.

Вот еще несколько распространенных примеров: при прочих равных, двигатели сегодняшних межконтинентальных реактивных лайнеров были бы по крайней мере на 50% тяжелее, если бы соотношение их тяги и мощности оставалось на уровне начала 1960-х; двигатели современных автомобилей были бы как минимум в три раза тяжелее, если бы обладали лучшей конструкцией начала 1930-х; если бы крупные контейнерные суда были оборудованы лучшими паровыми двигателями, то последние весили бы в 3–4 раза больше, чем наиболее эффективные современные морские дизельные двигатели; а сегодняшние тепловые электростанции с крупнейшими и

эффективнейшими паровыми двигателями начала двадцатого века требовали бы в 50-100 раз больше материала (в основном железа и стали), чем оборудованные современными паровыми и газовыми турбинами с огромными бойлерами.

Из этих контрастов явственно следует, что удельная дематериализация является одной из основных причин снижения затрат, роста доступности и массового распространения новых поколений продуктов, а также предотвращения поистине невообразимого экологического загрязнения и деградации. Очевидно, что в 2011 году было бы физически невозможно продать более 300 миллионов, да даже и 30 миллионов персональных компьютеров, если бы их соотношение массы и оперативной памяти оставалось бы на уровне начала 1990-х: даже самое передовое и обеспеченное государство не смогло бы приобрести и обработать то количество материалов, которое потребовалось бы для изготовления этих устройств.

Аналогичным образом, сегодняшние пассажирские автомобили не были бы такими мощными, если бы их соотношение массы и мощности застряло на уровне 1930-х годов. В отличие от персональных компьютеров из предыдущего примера, мы бы смогли организовать производство множества таких тяжелых автомобилей, но стоимость их покупки и эксплуатации была бы так высока, что массового распространения они бы не получили. Выработка электричества с помощью паровых двигателей никогда не сравнится по эффективности с турбогенераторами, сырье для которых дешево, а соотношение массы и мощности является низким: если бы мы продолжили пользоваться паровыми машинами для производства электроэнергии, ее потребление было бы значительно ниже, гораздо меньше людей владели бы электроприборами и электронными устройствами, домашнее и уличное освещение было бы гораздо более скудным, а в промышленности использовались бы лишь относительно непрехотливые электрохимические процессы.

Конечно, меньший удельный вес продуктов и меньший вес двигателей на единицу производительности – не единственная причина удешевления и широкого распространения продуктов и услуг. Технические инновации обычно работают в комплексе и часто неожиданным образом взаимодействуют друг с другом, поэтому оценить относительное воздействие отдельных факторов сложно, если вообще возможно. Основным фактором дематериализации стало уменьшение затрат на энергию, необходимую для производства, обработки и транспортировки материалов. Кроме того, свое влияние оказали удешевление и механизация производства, частое (а иногда и постоянное) перепроектирование коммерчески успешных продуктов, а также введение новых методик и технологических процессов, некоторые из которых улучшали, а некоторые радикально меняли процесс производства.

Это удешевление энергии было бы невозможно без новых продуктов и процессов: только подумайте обо всех тех механизмах, которые необходимы, чтобы дешевле добывать уголь из угольного разреза, о том, как роторные буровые установки изменили добычу углеводородов, которая раньше велась методом ударного бурения, о высоковольтных линиях, которые сегодня позволяют нам дешево передавать электричество на длинные расстояния. В свою очередь, новые материалы, необходимые для производства этих продуктов, часто требуют больше энергии, чем производство их предшественников: алюминий, пришедший на смену стали, и пластик, заменивший стекло – вот два наиболее очевидных примера. И хотя многие инновации, ко-

торые позволили снизить расходы на производство, были разработаны специально, чтобы заполнить нишу, некоторые изначально не имели никакого отношения к своему широкому коммерческому применению: метод выращивания монокристаллов, разработанный Чохральским, ставший материальной основой современной твердотельной электроники – лучший тому пример (Scheel и Fukuda, 2004).

В подавляющем большинстве случаев эти сложные динамические взаимодействия процессов удешевления энергии, сырья и производства привели к такой распространенности большого количества продуктов и постоянно расширяющегося ассортимента услуг, что даже впечатляющие результаты по экономии материала в продуктах, сопровождающие увеличение их потребления, не позволяют говорить ни о каком уменьшении использования материалов в целом. Действительно, нет никаких сомнений в том, что удельная дематериализация стала ключевым (и нередко основным) фактором значительного увеличения общего расхода материалов. Таким образом, меньше стало значить больше.

Это парадоксальное явление было впервые описано полторы сотни лет назад английским экономистом Уильямом Стенли Джевонсом в связи с расходом энергии:

Предположение о том, что экономия топлива эквивалентна снижению его потребления, является заблуждением. Верно обратное. Как правило, новые экономические режимы ведут к увеличению потребления, в соответствии с принципом, действующим во многих подобных случаях (Jevons, 1865, с. 140; жирный шрифт в соответствии с оригиналом).

Экономия в результате повышения эффективности преобразования энергии привела к ее более частому использованию и к общему увеличению использования топлива и электричества.

Тому есть множество примеров: сравните количество лампочек и электроники в среднестатистическом доме в 2010 году и в 1930, когда производство энергии было намного менее эффективным. В 1930 году даже в самых богатых странах в среднестатистическом доме было несколько (6-8) лампочек, радиоприемник и, может быть, электроплита. 80 лет спустя в каждом доме имеется в среднем более двух дюжин различных осветительных приборов, несколько электроприборов, в том числе такие энергоемкие устройства, как холодильник, электроплита, тостер, стиральная машина, посудомоечная машина, сушилка для белья и кондиционер, и все больше и больше электронных гаджетов, начиная с телевизора и CD-плеера и заканчивая игровыми приставками, персональными компьютерами и мобильными телефонами. Очевидно, удельная дематериализация явно является одним из тех «многих подобных случаев», о которых Джевонс говорил «меньше стало значить больше».

Постепенное снижение массы (а, следовательно, и стоимости) отдельных продуктов, будь то потребительские товары или мощные двигатели, привела к их более широкому использованию, а также применению в более тяжелых (более мощных, более крупных, более удобных) машинах. Это неизбежно привело к очень резкому росту спроса на материалы, даже учитывая рост населения и количества компаний. Наиболее очевидный пример такого увеличения в наши дни – мобильные телефоны. Поистине взрывное распространение более чем сгладило их эволюцию от «кирпи-

чей» к тонким (в некоторых случаях тоньше карандаша) конструкциям, а в результате мы получили значительный рост спроса на энергоемкие материалы. Учитывая, что средняя масса мобильного телефона в 1990 году (когда их было около 11 миллионов) составляла 600 г, а в 2011 году (почти 6 миллиардов абонентов) – уже 118 г, совокупная масса мобильных телефонов выросла с менее чем 7 тысяч тонн в 1990 году до более чем 700 тысяч тонн, то есть на два порядка.

Эволюция американских легковых автомобилей и, в частности, их двигателей – еще один хорошо задокументированный пример удельной дематериализации, не сопровождаемой никаким совокупным снижением количества материалов. Улучшение соотношения мощности и массы американских бензиновых двигателей (в Европе чаще используются дизельные двигатели, но в США их доля выросла с 0,2% новых моделей в 1975 году до всего лишь 0,6% к 2011) вызвало снижение спроса на материалы, необходимые для производства этих двигателей, но широкое распространение этих относительно дематериализованных двигателей, их более высокая мощность и большая масса машин перевесили эту тенденцию.

Вот подробное сравнение ситуации в 1920 и 2010 годах. В 1920 на рынке доминировал Ford Model T с двигателем мощностью 15 кВт (20 л.с.) с низкой компрессией (4,5:1) и массой 230 кг, то есть соотношение массы и мощности составило 15,3 г/Вт. К 2010 году самый популярный легковой автомобиль компании – Ford Fusion – был оборудован двигателем Duratec 25 I-4 мощностью 130 кВт (с высокой компрессией 9,7:1) и массой всего 120 кг, то есть соотношение массы и мощности стало всего 0,92 г/Вт.

Примем за среднее соотношение консервативный показатель 1 г/Вт для всех легковых автомобилей, зарегистрированных в 2010 году, и окажется, что типичное соотношение массы и мощности бензиновых двигателей, устанавливаемых в пассажирских автомобилях, за 90 лет снизилось на 93%.

Впрочем, эти выдающиеся улучшения в среднем отношении массы к мощности бензиновых двигателях сопровождались значительным ростом средней мощности двигателя. Двигатель в Ford Fusion в 8,7 раз более мощный, чем в Model T, но он не отражает общего уровня роста мощности, поскольку за последние 30 лет доля легких грузовиков и кроссоверов на рынке выросла. Средняя мощность новых автомобилей, проданных в 1972 году, составила 102 кВт, а затем (в результате быстрого подорожания цен на сырую нефть) снизилась до 80 кВт в начале 1980-х, но вскоре после того, как цена на сырую нефть упала, мощность снова начала расти. В 2003 году средняя мощность новых автомобилей превысила 150 кВт, а после небольшого падения в 2009 году достигла нового рекордного значения в 170 кВт в 2011 году (USEPA, 2012). Средняя мощность новых автомобилей в США в период с 1920 по 2011 год выросла более чем в 11 раз. Даже приняв среднюю мощность двигателей всех транспортных средств, зарегистрированных в 2011 году, за 150 кВт, рост по сравнению с 1920 годом будет почти в 10 раз.

Неудивительно, что наблюдается тесная взаимосвязь между средней мощностью и средней массой автомобиля: в 1920-х и 1930-х годах автомобили стали тяжелее, поскольку стали выпускаться с полностью закрытым металлическим корпусом, а их комфортность продолжала расти, что требовало использования более мощных и тяжелых двигателей. В 1908 году Ford Model T весил всего 540 кг, а через 30 лет

популярный седан Model 74 – уже 1090 кг. С 1950 года вес автомобилей малой грузоподъемности вырос, поскольку они стали больше и снабжались большим количеством оборудования. Эта тенденция усилилась благодаря быстрому вхождению в обиход внедорожников и популяризации использования фургонов и легких грузовиков в качестве пассажирских машин, на которых обычно ездил всего один пассажир. Автоматические коробки передач (ими оборудовано около 95% новых американских автомобилей), кондиционеры, сервоприводы для управления окнами и зеркалами, аудиосистемы и лучшая изоляция дополнительно увеличивают массу среднестатистического автомобиля. Впрочем, пока цены на сырую нефть оставались невысокими, американских автомобильных конструкторов не слишком волновал вес автомобилей, в отличие от их (зачастую сомнительного) внешнего вида.

В результате в 1975 году (год, когда Агентство по охране окружающей среды США начало отслеживать реализацию новых автомобилей), когда средняя масса легковых автомобилей в Европе оставалась в пределах 750–900 кг, в США этот показатель (для легковых и легких грузовых автомобилей) составил 1,84 т. Два раунда быстрого повышения цен на нефть в 1970-х создали благоприятную ситуацию для производства автомобилей поменьше, и средняя масса новых автомобилей в США к 1981 году снизилась до 1,45 т. Однако когда цена на нефть в 1985 году снова упала, крупные легковые и легкие грузовые автомобили снова вошли в моду, а появление кроссоверов только усилило эту тенденцию. В 1975 году на долю кроссоверов приходилось менее 2% рынка новых автомобилей, через десять лет – чуть больше 5%, однако к 1995 их было уже 12%, а к 2004 новые пассажирские автомобили стали тяжелее, чем в 1975 году, достигнув рекордного среднего веса в 1,86 т. К 2005 году доля кроссоверов составила почти 26% (наиболее тяжелые конструкции которых весили 4,7 т), а к 2010 году лишь незначительно сократилась примерно до 25% (USDOE, 2005; Davis и соавт., 2011).

Поскольку к 2011 году автомобильный рынок в Америке был поделен десятками брендов и сотнями моделей, самым продаваемым автомобилем 2011 года оказался не пассажирский автомобиль, а тяжелый (2130 кг) пикап Ford F-150. Благодаря значительной доле легких грузовиков и кроссоверов, средний вес нового автомобиля в 2000 году превысил 1,7 т и, после небольшого снижения в 2009 и 2010, в 2011 приблизился к рекордным 1815 килограммам, почти не изменившись с 2004 года (USEPA, 2012b). Это значит, что в период с 1920 по 2011 год вес автомобилей увеличился в 3,4 раза. Показатели, приведенные в Таблице 5.1, свидетельствуют о том, что, хотя в период с 1920 по 2011 год среднее отношение массы автомобиля к его мощности снизилось на 93%, средняя мощность двигателя увеличилась более чем в 11 раз: это увеличение нейтрализовало 75% экономии материала, которая стала возможной благодаря улучшению отношения массы двигателя к его мощности, а остальную четверть экономии перечеркнуло увеличение конечного веса автомобиля более чем в 3 раза.

Таблица 5.1 Вес, мощность двигателя и отношение массы к мощности в американских автомобилях в 1920–2011 гг.

	Автомобиль		Двигатель	
	вес, кг	вес, кг	мощность, кВт	масса/мощность, г/Вт
1920	540	230	15	15,3
2011	1850	170	170	1,0
Увеличение, раз	3,4	0,74	11,3	0,06

В пересчете на душу населения эти показатели выглядят еще более удручающе, поскольку количество владельцев автомобилей за все эти годы только увеличилось: если в 1920 году было зарегистрировано 8 автомобилей на 100 человек, то в 1950-м это уже 27 автомобилей на 100 человек. После этого нормой стало иметь несколько автомобилей в семье: в 1950 году лишь 3% семей в США имели по два автомобиля, к 1965 году эта цифра достигла 24%, к 2011 году – почти 40%, причем около 20% из них владеют тремя и более машинами, что в общем составляет 80 автомобилей на 100 человек. Таким образом, с 1920 по 2011 год число автомобилей, зарегистрированных на 100 человек, выросло почти в 10 раз, и даже без учета роста населения (с 106 до 308 млн человек), которое при прочих равных привело бы к появлению в три раза большего количества автомобилей, совокупное влияние увеличения мощности, массы и количества автовладельцев привело к увеличению расхода материалов на пассажирские автомобили на душу населения в 2011 году в 35 раз по сравнению с 1920.

Похожие тенденции в отношении веса автомобилей и владения ими наблюдаются в Европе и Японии. В 1973 году первая Honda Civic, завезенная в США, весила всего 697 кг, а Civic (LX) 2012 года с автоматической коробкой передач и кондиционером в стандартной комплектации, на 70% больше – 1198 кг; при этом мощность двигателя выросла в 2,8 раза (с 37 до 105 кВт). Снаряженная масса другого бестселлера компании – Honda Accord – выросла более чем на 50% с 1980 по 2012 год, тогда как мощность двигателя увеличилась почти в три раза. И хотя некоторые старые европейские автомобили, разработанные после Второй мировой войны, весят менее 600 кг (Citroen 2 CV – 510 кг, Fiat Topolino – 550 кг), средняя масса европейских малолитражных автомобилей выросла примерно до 800 кг к 1970 и 1200 кг к 2002 году (WBCSD, 2004). С 1995 года средний вес автомобиля существенно вырос почти в каждом сегменте: европейские производители в среднем добавляли по 100 кг каждые пять лет, причем сегодня многие модели весят более 1500 кг (Cuenot, 2009).

Количество личных автомобилей в Японии выросло с 1 автомобиля на 100 человек в начале 1960-х до почти 50 автомобилей на 100 человек к 2011 году; в Германии за этот же период количество автомобилей выросло почти в 6 раз до более чем 50 автомобилей на 100 человек. Большая распространенность и вес личных автомобилей привели к увеличению совокупной массы европейских и японских автомобилей на столько же порядков (10^1), что и в США. Вот такая вот дематериализация самых распространенных машин современности!

Новые изобретения – гибридные приводы и электромобили – не приведут к уменьшению веса пассажирского транспорта, ведь они требуют использования более сложной трансмиссии и тяжелых аккумуляторных батарей. Например, Volt, выпущенный General Motors в 2012 году, весит более 1,7 т, а электрическая версия Ford Focus – 1,67 т. Еще один показатель, который необходимо учитывать при оценке расхода материалов в производстве пассажирских автомобилей – это средняя эффективность топлива: очевидно, что последовательное улучшение этого показателя значительно повлияет на расход материалов при добыче, транспортировке, очистке нефти и распределении продуктов нефтепереработки.

В США произошло нечто прямо противоположное: средняя производительность новых транспортных средств снижалась на протяжении более чем четырех десятилетий, а затем после десяти лет улучшений наступила двадцатилетняя стагнация. В 1936 году (это первый год, с которого можно достоверно рассчитать среднее потребление топлива) средняя производительность новых автотранспортных средств составляла более 15 миль на галлон (то есть около 15,7 л/100 км), а к 1973 году снизилась до 13,4 миль на галлон (18 л/100 км) (Сивак и Tsimhoni, 2009) – замечательный пример регресса в эпоху стремительных технических улучшений. Тенденция изменилась только благодаря инициативе ОПЕК по поднятию цен на сырую нефть: в 1975 году Конгресс США принял закон о Гарантированных корпорацией средних нормах экономии топлива (SAFE), а в 1978 году было отмечено первое утвержденное улучшение эффективности.

К 1985 году производительность автомобилей, зарегистрированная до 1975 года, повысилась более чем в 2 раза и достигла 27,5 миль/галлон (около 8,7 л/100 км). Но в то время, несмотря на падение цен на сырую нефть (с почти 40 долларов за баррель в 1980 году до примерно 15 в 1986) нормы SAFE не менялись более 20 лет; с появлением кроссоверов, на которые эти нормы не распространялись, расход топлива в новых автомобилях (отражающий реальную ситуацию вождения, а не лабораторные тесты) составил всего 21 милю на галлон (11,2 л/100 км) в 2008 году, что на 5% меньше, чем в 1987 году (10,69 л/100 км), а к 2011 году этот показатель возрос до 22,8 миль на галлон (10,3 л/100 км) – удивительно низкая производительность и невероятное отсутствие прогресса за четверть века, полную важных технических инноваций.

Таким образом, в США не наблюдалось никакой прогрессивной дематериализации автотранспорта, поскольку вплоть до 2004 года среднее расстояние, проезжаемое на автомобиле на душу населения, постоянно росло, а вместе с ним росли производство и распределение топлива, расходы материала на амортизацию, обслуживание автомобилей и ремонт дорог. В то время как в Японии и Европе среднее расстояние, ежегодно проезжаемое на автомобиле, выравнивалось на относительно низком уровне, в США этот же показатель на душу населения утроился в период с 1950 по 2000 год (с 4800 до более чем 15 500 км) и достиг максимума в 16 165 км в 2004 году, а к 2010 упал примерно на 5% (BTS, 2013). Вывод ясен: удельная дематериализация двигателя внутреннего сгорания и использование более легких элементов и химических соединений в конструкции транспортных средств только замедляет рост общего расхода материалов на их производство и эксплуатацию. К 2010 году (после замедления роста численности населения) сочетание роста количе-

ства тяжелых легковых автомобилей, легких грузовиков и кроссоверов с непристительно низкой средней эффективностью и растущей дальностью перевозок привело к увеличению средней массы автомобилей в Америке на душу населения более чем в 30 раз по сравнению с 1920 годом.

Аналогичный расчет удельной дематериализации двигателей и быстро растущего потребления материалов можно сделать и для современной авиаиндустрии. Тяговооруженность крупнейших турбовентиляторных двигателей (например, установленных в Боинге-747 и Аэробусе-380) сегодня примерно на 60% выше, чем у первых турбореактивных самолетов конца 1950-х – но такая значительная дематериализация производительности сопровождалась введением более мощных двигателей, необходимых для еще более крупных самолетов. В первой модели Боинг-707 был установлен двигатель Pratt&Whitney JT3D с номинальной тягой 80 кН, тогда как мощнейший двигатель первого десятилетия XXI века – GE GE0-115 В – обладал тягой 512 кН, а двигатели в реактивных лайнерах среднего размера, используемых для большинства внутриконтинентальных полетов (модели Боинг-737 и Аэробус-320), обладают тягой от 100 до 150 кН и являются на 25–50% более мощными, чем первые коммерческие турбореактивные самолеты (Smil, 2010).

Авиационная промышленность стала главным пионером замены материалов на легкие металлы и химические соединения – эта тенденция сейчас достигла кульминации в преимущественном использовании углеродных композитов. Но такая относительная дематериализация не привела к появлению более легких коммерческих самолетов, поскольку стали выпускаться более крупные машины. Эту тенденцию лучше всего видно в развитии Боинга-737 – самого успешного реактивного лайнера всех времен: с момента его введения в 1967 году было продано более 7000 единиц, причем каждая последующая модель весила больше предыдущей. В 1967 году максимальный взлетный вес Боинга 737-100 был чуть меньше 50 т, к 1981 году взлетный вес серии 300 составил уже 56,5 т; самолеты серии 800, находящиеся в эксплуатации с 1998 года, весят 79 т, а последняя разработка – 900ER, эксплуатируемая с 2006 года, весит 85,13 т, что свидетельствует об увеличении максимального взлетного веса на 70% за 40 лет. Растущая вместительность самолетов Боинг-737 (100 пассажирских мест в серии 100 и 203 – в серии 900) сделала возможной удельную дематериализацию самолетов в расчете на пассажира: максимальный взлетный вес уменьшился с 494 кг/чел до 419 кг/чел, то есть на 15% за 39 лет.

Но эта тенденция касается далеко не всех самолетов. Например, максимальный взлетный вес Боинга-747 вырос с 333 т у самолетов серии 100, запущенной в производство в 1969 году, до 442,25 т у последней версии 747-8i, но (из-за большей максимальной дальности полета) вырос и удельный вес: от всего лишь 605 кг/чел в 1969 году до почти 950 кг/чел в модели 747-8. Вопреки впечатлению от беспрецедентного использования композитных материалов в этой новой модели, масса Боинга-787 без топлива больше, чем масса Боинга 747-8: если рассчитать удельный вес при размещении третьего класса (467 человек в модели 747, 242 человека в модели 787), то для меньшего самолета он составит 665 кг/чел, а для большего – 623 кг/чел (Boeing, 2012). В любом случае, значительное увеличение общего числа действующих самолетов и невероятное увеличение частоты полетов имеют гораздо большее значение.

Только за счет увеличения населения США флот коммерческих реактивных лайнеров страны и пассажирские перевозки увеличились бы на 70%, однако в действительности в период с 1960 по 2010 год общий флот коммерческих реактивных лайнеров вырос в 3,5 раза, а перевозки только на внутренних рейсах – в 18 раз. Очевидно, что удельная дематериализация реактивных двигателей и некоторых конструкций самолетов лишь слегка тормозит общий рост расхода материалов в американской авиационной промышленности, которая выросла не только за счет увеличения количества и размера самолетов и использования более мощных двигателей, но и косвенно за счет значительного увеличения количества потребляемого топлива, частоты полетов и необходимости во вспомогательных службах (погрузочно-разгрузочные работы, кейтеринг, обслуживание самолетов), а также непрекращающегося развития аэропортов и их инфраструктуры. Этот же процесс происходит сейчас в Китае, где темпы роста авиации уже вытеснили всякую экономию материала за счет использования новейших конструкций двигателей и реактивных лайнеров.

Еще один пример долгосрочных тенденций в потреблении продуктов на фоне удельной дематериализации показывает, что даже в сочетании с относительно высокими показателями переработки уменьшение массы на единицу продукции недостаточно, чтобы компенсировать рост потребления на душу населения. Данные о фактических поставках банок для напитков американского производства есть лишь начиная с 1979 года: в период с этого по 2011 год вес банки уменьшился на 25%, но потребление алюминиевых банок на душу населения за год удвоилось: с 149 до 296 (АА, 2013): удельная дематериализация опять способствует абсолютному увеличению расхода материалов.

И как ни странно, даже рост переработки алюминиевых банок в стране не привел к общей экономии энергии. Как уже отмечалось, в 2011 году коэффициент переработки достиг 65% (АА, 2012). Это значительно влияет на общую стоимость энергии, поскольку затраты энергии на банки, изготовленные из переработанного металла, составляют всего 5% от того, что требуется для производства банок с нуля. Но даже предположив, что в 1979 году перерабатывали только 30% банок, и энергетические затраты на производство алюминия были на 10% выше, чем в 2011 году, мы получим одни и те же затраты на производство банок из нового и переработанного алюминия на душу населения что в 2011, что в 1979 году, то есть побочный эффект относительной дематериализации (затраты энергии) не привел к абсолютной экономии. Несомненно, меньшая масса на единицу продукции и рост переработки позволили производить в два раза больше банок с теми же энергозатратами, но общее количество задействованных в производстве материалов увеличилось.

Наконец, необходимо отметить случаи сокращения удельного веса продукции, которые сопровождались увеличением не только общего расхода материалов, но и затрат энергии на единицу массы новых материалов. На сегодняшний день наиболее распространенным примером этого является замена стали на алюминий. Удельная плотность стали колеблется между 7,7 и 8,0 г/см³, тогда как сплавы на основе алюминия обладают плотностью 2,6–2,8 г/см³. Снова обратимся к автомобильной промышленности США, чтобы понять последствия того сдвига, который в крупных масштабах начался в конце 1970-х, когда чугунные впускные коллекторы начали заменять алюминиевыми. На эту замену потребовалось несколько лет, а затем из

алюминиевых сплавов стали изготавливать головки цилиндров, манжеты поршней, блоки цилиндров, корпуса коробки передач и колеса.

В результате к 2000 году общий вес алюминия в среднестатистическом автомобиле американского производства увеличился в два раза (120 кг) по сравнению в 1980 годом и в четыре – по сравнению в 1960 годом (АА, 2003). Если предположить, что стальные и железные детали имели тот же объем, что и заменившие их алюминиевые (на самом деле, объем отличается, но на расчеты это повлияло бы лишь незначительно), 120 кг алюминия заменило примерно 350 кг стали. Но хотя сталь почти в три раза тяжелее алюминия, затраты энергии на ее производство составляют меньше трети энергии, нужной для производства последнего. Лучшие в США средние показатели общей энергетической стоимости производства стали составляют 20 МДж/кг, а алюминия – примерно 218 МДж/кг, то есть разница на порядок (Worrell и соавт., 2008). Для производства некоторых особых видов стали требуется 50 МДж/кг, но даже в этом случае сохраняется разница более чем в 4 раза. Таким образом, для производства 120 кг алюминиевых деталей для среднего автомобиля в США потребуется около 24 ГДж энергии, а производство 350 кг чугуна и стали стоит не более 8 ГДж – разница в 4 раза.

Следовательно, все сокращения веса, связанные с заменой стали алюминием, привели к значительному повышению энергетических затрат на материалы. В то же время следует отметить, что это различие можно сократить за счет снижения эксплуатационных расходов на легкие автомобили, железнодорожные вагоны, и это снижение будет тем больше, чем больше материалов будет заменено: в автомобилях из алюминия изготавливается лишь несколько деталей, но в железнодорожном транспорте он является основным компонентом; колеса и колесная тележка все еще производятся из стали, но в корпусах как крупных грузовых вагонов, используемых для перевозки руды и других продуктов, так и скоростных пассажирских поездов (японский *синкансэн*, французский TGV и испанский AVE, развивающие скорости до 300 км/ч и более), применяются более легкие сплавы. Алюминиевые грузовые вагоны типа Норрег имеют еще одно преимущество, которое снижает затраты энергии на их эксплуатацию: даже через 20 лет службы потеря металла стен и пола составляет на 25% меньше, чем в стальных (АА, 2003).

Замена чугуна и стали на пластмассы приносит те же преимущества (более легкие детали, экономия энергии в производстве тех машин, в которых эти детали составляют большую часть общей массы) и недостатки (неизменно более высокие затраты энергии на производство: большинство видов пластика требуют в 4–6 раз больше энергии на единицу массы, чем легированная сталь). Опять же, последствия этой замены лучше всего видны при сравнении расходов на эксплуатацию энергоемкого транспорта в течение всего срока его службы. Наиболее яркий пример тому – реактивные лайнеры: в интерьере крупного самолета сегодня используется более 5 т передовых термопластиков и других синтетических и композитных материалов, из которых изготавливаются пол, потолочные панели, багажные полки над сиденьями, оконные рамы, кресла, бортовые кухни и тележки, туалетные модули и шторы, разделяющие классы (Composites World, 2006).

Можно привести еще много примеров, где замена одних материалов другими, более легкими или обладающих лучшими или уникальными свойствами, позволила-

шая снизить вес конечного продукта, привела к значительному повышению энергопотребления. Вот некоторые из них: пластиковые напольные покрытия в интерьере, заменившие деревянные и кафельные; титан вместо стали в деталях самолетов, полиэтилен, пришедший на смену парусине, пластиковые (полиэтиленовые или полипропиленовые) контейнеры для мусора, повсеместно распространившиеся вместо тяжелых оцинкованных. Возникает очевидный вопрос: к каким последствиям привела эта удельная дематериализация продуктов и целых секторов в масштабе страны?

5.4 Удельная дематериализация в современной экономике

Первая стадия интенсивной модернизации (во второй половине XIX века в большинстве стран Атлантической части Европы и Северной Америки; после 1950 года в Китае) характеризуется ростом спроса на конструкционные материалы: как на традиционные, включая древесину, камень, песок, минеральные материалы, так и на цемент и продукты переработки нефти в целях строительства дорог, развития материалоемких перевозок, создания промышленных и жилых инфраструктур. Этот этап также характеризуется быстрым ростом потребления основных металлов, объясняющимся беспрецедентными темпами урбанизации, индустриализации, строительства железных дорог и (в прибрежных государствах) новых кораблей со стальным корпусом.

Расход материалов на следующем этапе материального потребления рос в силу непрекращающейся индустриализации и новой фазы урбанизации, которая ознаменовалась широким распространением электричества и автомобилей; эти отрасли в свою очередь требовали материальных затрат на добычу ископаемых видов топлива, выработку электричества и строительство дорог. Еще одним важным фактором является рост использования сельскохозяйственных ресурсов (удобрений, техники), поскольку рост чистых доходов ведет к повышению спроса на продукты животного происхождения, что стимулирует механизацию и химизацию этого сектора. Прекрасными примерами этой фазы спроса являются Соединенные Штаты 1920-х годов, ведущие европейские страны и Япония 1950-х, а также Китай после 1980 года. Использование некоторых традиционных материалов в конечном итоге неизбежно достигает своего предела, и это ведет либо к временному плато в потреблении, либо, как часто бывает, к возвращению показателей на прежний, более низкий, уровень по мере снижения расходов на определенные материалы (Herman *и соавт.*, 1990; Bernardini и Galli, 1993).

Это постоянное снижение расхода традиционных материалов на единицу экономического продукта, сопровождающее второй этап материального потребления, – возможно, наиболее часто упоминаемая категория удельной дематериализации. Пожалуй, этот процесс лучше назвать сокращением массы, поскольку его можно измерить сокращением массы конкретного продукта, сокращением потребления на душу населения за год (например, среднее потребление древесины в США на душу населения за двадцатый век снизилось с 791 до 282 кг) либо сокращением веса конкретного материала или всех материалов, используемых экономикой страны за год

на единицу экономического продукта. Ярким примером этой последней категории будет потребление всех металлов в США, которое снизилось с примерно 27 кг/доллар ВВП в 1900 году до менее чем 15 кг/доллар к 2000 году, то есть на 45% за столетие (Matos, 2009).

Естественным результатом этого процесса является активизация международной торговли, в результате чего в богатых странах повышается доля импортных энергоемких материалов и снижается (или даже полностью исключается) доля таких материалов собственного производства. Все эти события – ожидаемые результаты развития материального потребления в современной экономике страны, приближающейся к постиндустриальной эпохе. Их следует рассматривать как часть более общего процесса относительного переупорядочения потребления, сопровождающего рост благосостояния. Более 150 лет назад Э. Энгель (Engel, 1857) отметил, что доля чистого дохода, потраченная на еду, снижается по мере роста дохода – что неизбежно, учитывая тот простой факт, что для долгой и здоровой жизни человека калорийность его ежедневного рациона не должна превышать 9 МДж (менее 2200 ккал); стоимость такого количества еды соответствует сегодня менее чем 10% среднего дохода в Америке (и примерно 15% среднего дохода в Европе) (USDA, 2012).

Есть множество других примеров продуктов, потребление которых также достигло плато или откатилось на более низкий уровень. Даже в отсутствие технических достижений средние расходы домохозяйств на приготовление пищи, освещение и отопление в конечном счете будут покрыты, и по мере дальнейшего повышения эффективности их доля в доходе будет снижаться: в 2010 году в США доля среднего чистого дохода, которой покрывались расходы на домашние источники энергии, в том числе бензин для автомобилей, составила всего 12% (USCB, 2012). Что касается материального потребления, рост дохода, очевидно, не приводит к соразмерному увеличению спроса на широкий ассортимент промышленной продукции от бытовых приборов до мебели. В то же время распространение владения все более широким ассортиментом потребительских товаров и тщательно спланированное устаревание многих продуктов препятствуют дематериализации даже в самых богатых странах, уже насыщенных товарами, а последствия этого можно разглядеть, только рассмотрев эволюцию совокупного спроса в современной экономике.

Насколько точно он следует описанной нами схеме энергичного подъема, насыщения и затем относительного спада? Перефразируем этот вопрос в терминах макроэкономики: насколько рост ВВП разошелся с общим потреблением материалов? Немного, когда материальное потребление растет медленнее, чем ВВП, или намного, когда материальное потребление испытывает абсолютный спад даже при росте ВВП с поправкой на инфляцию?

Ограниченность доступных нам данных усложняет ответ на этот вопрос. Данные о ВВП в постоянных ценах легко доступны, и в богатых странах есть серии продуктов, которые начали производиться еще в конце девятнадцатого века. Однако (за исключением некоторых известных случаев) коммерческие данные, необходимые для расчета фактического внутреннего потребления либо не так последовательны, либо существуют только в стоимостном выражении; итоговые значения по крупным категориям материалов (конструкционные материалы, металлы, минералы) либо не найти, либо нужно восстанавливать из неполных записей; а до недавних пор ника-

кие страны, кроме США, не вели долгосрочных записей совокупного потребления материалов.

Как уже указывалось, сравнительные реконструкции А. Адриаансе и его коллег (Adriaanse и соавт., 1997) и Э. Мэтьюса и его коллег (Matthews и соавт., 2000) предлагают только довольно краткосрочные (1975–94 и 1975–96) расчеты внутреннего валового воздействия промышленности и потребления на окружающую среду (domestic processed output, DPO), объема скрытых потоков и общего объема внутреннего производства (total domestic output, TDO²¹) всех материалов (включая и исключая использование технических газов) в Германии, Японии, Нидерландах и США, а также в Австрии (во втором отчете). Область применения любых общих выводов, основанных на этих исследованиях, ограничивается коротким промежутком времени, а также некоторыми очевидными национальными особенностями.

Общий объем внутреннего производства в Германии на единицу национальной валюты (кг/марку) снизился примерно на 20% с 1975 по 1990 год, но воссоединение с Восточной Германией (с включением в экономику страны менее эффективной восточногерманской промышленности и значительных скрытых потоков, связанных с добычей бурого угля в ГДР) привело к временному повороту в этой тенденции. Значительное снижение общего внутреннего производства в Японии из расчета на постоянную йену закончилось после 1990 года, когда экономика страны вошла в свое первое потерянное десятилетие.

Те же ограничения применяются к новым показателям потребления материалов в ЕС, систематически публикуемым с 2000 года. Эти данные представляют собой наиболее подробный однородный расчет материальных потоков для множества разных стран, но краткость периода, к которому он относится (на 2012 год менее десятка лет), откаты экономики всех стран к более раннему уровню начиная с 2008 года в силу мощнейшего экономического кризиса со времен Второй мировой войны, а также национальные особенности не позволяют нам сделать обобщенный вывод в отношении сколько-нибудь долгосрочных тенденций. Кроме того, в совокупность материалов, используемых в ЕС, входят все виды ископаемого топлива – что приводит к увеличению как явных, так и скрытых материальных потоков в тех странах, которые сильно зависят от угля – но не входят удобрения, материалы, которые стали решающим фактором в процветании сельскохозяйственного сектора в Европе. Учитывая эти реалии, статистические данные показывают, что в период с 2000 по 2009 год ресурсоотдача – показатель, обратный удельной дематериализации, измеряется в евро/кг и включает в себя все ископаемые виды топлива – увеличилась в большинстве стран ЕС.

Средний рост продуктивности в странах Евросоюза составил 17%, причем для Германии – 23%, для Франции – 22%; наиболее высокий рост показали Латвия (56%) и Чехия (на 40% в основном из-за снижения потребления бурого угля). В среднем за год наблюдалось небольшое (-0,3%) снижение общего внутреннего потребления материалов в 27 странах Евросоюза (ЕС-27), несмотря на то, что ВВП в этот период вырос почти на 17%; наиболее серьезным это снижение было в Италии (-2,8%/год),

²¹ Общий объем внутреннего производства (total domestic output) равен сумме DPO и объема скрытых потоков. – *Прим. пер.*

Нидерландах (-2,1%) и Великобритании (-1,8%). Для ЕС в целом первое десятилетие XXI века характеризуется ослаблением зависимости роста ВВП и потребления материалов, в Италии, Нидерландах и Великобритании происходит сильное расхождение показателей, в то время как в Германии, ВВП которой вырос примерно на 9%, общее потребление материалов упало почти на 14%.

В 15 странах (в том числе Польше, Кипре, Мальте, Словакии, Ирландии и Болгарии), напротив, потребление материалов росло медленнее, чем ВВП. Например, в Польше общий расход материалов (включая значительные объемы добычи угля в стране) вырос на 12% в период с 2000 по 2009 год, а ВВП вырос почти на 50%; в то время как для Словакии разница была намного меньше: рост расхода материалов за тот же период составил 35%, а ВВП – 55%. Наиболее примечательным исключением из этой тенденции является Румыния: ВВП страны за десять лет вырос примерно на 55%, а потребление материалов – в 2,5 раза – яркий пример роста неэффективности использования материалов и зависимости роста экономики от более высоких материальных затрат.

Более подробный анализ показывает значительное снижение расходов металлических руд и продуктов (за десять лет в ЕС-27 снижение на 3,3%, в Германии на 3,4%, во Франции на 9,4%, в Италии на 6,3%) и рост расхода неметаллических минералов (на 1,4% за год в ЕС-27) и количества отходов. Некоторые исключительные показатели (например, увеличение расхода песка и гравия в Нидерландах в период с 2000 по 2009 год и снижение потребления металлической руды Румынией на 13,3% за тот же период) отражают национальные особенности (в Нидерландах – преобразование земель ниже уровня моря в сельскохозяйственные и жилые районы и укрепление береговой защиты, закрытие неприбыльных глубоких шахт в Румынии).

Для некоторых стран благодаря недавно опубликованным расчетам общих материальных затрат (OMЗ, TMR) можно проанализировать более длительный исторический период: я уже упоминал исследование материального потребления в Японии с 1887 по 2005 год Фридолин Краусманн и ее коллеги (Krausmann и соавт., 2011); Хайнц Шандль и Нильс Шульц (Schandl и Schulz, 2002) отследили потребление в Великобритании в период с 1850 по 1997 год, а Ян Кованда и Томас Хак (Kovanda и Hak, 2011) провели подобный анализ в Богемии и Моравии (с 1993 года – Чехии) в период с 1855 по 2007 год. Во все эти исследования входят такие показатели, как потребление ископаемого топлива (добыча которого представляла собой основную долю внутреннего производства материалов во второй половине девятнадцатого и первой половине двадцатого веков), пищевых культур, материалов, не включенных в нашу книгу, и представляет их только в очень укрупненной форме.

Следовательно, лучший способ оценки долгосрочной корреляции расхода материалов и экономического развития – основываться на подробных и достоверных данных по США, доступных на период продолжительностью более века. Как уже объяснялось, эти данные по расходу материалов в экономике страны собираются Геологической службой США (US Geological Survey): первая версия включала в себя данные за период с 1900 по 1995 года (Matos и Wagner, 1998), а затем ее расширили, включив данные за период с 2006 по 2010 год (Matos, 2009; Kelly и Matos, 2011). В анализ входят данные по продуктам сельского и лесного хозяйства (древесина, бумага, картон и вторичная бумага), металлам и минералам (поделенные на следу-

ющие категории: первичные и переработанные металлы, промышленные и строительные металлы), израсходованным на промышленное производство в США и не входят древесное и ископаемое топливо (поскольку большая доля этих материалов расходуется потребителями напрямую), но входит вся фитомасса, используемая в производстве (от хлопка до шерсти и от древесины до вторичной бумаги).

Для количественной оценки дематериализации экономики США в XX веке я использовал ВВП США с поправкой на инфляцию в пересчете на неизменный курс доллара (2005 года) и показатели общего потребления материалов в стране, подготовленные Гресией Матос (Matos, 2009). Материалоёмкость американской экономики сначала растёт с 340 г/доллар в 1900 году до 500 г/доллар в 1929 году, затем колеблется в течение сорока лет (опускаясь до 260 г в 1945 г и поднимаясь до 540 г в 1960 году) и неуклонно снижается с 490 г в 1970 году до 300 г в 2000 году и 290 г в 2005 году, то есть примерно на 40% за 35 лет. Удвоение средней материалоёмкости после Второй мировой войны неудивительно, учитывая, что большую часть общей потребности в материалах составляют минералы, используемые в строительстве, и что в первые послевоенные десятилетия наблюдался беспрецедентный рост их использования в строительстве новых домов, промышленной и транспортной инфраструктуры. Среди них преобладали камень, песок и гравий, и их доля в расходе материалов в США выросла с 54% от общего числа материалов в 1945 году до 72% в 1960 году.

Если мы исключим стройматериалы, тенденция станет намного более ясной: использование материалов достигло пика (230–280 г/доллар) во втором десятилетии XX века, а затем, за исключением небольшого подъёма после Второй мировой войны, снижалось до 150 г в 1960 году и 75 г к 2000 году – почти на 75% за 90 лет. Это снижение почти везде сопровождалось снижением использования металлов (как первичных, так и возвращенных в оборот после переработки) к ВВП США, которое снизилось с 44 г/доллар в 1920-м до 13 г к 2000 году (и 11 г к 2005). Единственный материал, снижение расхода которого оказалось еще больше – это древесина: с 150 г/доллар в 1910 году показатель упал до менее чем 30 г к 1950 году и всего 7 г к 2008 году. Использование строительных материалов на единицу ВВП, колеблясь, выросло со 130 г/доллар в 1900 году до своей высшей точки в примерно 400 г в начале 1960-х с последующим спадом до менее чем 230 г в начале XXI века.

Эта общая тенденция к сокращению выразилась как в продолжительном и значительном снижении расхода некоторых материалов (например, дерева – со 157 г/доллар в 1900 году до 8 г/доллар в 2000 году), так и в медленном и менее заметном снижении для других материалов (первичные металлы – с 27 г/доллар в 1900 году до 25 г/доллар в 1950 и до 8 г/доллар к 2000 году), а также постепенном росте и последующем спаде для третьих материалов (такое наблюдается в расходе бумаги и промышленных минералов). Постоянное снижение материалоёмкости на единицу ВВП в современных обществах отражает изменчивую природу современного экономического продукта (все большую часть которого составляют сегодня услуги) и способах его количественного описания (интеллектуальный труд ценится намного больше механического).

Впрочем, другой критерий даёт совершенно иные результаты. В расчете на душу населения, расходы всех материалов в США выросли с 1,9 т в 1900 году до 5,7 т в

1950 году и до более чем 12 т в 2000 году – в 6,4 раза за столетие. Показатели расхода всех нестроительных минералов на душу населения возросли с почти 1,2 т в 1900 году до 3 т в 2000 году – то есть в 2,6 раза; потребление металлов выросло с примерно 135 кг на душу населения в 1900 году до 510 кг в 2000 году – почти в 4 раза.

Реальный рост потребления материалов был даже больше, чем по данным Геологической службы США, поскольку он включал в себя растущие объемы импорта промышленных товаров, в том числе наплыв материалоемкой продукции: металл и пластик в оборудовании, автомобилях; тяжелые, редкоземельные металлы и литий в электронике, магниты и батарейки. По самым скромным подсчетам, за XX век среднее потребление промышленного сырья в стране на душу населения выросло как минимум в четыре раза, и основным фактором этого роста стало развитие жилищного строительства и производства домашней утвари.

В 1900 площадь среднестатистического нового дома в США составляла 90 м² (1000 футов²) и за первую половину XX века почти не изменилась, однако после Второй мировой войны этот показатель значительно вырос: со 100 м² (1100 футов²) в 1950 году до примерно 220 м² в 2005 году, несмотря на то, что средний размер семьи за этот период уменьшился с 3,7 до 2,6 человек. Следовательно, в 1950 году средняя площадь составила примерно около 27 м² на душу населения, в 2000 году – уже более 80 м², то есть в три раза больше (Wilson и Boehland, 2005). К 2005 году средняя площадь дома, построенного по индивидуальному проекту, превысила 450 м², что почти в пять раз больше среднестатистического японского дома, причем довольно широко распространены особняки площадью более 600 м².

Общая масса среднего дома из расчета на душу населения растет еще быстрее, чем может показаться в связи с ростом площади строящихся домов: изоляция становится лучше, в домах устанавливаются двойные окна, строятся более крупные гаражи (к 2005 году около 85% домов имели гаражи на две машины), более широкие въезды, а также часто обширные вспомогательные сооружения (террасы, подсобные помещения), в них становится больше мебели и различных потребительских продуктов, а также используются более тяжелые облицовочные материалы (мраморные ваннные комнаты, каменные полы, гранитные кухонные стойки). Таким образом, вес жилого дома в расчете на душу населения США вырос по меньшей мере в 3-3,5 раза за 50 лет! Остановить рост среднестатистического американского дома смог лишь экономический спад: в 2009 году средняя площадь новых домов снизилась до 190 м² (NANB, 2010).

Качественные изменения не уступают количественным, поскольку многие традиционные материалы заменили легкие, но более энергоемкие: синтетические ковровые покрытия и пластиковые полы заменили деревянные доски и паркет; алюминиевые сайдинги пришли на смену доскам и кирпичу; рамы для окон, наружных и гаражных дверей стали делать из стали, алюминия и пластика; вместо металла основным материалом труб сегодня стал пластик.

Первая волна массового приобретения бытовых предметов, которая началась в 1920-е годы, практически сошла на нет к 1960 году, когда примерно в 95% американских домохозяйств уже были электрическая или газовая плита, холодильник и радио, но стиральная машина – лишь в 40%, сушилки для одежды – только в одном доме из пяти, а кондиционер и посудомоечная машина – лишь в 10% домов (Felton,

2008). К 1980 году большинству хозяйств уже были эти предметы; население начало приобретать электронику (третья волна массового приобретения): проигрыватели компакт-дисков, компьютеры, видеоигры, телевизоры с плоским экраном и высоким качеством изображения, мобильные телефоны, – все это работает благодаря крошечным микропроцессорам и другим крайне энергоемким электронным комплектующим.

Таким образом, даже несмотря на то, что снижение экспансии инфраструктуры в Америке привело к уменьшению расхода цемента (с 23 г/доллар в 1950 году до примерно 15 г/доллар в 1975 году и чуть более 11 г/доллар в 2000 году), электронная эра создала потребность в кремнии высокой степени очистки, энергоемкость которого более чем в 3000 раз больше цемента и в 1000 раз больше необработанной стали, изготовленной из железной руды. Таким образом, даже небольшие количества крайне энергоемких материалов могут компенсировать значительную долю экономии топлива и электричества в результате отказа от более тяжелых, но менее энергоемких материалов (3300 кг цемента = 1 кг кремния).

Очевидно, что сегодня никакой значительной и распространенной дематериализации не наблюдается – ни абсолютной, ни удельной (на душу населения) – даже в самых богатых странах мира. Без сомнения, в них наблюдается более медленный рост расхода сырья, что объясняется следующими тенденциями: богатые страны уже обладают развитыми материалоемкими инфраструктурами; привлечение к материалоемким (и часто экологически неблагоприятным) производствам недорогих иностранных производителей позволяет снизить первичные затраты материалов непосредственно в стране, а удельная дематериализация замедлила рост спроса.

В ряде стран, о которых имеются надежные данные, общий расход материалов стабилизировался или даже несколько снизился (особенно в Германии и Великобритании), хотя расход отдельных материалов продолжает расти. В других странах с высоким уровнем дохода, в том числе США, Франции и Испании, наблюдается медленный, но последовательный рост потребностей в материалах; в богатых странах в целом не было никакой итоговой дематериализации, а только значительное увеличение общей потребности в материалах во второй половине XX века и первого десятилетия XXI века. В то же время развивающиеся страны Азии, Латинской Америки и Африки во главе с абсолютными лидерами в этом отношении Китаем и Индией переживают беспрецедентный рост потребности в материалах. Новый всплеск материального потребления в Азии явился основной причиной быстрого роста спроса в прошлом поколении: за период с 1990 по 2010 год потребление стали выросло на 180%, алюминия – на 210%, меди – на 170%, а цемента – на 320% (USGS, 2013). Очевидно, что большая часть этих показателей объясняется внутренним развитием стран, но учитывая глобальную интеграцию количественных показателей экономической деятельности, значительная доля этой новой потребности относится к другим странам, в которые осуществляется экспорт товаров. В этой новой мировой экономике наиболее удобный способ продемонстрировать тот факт, что современная цивилизация стала более, а не менее, массивной, даже в расчете на душу населения, – показать это в мировом масштабе.

Еще одним фактором, помогающим объяснить этот продолжительный рост – изменения в энергопотреблении, которые, как и расход материалов, определяются

двумя противоположными процессами. С одной стороны, снижение энергоемкости продукции, промышленного сектора и всей национальной экономики, с учетом высокой материалоемкости современного производства, преобразования и распределения энергии, стало основной причиной сокращения относительной материалоемкости современных обществ. С другой стороны, увеличивается общее потребление топлива и (даже больше) электроэнергии, что обусловлено сочетанием продолжающегося роста численности населения и увеличения потребления на душу населения, в свою очередь объясняющегося более высокими уровнем жизни и мобильностью. Энергопотребление на душу населения в большинстве стран Африки и среди малоимущего населения в Азии и Латинской Америке по-прежнему остается неприемлемо низким, но быстро растет в ряде развивающихся стран (прежде всего в Китае), и до недавнего времени, медленно росло даже в богатых странах с уже очень высоким уровнем спроса на топливо и электроэнергию.

5.5 Снижение энергоемкости

Снижение удельного расхода энергии – будь то на единицу добываемого сырья или готовой продукции – является одним из ключевых критериев модернизации. Вспомним три наиболее впечатляющих примера экономии материалов в период с 1900 по 2000 год, продолжающихся в начале XXI века: в 2010 году на производство тонны стали требовалось лишь 20% энергии, необходимой для этого в 1900 году, на производство тонны алюминия – 30% (USDOE, 2007), а снижение расходов на производство аммиака и цемента составило 70% и более 80% соответственно. Практически для всех основных материалов можно привести чуть более низкие, но по-прежнему потрясающие показатели долгосрочного повышения эффективности.

С учетом высокой мировой конкуренции и сравнительно быстрого распространения новых технологий неудивительно, что расходы топлива и электроэнергии на основные энергоемкие продукты, будь то металлы или удобрения, почти не различаются в богатых странах. Читатели, знакомые с развитием современной энергетики, наверняка уже оценили поразительное повышение эффективности, которое сопровождало широкое распространение практически всех современных способов преобразования энергии – от отопления дома до нужной температуры до межконтинентальных грузоперевозок. Эффективность распространенных преобразователей энергии выросла довольно быстро: камины на дровах преобразовывали менее 10% химической энергии топлива в полезное тепло, максимальная производительность угольных печей конца XIX-начала XX века с ручной топкой составляла 20-25% (часто гораздо меньше), КПД нефтяных печей составлял 50%, еще поколение назад дома отапливались газовыми печами с эффективностью 70-75%, а сейчас предел эффективности составляет 95-97%.

Эволюция отопления производит еще более глубокое впечатление, если сравнивать аккуратные автоматические системы, сжигающие газ, с трудоемким, грязным и неэффективным сжиганием угля. Во втором случае техническая эволюция перешла от небольших (грузоподъемностью менее 5000 тонн) грузовых судов на паровых двигателях (максимальный КПД не превышает 15%) к массивным (грузоподъемно-

стью более 100 тысяч тонн) сухогрузам (для руды, топлива и других сыпучих материалов) и контейнерным судам (крупнейшие из которых перевозят более 10 тысяч единиц продукции) на дизельных двигателях с максимальным КПД в 50% и даже более (Smil, 2010).

Все эти улучшения неизбежно должны были привести к значительным совокупным изменениям: постепенному снижению энергоемкости современной экономики на единицу энергии (лучше использовать джоули), на единицу национальной валюты либо, если сравнивать показатели для разных стран, на постоянный доллар США (с поправкой на инфляцию). Наиболее очевидное преимущество этой косвенной меры относительно дематериализации заключается в том, что ретроспективные данные по общему снабжению первичной энергией (ОСПЭ, TPES) – совокупности всего топлива и первичного (то есть производимого гидроэлектростанциями, ядерными, ветряными и солнечными электростанциями) электричества – гораздо более доступны, чем информация о том, сколько материалов, конкретных или вообще, было израсходовано. Постоянное снижение энергоемкости указывает на использование более эффективных, и, следовательно, почти всегда менее материалоемких, методов добычи, переработки и производства техники, а также распространение более экономичных способов потребления энергии в домашнем хозяйстве.

Эвристическая и иллюстративная ценность сравнения показателей энергоемкости неоспорима, но к расчету степени энергоемкости нужно подходить осторожно. Если интерпретировать эту меру наивно, в отрыве от практики и исторических фактов, то она лишь подкрепляет недостоверные предположения и скорее вводит исследователя в заблуждение, чем проливает свет на реальное положение вещей. Подробный анализ этого показателя позволяет лучше понять реалии, лежащие в его основе, вскрывает несколько серьезных ограничений, а также позволяет более точно интерпретировать различие в уровнях и тенденциях энергопотребления и помогает избежать упрощенных и, следовательно, потенциально бесполезных выводов. Первый момент, на который стоит обратить внимание – составляющие этого показателя. Общее снабжение первичной энергией по стране рассчитывается путем приведения данных по различным видам топлива и первичной электроэнергии к общему знаменателю: в научных статьях – к джоулям, в публикациях по энергетике – к тоннам в нефтяном эквиваленте. Ошибки в этих расчетах будут минимальны, поскольку материальные потоки ископаемых видов топлива относятся к наиболее эффективно отслеживаемым показателям в современной экономике.

Потребление электроэнергии отслеживается еще более точно, однако основная причина несоответствия национальных показателей общего снабжения первичной энергией (ОСПЭ, TPES) кроется в различии методов преобразования количества первичной электроэнергии (в основном гидроэлектроэнергии, но популярность приобретают и ветряная и солнечная энергия, хотя геотермальная энергия по-прежнему составляет лишь малую часть энергосистем). Сначала для преобразования применяли тепловой эквивалент: 1 кВт·ч соответствует 3,6 МДж (1 Дж = 1 Вт·с). Еще один способ преобразования количества первичной электроэнергии – средняя тепловая мощность ископаемого топлива, используемого внутренними тепловыми электростанциями для производства электроэнергии. Поскольку эффективность генерации тепловой энергии составляет всего от 33 (хороший средний показатель

по стране) до 38% (средний показатель наиболее эффективных тепловых электростанций мира), такой эквивалент повысит коэффициент преобразования до 9,5–10,9 МДж/кВт·ч. Таким образом, при сравнении общих запасов первичной энергии в стране, которая полностью (или в основном) производит энергию из ископаемого топлива со страной, в которой преобладают гидроэлектростанции, оба эти варианта приведут к неточностям.

Если мы воспользуемся первым вариантом, то общее потребление энергии в стране с преобладанием гидроэлектростанций окажется ниже, и поэтому ее энергопользование будет казаться более эффективным, чем в стране, в которой почти нет гидроэлектростанций. Второй вариант позволит нам устранить эту неточность, но приведет к противоположной проблеме. Но ведь страны, зависимые от гидроэлектростанций, генерируют намного больше электроэнергии на душу населения, чем страны с преобладанием тепловых электростанций, как раз потому, что обладают обильными водными ресурсами, и преобразование первичной электроэнергии с коэффициентом, в три раза превышающем тепловой эквивалент, неизбежно приведет к большему показателю запаса первичной энергии, что не является правдой. Все это дополнительно усложняется тем фактом, что средний КПД тепловых электростанций продолжает расти, и это должно учитываться в коэффициенте преобразования. Например, средний коэффициент преобразования в США в 1950 году составил 14,8 МДж/кВт·ч, в 1975 году – 11 МДж/кВт·ч, в 2000 году – 10,8 МДж/кВт·ч, а в 2010 году – 10,3 МДж/кВт·ч (USEIA, 2013). В случаях, когда нет достоверных исторических данных, приходится довольствоваться предположениями.

В настоящее время существует четыре основных источника статистики по мировой энергетике: ООН (UN, 2013), отчеты Международного энергетического агентства (IEA, 2013), Энергетического информационного Агентства США (USEIA, 2013), а также ежегодный Обзор мировой энергетики компании British Petroleum (BP, 2013). ООН и МЭА пользуются тепловым эквивалентом (3,6 МДж/кВт·ч) для гидроэлектричества и преобладающего коэффициента эффективности (около 33%) генерации электроэнергии из ископаемого топлива для ядерных источников; British Petroleum преобразует гидроэлектричество с учетом принятого коэффициента эффективности в 38% (около 9,47 МДж/кВт·ч); USEIA применяет преобладающий внутренний коэффициент эффективности для тепловой генерации электроэнергии (по недавним данным примерно 35% или 10,3 МДж/кВт·ч).

Такие различия приводят к вполне ожидаемым последствиям. В 2009 году (последний год, для которого все эти источники можно сравнить) общее снабжение первичной энергией в Норвегии, стране с наибольшим количеством производимого на гидроэлектростанциях электричества на душу населения, составило 27,48 мтнэ (миллионов тонн нефтяного эквивалента) по данным ООН и 28,25 мтнэ по данным МЭА, однако British Petroleum в соответствии со своим коэффициентом оценил это количество в 43,4 мтнэ, а Энергетическое информационное агентство США – в 47,75 мтнэ, разброс между минимальным и максимальным значением – 73%! Аналогично, крайне зависимая от гидроэлектроэнергии Канада по данным МЭА потребила 254 мтнэ, однако по данным Энергетического информационного агентства США этот показатель составляет уже 328 мтнэ – разница в 29%. Эти два подхода невозможно примирить, и меньшее, что мы можем сделать для международного учета

энергоёмкости – однозначно определить единый коэффициент преобразования для расчета общих запасов первичной энергии. И, разумеется, в любом долгосрочном сравнении показателей энергоёмкости следует избегать одновременного использования данных из разных источников и пользоваться одним и тем же коэффициентом преобразования.

Какими бы сложными ни были расчеты показателей общего снабжения первичной энергией, расчет ВВП представляет собой еще большую проблему, которая не разрешается, даже если принять во внимание фундаментальные ограничения этого показателя: он может расти даже при ухудшении среднего качества жизни в стране, стагнации показателей образования и разграбления невозполнимых ресурсов ради недолговечной выгоды. Даже для стран, для которых имеются качественные статистические данные, все оценки ВВП, относящиеся к периоду до Второй мировой войны, менее надежны, чем по послевоенному периоду, а для многих стран, занимающихся модернизацией экономики, – попросту недоступны или состоят исключительно из грубых оценок, что делает невозможным достоверное сравнение показателей по странам за долгий период. Кроме того, недавние подсчеты ВВП, сделанные в соответствии с Системой национальных счетов ООН, не включают никаких сделок на черном рынке (неформальную экономическую деятельность), что добавило бы к этому показателю 10–15% даже в самых законопослушных странах и вовсе удвоило бы его в большинстве тех стран, где нарушения закона – обычное дело.

Но опять же, больше всего в неточностях расчетов виновато преобразование величин. Для сопоставления результатов разных стран необходимо сначала привести показатели к общему знаменателю – обычно это доллар США. На протяжении десятилетий для этой цели использовался номинальный валютный курс, что приводило к завышению расхождения между странами с высоким и низким доходом и неточному сравнению показателей в странах с плавающим и фиксированным обменным курсом. Впрочем, новый способ приведения показателей к общей валюте, основанный на паритете покупательной способности, тоже не идеален: при его применении ВВП стран, модернизирующих свою экономику, получается выше, но при отсутствии универсальной для всех стран мира потребительской корзины нельзя однозначно определить ППС для тех стран, экономика, повседневная жизнь, распределение дохода и ожидания которых значительно отличаются от модели (США). И, разумеется, для сколько-нибудь долгосрочных сравнений все значения ВВП должны быть выражены в постоянных (с поправкой на инфляцию) единицах, и эти единицы должны быть четко указаны.

Приведем лишь несколько ярких примеров зависимости результатов расчетов от коэффициентов, которые мы выбираем. При использовании метода преобразования энергии Энергетического информационного агентства США (который приводит к наибольшим показателям из всех четырех методов) и национального ВВП с точки зрения стандартных обменных курсов, выраженного в постоянных долларах США (на 2005 год), значения энергоёмкости для ведущих экономик мира за 2009 год получаются в диапазоне от 4,9 МДж/доллар для Японии, 5,0 МДж/доллар для Германии и 7,7 МДж/доллар для США до 27,4 МДж/доллар для Китая. Китайская экономика явно не настолько эффективна, и если мы пересчитаем эти показатели с учетом ППС (снова в постоянных долларах США 2005 года), то они составят 5,6 МДж/доллар

для Германии, 5,8 МДж/доллар для Японии, те же 7,7 МДж/доллар для США, а для Китая на 60% меньше – всего 11,4 МДж/доллар.

При использовании самых низких значений общего количества электроэнергии (по методу ООН) показатели энергоемкости с учетом ВВП в пересчете на постоянный доллар США 2005 года составят всего 2,8 МДж/доллар для Японии, около 4 МДж/доллар для Германии, 6,5 МДж/доллар для США и около 23 МДж/доллар для Китая; если их пересчитать с учетом ППС, энергоемкость на основании данных ООН составит 4,3 МДж/доллар для Японии и 4,4 МДж/доллар для Германии, по-прежнему 6,5 МДж/доллар для США и всего 9,6 МДж/доллар для Китая. Таким образом, в зависимости от выбора коэффициента преобразования энергии и ВВП, значение энергоемкости в США за 2009 год (в пересчете на постоянный доллар США 2005 года) может составить от 6,5 до 7,7 (разница в 15%), но для Китая этот же показатель будет различаться почти в 3 раза (точнее, в 2,85 раза) – от 9,6 до 27,4. Для Японии размах показателей составит более чем 2 раза (от 2,8 до 5,8), для Германии – 40% (от 4,0 до 5,6).

Эти сравнения подтверждают некоторые широко распространенные представления о производительности экономики различных стран: дела у Японии и Германии, эффективно расходующих энергию, идут гораздо лучше, чем США и Канады, которые тратят ее впустую, в то время как даже значительные масштабы последних экономических достижений Китая не могут компенсировать наследие неэффективного ресурсопользования, оставленное этой стране периодом маоизма. Другие представления об экономических достижениях разных стран можно проверить, взглянув на последние показатели энергоемкости: в 2009 году показатель, основанный на данных Энергетического информационного агентства США в пересчете на ППС, для России составил 14,7 МДж/доллар, а для Саудовской Аравии – чуть больше 15 МДж/доллар, что отражает расточительство этих двух супердержав-экспортеров углеводородов.

Но являются ли эти сравнения энергоемкости, даже выполненные в единообразной форме, надежными показателями энергоэффективности или, наоборот, расточительства и экологической деградации? Нет: как и все сводные показатели, этот скрывает не меньше, чем показывает, и поэтому прежде чем хвалить или осуждать те или иные результаты, нужно сначала поподробнее рассмотреть, что эти показатели на самом деле отражают. Значительные различия в энергоемкости имеют сложные причины; мы выделили шесть основных параметров, которые объясняют национальные особенности (Smil, 2003, 2008). К ним относятся базовые физические свойства (размер и климат страны), состав энергоснабжения и степень энергонезависимости, различия в конечном использовании энергии (по секторам), а также уровень персонального (на человека или на семью) потребления энергии. Эти факторы должны рассматриваться в совокупности, поскольку ни один из них может достоверно отражать ожидаемый уровень потребления энергии в стране.

При прочих равных, большая территория требует более крупной и, следовательно, более дорогой инфраструктуры и большего расхода энергии на транспорт и связь. Это наиболее важно для воздушного, самого энергоемкого, вида транспорта. Производительность самолетов мы практически не учитываем, поскольку коммерческие авиалинии по всему миру пользуются одними и теми же межконтинентальными авиалайнерами, которые производит дуополия Airbus и Boeing, и внутрен-

ними самолетами другой дуополии, Bombardier и Embraer; единственное различие заключается в долях конкретных моделей в воздушных флотах разных стран.

Таким образом, основным фактором, определяющим частоту (и энергоемкость) перелетов в странах с сопоставимым наличным доходом, будет расстояние между городами, а крупные города в Северной Америке расположены друг от друга гораздо дальше, чем в Японии или ЕС. Это очень просто продемонстрировать, рассчитав расстояние между тремя крупнейшими городами: в Японии сумма расстояний между Токио, Осакой и Киото составляет менее 800 км, в ЕС расстояния между Лондоном, Парижем и Франкфуртом в сумме дают 800 км, в то время как в Канаде (Торонто – Монреаль – Ванкувер) и США (Нью-Йорк – Лос-Анджелес – Чикаго) это более 3000 км.

В результате большинство перемещений между Токио и Осакой, Лондоном и Парижем осуществляются на поезде, тогда как в США большая часть междугородных перевозок – это авиаперевозки, часто шаттлами, вылетающими каждые 1-2 часа. Размер страны также является ключевым фактором расчета среднего расстояния, проезжаемого на автомобиле, особенно в течение последних 20 лет, когда количество автомобилей в большинстве европейских стран и Японии выросло почти до уровня США и Канады, в то время как разрыв между показателями эффективности транспорта в Северной Америке и других странах сократился благодаря росту эффективности. Однако жители США по-прежнему проезжают около 20 000 км в год, что почти в два раза превышает показатель в Японии и крупных странах ЕС.

До массового распространения кондиционеров связь между климатом и потреблением энергии в основном сводилась к отоплению, но сегодня в каждой энергетической компании в США есть и летний пик потребления, связанный с использованием кондиционеров, хотя высокие цены на электроэнергию привели к ограничению распространения кондиционеров в Европе. Впрочем, в странах с более холодным климатом лучшим фактором, прогнозирующим расход электроэнергии домашними хозяйствами, остается среднее количество градусо-дней отопительного сезона, и канадцам (5700 градусо-дней в городе Виннипеге, где живу я) всегда будет требоваться больше электроэнергии на обогрев домов, чем немцам – в столице Германии в среднем 2900 градусо-дней отопительного сезона (ЕЕА, 2013). Дело осложняется различиями ожидаемого уровня комфорта: в британском доме зимой американцам показалось бы недостаточное тепло, а азиатские нувориши летом поддерживают во многих комнатах невыносимо низкую температуру.

Тем не менее, состав энергоснабжения и его истоки являются, пожалуй, наиболее важными факторами, определяющими общую энергоемкость в стране. Для платежных балансов высокая степень энергонезависимости, может быть, и выгодна, но добыча и преобразование ископаемого топлива – крайне энергоемкие процессы, а высокий уровень импорта энергоресурсов обычно связан с более высокой эффективностью преобразования энергии. Большую часть разницы в энергоемкости между Саудовской Аравией и Японией, между Австралией и Южной Кореей можно объяснить сочетанием этих двух факторов, а состав общего снабжения первичной энергией имеет еще большее значение, поскольку преобразования жидких и газообразных видов топлива более эффективны, более гибки и оказывают меньшее влияние на окружающую среду, чем сжигание каменного и бурого угля.

Хотя эффективность сжигания мелкого угля в больших печах с усиленным притоком воздуха может достигать 42%, то есть эффективности флотского мазута и природного газа, угольным заводам приходится потреблять больше вырабатываемой электроэнергии для ограничения загрязнения воздуха (золоулавливание, сероочистку, сокращение выбросов NOx) и утилизацию твердых отходов (завод с мощностью 1 ГВт будет генерировать десятки тысяч тонн золы в год). Сейчас есть более эффективная альтернатива сжигания природного газа в больших котлах: до 60% топлива, используемого в комбинированном цикле выработки электроэнергии (газовая турбина, затем паровая), может быть преобразовано в электричество. Если топливо используется непосредственно для обогрева помещений и нагрева воды, разброс эффективности гораздо больше: КПД угольных печей обычно значительно ниже 50%, в то время как высокоэффективные бытовые печи сегодня преобразуют 95–97% энергии топлива в полезное тепло.

Поскольку практически все современные промышленные процессы зависят от постоянного потока электроэнергии, страны с высокой долей первичной электроэнергии не несут потерь, неизбежных при тепловой генерации энергии, и при прочих равных могут иметь меньшую энергоемкость. В то же время недорогая гидроэнергия привлекает энергоемкую промышленность, поэтому страны с преобладанием гидроэлектростанций будут иметь большую долю таких производств. Прекрасный пример этому – Канада. Эта страна является второй в мире по производству гидроэлектроэнергии и третьей по производству алюминия, а также входит в число 10 крупнейших производителей энергоемких металлов и продуктов, в том числе аммиака, меди, свинца и никеля (USGS, 2013). Неудивительно, что относительно высокая доля потребления электроэнергии на добычу руды, выплавку цветных металлов и синтез аммиака в Канаде повышает общую энергоемкость экономики, а практически полное отсутствие таких производств в Японии или Италии приводит к меньшей энергоемкости этих стран.

Вывод ясен: энергоемкость далеко не показатель материального потребления. Ее наиболее заметный недостаток в этом плане заключается в том, что общее снабжение первичной энергией в стране сильно зависят от структуры энергетического сектора, климата, площади страны и плотности населения; кроме того, потребление энергии в конкретной стране отражает не только эффективные (то есть, вероятно, менее материалоемкие) методы использования энергии, но также и большее распространение преобразователей энергии и их более активное использование. Несмотря на это, долговременные тенденции энергоемкости сопоставимы с долговременными изменениями в материальной интенсивности национальной экономики, хотя естественное разнообразие только что приведенных факторов не повод использовать этот показатель для сравнения материального потребления в разных странах. Что он может рассказать нам об изменениях в долгосрочной перспективе?

Историю мировой энергоемкости нельзя четко проследить: хотя статистика по потреблению энергии в XX веке достаточно достоверна и даже в период с 1850 по 1900 материальные потоки можно удовлетворительным образом реконструировать, опубликованные оценки экономических продуктов в мире сомнительны. Если использовать оценку мирового экономического продукта Ангуса Мэддисона (Maddison, 2007) в пересчете на постоянный доллар США 1990 года, то показатели

энергоёмкости на 1900 и 2000 год окажутся почти одинаковыми – около 11 МДж/доллар; с 1900 по 1970 год энергоёмкость выросла примерно на 20% от пикового уровня, а затем снова снизилась. Эти изменения отражают сочетания сложных тенденций, в которых доминируют крупные потребители с различными траекториями расхода энергии (сравните США, Китай, Германию или Японию с Индией или Индонезией), но с достаточной уверенностью можно сказать, что в дальнейшем энергоёмкость будет снижаться по мере того, как богатые страны постепенно достигают большей энергоэффективности, а развивающиеся страны с наибольшей численностью населения продолжают совершенствовать свое еще относительно неэкономное энергопользование.

Национальные исторические справки проще интерпретировать, и данные, необходимые для расчета долгосрочного развития энергоёмкости для многих стран, легко доступны в статистических сборниках ООН (UN, 2013), Международного энергетического агентства (IEA, 2013), Энергетического информационного агентства США (USEIA, 2013) и British Petroleum (BP, 2013). Данные ООН начинаются с 1950 года, другие сборники содержат статистику с 1960-х или 1970-х; ООН представляет данные по общему снабжению первичной энергией в угольном, нефтяном эквиваленте и в джоулях, а в других источниках в качестве общей единицы измерения использует тонны в нефтяном эквиваленте. Как уже отмечалось, приведение данных к общим единицам измерения вносит в расчет неизбежные ошибки, поскольку качество топлива меняется со временем, а единого способа преобразования первичной электроэнергии в тепловой эквивалент не существует.

Национальные показатели ВВП также легко доступны – они опубликованы в сборниках ООН (UN, 2013), ПРООН (UNDP, 2013), Международного валютного фонда (IMF, 2013) и Всемирного банка (2013а), причем в некоторых случаях статистика начинается еще с 1950-х годов. Все значения должны быть выражены в постоянных денежных средствах, а для значимых сопоставлений показателей разных стран следует использовать эквивалент покупательной способности (а не официального обменного курса) в долларах США. Проще всего сделать это, используя уже посчитанные данные энергоёмкости, регулярно публикуемые ОЭСР (OECD, 2013; в мтнэ/1000 постоянных долл. США) и Энергетическим информационным агентством США (USEIA, 2013; в британские термические единицы/постоянный долл. США). В долгосрочной перспективе похожие тенденции в развитии энергоёмкости наблюдаются в западных странах, перешедших от некоммерческого биологического топлива к углю, а затем к углеводородам и первичному электричеству.

Энергоёмкость их экономики значительно выросла на ранних этапах индустриализации, но пики были обычно заостренными, без продолжительных плато, и за ними следовали значительные спады: совершенствуя свою экономику, эти страны начинали использовать энергию (а, следовательно, и материалы) намного более эффективно. Великобритания достигла пика энергоёмкости к 1850 году, Канада – к 1910 году, а США достигли непродолжительного пика примерно в 1920 году (Smil, 1994). К концу XX века энергоёмкость этих трех стран снизилась по отношению к пикам на 80, 65 и 60% соответственно. В отличие от них, экономика Японии достигла пика энергоёмкости только в начале 1970-х. Различия в форме графиков объясняются различиями экономических условий в разных странах: начало индустриализации

зации, ее развитие, первичная структура экономики, интенсивность технического усовершенствования, зависимость от импорта энергоресурсов.

Более поздние изменения – в соответствии с ВВП в пересчете на ППС – привели к некоторым потрясающим результатам в снижении энергоемкости: в Китае зарегистрировано беспрецедентное в мире падение этого показателя на 67%, общая энергоемкость экономики Великобритании снизилась на 50%, в Германии после объединения с ГДР потребление энергии снизилось на 23% в 2010 году по сравнению с 1991, а общемировой уровень за 30 лет (с 1980 года) снизился на 20% – и почти такое же снижение энергоемкости пережила Япония. Каждый из этих результатов сложился из целого ряда конкретных изменений, причем некоторые из них были единичными случаями, а некоторые могут продолжаться и дальше.

В Китае решающим фактором являлся переход от чрезвычайно расточительной и малопроизводительной маоистской экономики к более эффективной современной конфигурации производительных сил, которая в последнее время все больше и больше основывается на передовых промышленных методах. В течение тридцатилетнего периода с 1980 по 2010 год средняя энергоемкость производства стали в Китае сократилась на 43% (Sun и соавт., 2013), а производство цемента – на 55% (Lei, 2011). Учитывая неудачную структуру топливного баланса в стране (в основном уголь) и то, что страна совершенно не использует возможности по улучшению эффективности в промышленности, коммерческом секторе и домашнем хозяйстве, эта тенденция к снижению средней энергоемкости будет продолжаться еще несколько десятилетий, хоть и замедлится. В Великобритании спад был вызван деиндустриализацией и продолжающимся переходом от сжигания угля к использованию углеводородов; последний процесс уже завершен, тогда как судьба некогда главенствовавшего в экономике промышленного сектора страны еще не решилась.

Деиндустриализация играла важную роль в снижении энергоемкости в Америке и, как мы продемонстрируем ниже, это снижение выглядит куда менее ярким с учетом количества энергии, необходимой для производства растущих объемов импортируемой продукции. Использование энергии в период после воссоединения Германии снизилось в связи с закрытием многих неэффективных отраслей в бывшей ГДР, но вся страна целиком продолжала медленно, но верно повышать энергоэффективность даже несмотря на то, что значительная доля ее ВВП приходилась на энергоемкое производство.

В ситуации, когда все основные потребители энергии сокращают энергоемкость, очевидно, что общемировой показатель тоже будет падать. Его ежегодное уменьшение в период с 1980 по 2010 год в среднем составило 0,75%, и нет причин, по которым более активное снижение энергоемкости не должно приводить к его дальнейшему снижению на 1% каждый год в ближайшие несколько десятилетий.

Рассматривая вопрос так подробно, мы стремимся показать, что энергоемкость – особая мера, которую не так-то просто интерпретировать. Долгосрочное снижение энергоемкости может быть похвальным результатом серьезной работы по повышению эффективности преобразования энергии в промышленности, домашнем хозяйстве и транспорте и служить надежным показателем постепенной дематериализации. Впрочем, оно может быть и не таким уж похвальным результатом масштабной деиндустриализации, при которой энергоемкие производства (металлургия, хими-

ческий синтез, тяжелые производства) перемещаются за границу, а растущее количество потребительских продуктов импортируется. Длительное плато, очень медленный спад и даже временное повышение энергоемкости отражают не обязательно менее эффективное преобразование энергии в основных секторах потребления, а либо тот факт, что страна проходит по своей природе более энергоемкую фазу экономического развития (создание новых отраслей промышленности, расширение транспортной инфраструктуры, быстрая урбанизация), либо высокое потребление энергии богатой частью населения, которое перечеркивает (иногда большую) часть достижений промышленного сектора и сферы услуг.

Прекрасным примером первого случая является Испания после Франко: показатель энергоемкости по стране почти не изменился с 1980 по 2000 год, поскольку страна наверстывала упущенное в построении современной инфраструктуры; растущая энергоемкость Японии в 1990-е годы объяснялась преимущественно тем фактом, что японцы начали меньше экономить и больше тратить на себя (Smil, 2007). Следовательно, мы не можем сделать простой вывод о том, что быстрое снижение энергоемкости всегда указывает на положительные тенденции и что медленные темпы улучшения свидетельствуют о низкой производительности. Эта мера не позволяет проводить таких различий. Написанное нами десять лет назад до сих пор верно: «... эти простые показатели отражают сложные естественные, структурные, технические, исторические и культурные особенности. «Тише едешь, дальше будешь» – хорошая поговорка, но не стоит применять ее к национальным показателям энергоемкости в абсолютном выражении и в сравнении с другими странами» (Smil, 2003, стр. 81).

Не следует забывать, что эффект Джевонса может иметь последствия для всей экономики, поскольку значительную долю сэкономленной энергии можно прямо или косвенно направить на увеличение потребления энергии в какой-то другой отрасли. Выигрыш в эффективности, который приводит к удешевлению и последующему использованию большего количества энергии, проще оценить количественно, но обобщение сделать невозможно. Исследования показывают, что в такой ситуации рост удельного расхода энергии может быть как незначительным (до 5%), так и очень серьезным, более 50% – а если связь между подъемом эффективности и ростом расхода энергии косвенная, то есть, когда сэкономленные деньги идут на такие же или более энергоемкие продукты, особенно в масштабе страны, неопределенности еще больше (IRGC, 2013).

5.6 Декарбонизация и сероочистка

Декарбонизация национального и глобального энергоснабжения – постепенный сдвиг в сторону сжигания топлива с более низким содержанием углерода и выработки первичного электричества – может рассматриваться как наиболее благоприятная с экологической точки зрения форма дематериализации, поскольку она снижает удельные выбросы CO₂, наиболее важного парникового газа, а также выработку подкисляющих оксидов серы и азота и твердых частиц. Этот процесс – естественный результат постепенного перехода от переработки твердого ископаемого топлива к

жидкому и газообразному и увеличения доли первичной электроэнергии (гидроэнергии, энергии Солнца и ветра, ядерной и геотермальной энергии) в общем объеме энергоснабжения. Эти переходы в свою очередь были вызваны потребностью в более высокой удельной мощности окончательного использования электроэнергии: поддержки урбанизации, индустриализации, повышения интенсивности перевозок и уровня жизни.

Древесина (и древесный уголь) были основным источником тепловой энергии в доиндустриальной деревне, и в умеренном климате Европы мощность их сжигания составляла всего 10 Вт/м² жилой площади в небольшом одноэтажном доме. Сжигание угля в четырехэтажном жилом доме требует более 200 Вт/м², современные высотные здания (с подогревом в северных широтах, кондиционером в субтропиках и тропиках) потребляют более 1000 Вт/м². Даже если учитывать площадь улиц и парков, густонаселенные современные города требуют 50-100 В/м² постоянного энергоснабжения. Поэтому Джессе Аусубель (Ausubel, 2003, стр. 2) пришел к выводу, что «наиболее предпочтительной конфигурацией энергетической системы с компактным распределением потребителей является сеть, в которой есть возможность постоянной подачи и отбора энергоносителя с различной скоростью».

Очевидно, что природный газ, который безопасно и надежно доставлять по трубопроводам, сжигать в современных высокоэффективных печах, с температурой, легко контролируемой путем сброса или перепрограммирования термостата, и при сжигании которого выделяется только H₂O и CO₂, лучше, чем жидкое топливо, которое необходимо хранить в цистернах и развозить конечным потребителям грузовиками, и несопоставимо лучше, чем уголь – маломощный, громоздкий и грязный источник тепловой энергии, который, сгорая, выделяет твердые частицы и SO₂. Связь очевидна: энергоемкие современные общества основываются на использовании источников с высокой плотностью энергии, что стало возможным благодаря комбинации высокой энергоемкости лучшего топлива с относительно высокой эффективностью его использования.

Удельная энергоемкость видов топлива различается примерно в 3 раза: сухая древесина имеет энергоемкость 18-20 ГДж/т, большинство видов энергетического угля – 22-26 ГДж/т, продукты нефтепереработки находятся в узком диапазоне от 40 до 44 ГДж/т, а тонна природного газа дает 53,6 ГДж энергии. Это распределение объясняется большим содержанием водорода в более энергоемких топливах. При сжигании чистого углерода выделяется 32,8 ГДж/т, чистого водорода – 142 ГДж/т: виды топлива с более высоким содержанием водорода будут иметь более высокую энергоемкость. Декарбонизацию можно рассматривать либо как снижение содержания углерода, либо как повышение содержания водорода, а выражать как отношение атомов углерода к атомам водорода в конкретных видах топлива и в совокупном национальном или глобальном энергопотреблении.

Древесина состоит в основном из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина и содержит обычно около 50% углерода и лишь около 6% водорода. Обычный каменный уголь по массе содержит 65% углерода и 5% водорода, топливо, получаемое путем переработки сырой нефти, (бензин и керосин) содержит 86% углерода и 13% водорода, а метан (CH₄), очевидно, состоит из 75% углерода и 25% водорода по массе. Если принять среднюю энергоемкость абсолютно сухой древесины за 19 ГДж/т, то

при полном окислении такого топлива высвободится 30 кг углерода/ГДж. Сжигание качественного битуминозного каменного угля будет высвобождать примерно 25 кг углерода/ГДж (что означает, что при замене древесины на уголь высвободится на 10-15% меньше углерода на единицу энергии); типичный для очищенного жидкого топлива коэффициент выбросов составляет около 20 кг углерода/ГДж (то есть на 20-25% ниже, чем для угля); при полном сгорании метана высвобождается всего 15,3 кг углерода/ГДж, почти на 20% меньше, чем при сжигании бензина, на 40% – каменного угля и на 50% – древесины.

В случае, когда используются усредненные значения массовых долей углерода и водорода, равные 50% и 6% соответственно, древесина имеет атомное отношение водорода к углероду, равное 1:4. Но это не соотношение тех атомов, при сгорании которых выделяется тепловая энергия: большая часть водорода в древесине не окисляется, потому что гидроксильные радикалы ($\text{OH}\cdot$), содержащиеся в целлюлозе и гемицеллюлозе, выделяются в воздух на ранних стадиях горения (Shafizadeh, 1981). Фактическое соотношение водорода и углерода в древесине варьируется, но не превышает 0,5 по сравнению с 1,0 для угля, 1,8 для топлива, полученного в результате обработки сырой нефти (бензина и керосина) и 4,0 для метана (фактическое соотношение природного газа незначительно ниже из-за наличия более высоких гомологов: C_2H_6 и C_3H_8 кроме CH_4). Для сравнения, в то время, когда американский ученый Джесс Аусубель (2003) наметил исторический сдвиг в сторону декарбонизации, он работал со следующим средним соотношением Н:С: 0,1 для дерева (на наш взгляд, слишком низко), 1 для угля, 2 для сырой нефти и, естественно, 4 для метана.

Декарбонизация современного энергоснабжения началась в США (уже во второй половине XIX века), но этот процесс широко распространился и ускорился только после Второй мировой войны. Если сделать сравнения, основанные на видах топлива по энергоемкости, а не по массе, то высокоуглеродистые виды топлива (древесина и уголь) в 1900 году составляли 94% общемировой выработки энергии, а в 1950 году – 73%, но к 2000 году их доля снизилась примерно до 38%. Декарбонизации также способствовал рост первичной электроэнергии (гидроэлектричества и ядерной энергии): ее доля в общемировом показателе первичной энергии возросла со всего лишь 2% в 1950 году до примерно 10% спустя полвека. Однако интеграция отдельных компонентов топлива показывает, что в XX веке уголь обеспечивал значительно больше энергии, чем сырая нефть – примерно 5,3 иоттаджоулей, тогда как нефть – 4 (Smil, 2010).

Благодаря быстрому росту добычи угля в Китае после 1990 года, доля угля в мировом показателе глобальной первичной энергии в 2010 году оказалась немного выше, чем в 1990 году. Природный газ, содержание углерода в котором минимально среди всех видов топлива, в 2000 году по-прежнему обеспечивал не более 25% всей энергии топлива, а в 2010 году – немногим более 27%, несмотря на то, что во всем мире его добыча выросла более чем в два раза в период с 1980 по 2010 год: от примерно 1,4 до почти 3,2 триллиона м^3 (BP, 2013). В результате общая углеродоемкость ископаемого топлива во всем мире за весь XX век снизилась совсем немного: в 1900 году она составила примерно 25 кг углерода/ГДж ископаемого топлива, к 1950 году – 22,5 кг углерода/ГДж, и почти не изменилась к 2000 году (22,3 кг углерода/ГДж) – всего на 10% за столетие. После этого рост добычи природного газа нейтрализовал

последствия роста добычи угля в странах Азии, и мировой показатель углеродоемкости упал примерно на 6% за 10 лет и в 2010 году составил 20,9 кг углерода/ГДж.

Декарбонизация выглядит более выраженной, если рассчитать показатели по отношению к общемировым запасам первичной энергии, в том числе биотоплива и безуглеродного первичного электричества (гидроэлектричества, ядерного, ветряного и солнечного электричества): знаменатель (запасы первичной энергии) становится больше, но и делитель растет в силу выбросов CO_2 от сжигания дерева и пожнивных остатков (в 1900 году при их сжигании высвобождалось больше CO_2 , чем при сжигании угля, и к 2000 году их доля по-прежнему составляла около 17% от общего числа). Если включить все виды энергии, то тенденция к декарбонизации после 1900 года становится более явной: мировые показатели снижаются с примерно 27,5 кг углерода/ГДж в 1900 году до 21,2 кг углерода/ГДж в 2010 году – на 23% за 100 лет. Глобальная тенденция к обессериванию кажется еще более выраженной: сероемкость общих запасов первичной энергии за 110 лет снизилась примерно на 60%.

Показатель мировой декарбонизации, выраженный в атомном отношении водорода к углероду в ископаемых топливах (кроме древесины), вырос с 1 в 1900 году (когда 95% всей энергии ископаемого топлива обеспечивал уголь) до примерно 1,6 к 1950 году и 1,8 к 1980, но в следующие 20 лет выровнялся на уровне 1,9, а к 2010 году снизился до 1,83. Это плато, за которым последовало некоторое снижение, было вызвано невероятно быстрым ростом добычи угля в Китае – примерно с 600 Мт в 1980 году до 3,25 Гт в 2010 году; в результате атомное отношение углерода к водороду в ископаемых топливах в Китае оставалось на уровне 1,15 в период с 1980 по 2000 год, а после этого, несмотря на большой рост расхода углеводов (за десять лет сжигание сырой нефти выросло почти в два раза, а природного газа – более чем в четыре раза), поднялось лишь до 1,17 к 2010 году.

Когда Чезаре Марчетти (Marchetti, 1985) нарисовал график изменения атомного отношения водорода к углероду в ископаемых топливах, он обнаружил, что долгосрочные тенденции указывают на достижение мирового показателя 3 к 2010 году, тогда как реальный показатель составил всего 1,83. Он предвидел переход глобальной экономики к метану (отношение водорода к углероду – 4) вскоре после 2030 года и преимущественное использование водорода (на основе массовой генерации H_2 без ископаемых видов топлива) в последние десятилетия двадцать первого и начале двадцать второго века. Еще через два десятилетия Джессе Аусубель, основываясь на исторических данных о тенденции к декарбонизации, ожидал, что «метан, возможно, будет обеспечивать 70% первичной энергии вскоре после 2030 года» и что «крупномасштабное производство безуглеродного водорода должно начаться к 2020 году» (Ausubel, 2003).

В действительности процесс декарбонизации с 1990 года замедлился, в динамике глобального показателя отношения водорода к углероду наблюдается стагнация, использование природного газа выросло с 26% мирового потребления ископаемого топлива до 29% к 2000 году, а к 2010 – снизилось до 28%. Прирост составил 8% за два десятилетия, а чтобы поднять газ до 70% мирового потребления ископаемого топлива к 2030 году, потребуется 250%, что очень сомнительно. Аусубель был прав, предвидев для природного газа куда более важную роль, чем казалось возможным в

1980-х, но его прогнозы относительно роста потребления качественного водородного топлива сбываются очень медленно.

В любом случае, все утверждения, верные для относительной и абсолютной дематериализации глобального материального потребления, верны и для удельной и абсолютной декарбонизации глобального энергоснабжения: в обоих случаях очевидно значительное относительное снижение показателей, которое будет продолжаться, но как не было никакого абсолютного снижения мировых показателей материального потребления, так не было и сокращения в выработке углерода и выбросах CO_2 в мировом масштабе. Верно как раз обратное: выбросы углерода от сгорания ископаемого топлива в мировом масштабе возросли с менее чем 550 миллионов тонн углерода в 1900 году до около 1,6 миллиарда тонн в 1950 году и почти 6,8 миллиарда тонн в 2000 году, и после увеличения на 35% за десять лет установился новый рекорд – 9,13 миллиарда тонн углерода (или 33,5 миллиарда тонн CO_2) в 2010 году (CDIAC, 2013).

Такая же ситуация наблюдается во всех крупнейших странах мира: в двадцатом веке США стали выделять в атмосферу в 8,6 раз больше углерода, Япония в 62,8 раз, а Китай – в 35 700 раз (и это чистая правда!). Во всех западных странах в последнее время наблюдается четкое замедление роста выбросов CO_2 : за 25 лет с 1985 по 2010 год выбросы углерода в США выросли на 22% (или на 24%, если учитывать выбросы, произведенные за границей при производстве импортных товаров, тогда как за 25 лет с 1960 по 1985 год прирост этого показателя составил 63%), в Японии количество выбросов выросло на 18%, а в Германии – снизилось на 27%, в основном в силу упадка экономики Западной Германии после воссоединения. В то же время выбросы CO_2 в Китае возросли в четыре раза, а в Индии – почти на 430% (CDIAC, 2013).

Вывод ясен: хотя процесс удельной декарбонизации запасов топлива в мире, затянувшийся на многие поколения, значительно замедлился во второй половине XX века, он продолжится в ближайшие десятилетия, в первую очередь благодаря большим успехам в добыче природного газа; что касается общих запасов первичной энергии в целом, их росту должны поспособствовать достижения в выработке гидроэлектроэнергии, ветряного и солнечного электричества. Несмотря на это, никаких значимых спадов в выбросах CO_2 в абсолютном выражении не предвидится – и, разумеется, атмосферные процессы и уровень поглощения исходящей радиации в будущем определяются абсолютным содержанием газа в атмосфере, а не сокращением их удельного содержания на единицу продукта или услуги.

За исключением некоторых природных газов, которые представляют собой почти чистый метан, смесей CH_4 и более высоких гомологов серии алканов с прямой цепью (в основном C_2H_6 и C_3H_8), все виды ископаемого топлива содержат некоторое количество серы: от менее чем 0,5% в наиболее легкой (с наименьшим содержанием серы) сырой нефти до более 4% в низкокачественном буром угле: в каменном угле и сырой нефти, реализуемой по всему миру, чаще всего содержится 1,5–2% серы (Smil, 2008). Более 90% производимой человеком серы высвобождается в результате сжигания ископаемого топлива, а остальное – при плавлении меди, цинка и свинца. Выбросы SO_2 окисляются до сульфатов и выпадают в виде кислотных осадков (а также сухих кислотных осадков), которые влияют на почвы, растения, водные и наземные экосистемы, а также повреждают металл, известняк и мрамор. Эти послед-

ствия особенно заметны во всей Западной и Центральной Европе, восточной части Северной Америки и в Китае.

Рост сжигания ископаемых видов топлива сопровождался увеличением выбросов SO_2 приблизительно с 20 миллионов тонн в 1900 году до чуть более 58 миллионов тонн в 1950 году; пик – примерно 150 миллионов тонн – был достигнут в 1979–80 гг. (Smith и соавт., 2010). Но, в отличие от углерода, этот абсолютный прирост выбросов серы сопровождался выраженным удельным обессериванием: согласно нашим подсчетам, сероёмкость снизилась с 465 г серы/ГДж в 1900 году до примерно 400 г серы/ГДж в 1950 году и 270 г к 1980 году. В среднем у углеводородов, занимающих главенствующее положение в глобальном энергоснабжении, содержание серы гораздо меньше, чем в угле, а сырая нефть с высоким содержанием серы и природный газ, богатый H_2S , обычно обессериваются перед сжиганием. После 1980 года тенденция к обессериванию усилилась благодаря практике обессеривания дымовых газов на крупных угольных электростанциях.

Обессеривание дымовых газов устраняет SO_2 благодаря реакциям с основными соединениями (главным образом, известью или молотым известняком); основным продуктом – CaSO_4 – либо закапывается, либо используется в производстве древесноволокнистых плит. Этот процесс был выведен в коммерческий оборот в 1970-х, и к 2000 году около 40% мировых заводов по производству угля уже проводили обессеривание дымовых газов в том или ином объеме (Smil, 2008). Уровень снижения выбросов был впечатляющим: в США они сократились почти вдвое в период с 1970 (первый год, когда Агентство по охране окружающей среды США начало вести подсчеты) по 2000 год (USEPA, 2013); во всем мире относительные выбросы SO_2 сократились примерно до 175 г серы/ГДж к 2005 году, а абсолютные выбросы – до 107 тонн (Smith и соавт., 2010).

По мере того, как в Европе и Северной Америке выбросы сокращались, в Индии и Китае они быстро росли: в период с 1990 по 2005 год выбросы SO_2 в Китае и Индии выросли в два раза, до более 32 миллионов тонн в год и около 10 миллионов тонн в год соответственно; сочетание сильного сокращения выбросов на Западе и их значительного увеличения на Востоке привело к небольшому снижению выбросов SO_2 в мировом масштабе: со 121 миллиона тонн в 1990 году до 112 миллионов тонн в 2005 году. Однако рост выбросов в Азии внес большую неопределенность в общемировые оценки. Например, сравнение шести оценок выбросов SO_2 в Китае (лидирующая в мире страна-источник загрязнений) показывает, что разница между наименьшим и наибольшим значением за 2000 год составляет 38%, а за 2005 год – 35%, причем самые низкие итоговые значения предлагает Министерство электроснабжения Китая (Lu и соавт., 2010).

Каким бы ни было общее число, кажется, что даже китайские выбросы наконец начали снижаться с 2007 года, когда обессеривание дымовых газов стало применяться во многих новых (и некоторых старых) угольных электростанциях Китая – это сокращение подтвердил инструмент измерения общего уровня озона, установленный на борту спутника НАСА Aura (Li и соавт., 2010). Еще одно событие после 2007 года, которое помогло сократить мировые выбросы SO_2 – это сильнейший после Второй мировой войны экономический кризис: за 2010 год всего 103 миллиона тонн, почти на треть меньше общемирового рекорда в 1980 году – а это значит, что

удельное значение выбросов серы составило всего 118 г серы/ГДж, на треть меньше показателя 2000 года (Klimont и соавт., 2013).

Несмотря на неопределенность в расчетах, вывод остается неизменным: в отличие от выбросов CO_2 , дематериализация серных выбросов в мировом масштабе была не только удельной, но и абсолютной, и она произошла, несмотря на растущие темпы сжигания угля благодаря эффективному техническому решению (обессериванию дымных газов). К сожалению, декарбонизация дымовых газов представляет собой технически гораздо более трудную задачу, чем их обессеривание, а в последние годы было слишком много пустых обещаний ее скорого внедрения и нереалистичных прогнозов (Metz и соавт., 2005; Muradov и Veziroglu, 2012). В течение следующих двух десятилетий должно стать понятно, возможна ли эффективная (и недорогая) декарбонизация крупных стационарных источников электроэнергии или лучшим способом декарбонизации остается изменение состава общих первичной запасов энергии.

6

Прогноз использования материалов

Если вы добрались до этой главы (и наверняка не раз жаловались, что в этой книге слишком много цифр), то вас наверняка поразили размах и сложность материальной системы, построенной современной цивилизацией с середины XIX века, а также размер постоянных материальных и энергетических потоков, которые необходимы для поддержания ее работы. Несмотря на то, что и до 1850 года было много выдающихся достижений в добыче, строительстве и потреблении, лишь создание, трансформация и экспансия современной цивилизации обусловили ее зависимость от огромных, постоянных, а теперь еще и действительно глобальных материальных потоков. После тысячелетий зависимости от ограниченного круга материалов – дерева и прочей фитомассы, камня, гравия, песка, глины и десятка других металлов, – которые обрабатывались относительно простыми способами, сегодня мы используем тысячи материалов, чьи качества подгоняются под растущее число различных требований.

Этот рост разнообразия материалов и зависимости от них сопровождался некоторыми значительными достижениями в эффективности, которые можно ярко продемонстрировать, проследив удельный расход энергии и использование материалов за длительный период: снижение энергоемкости, удельная дематериализация, а также сокращение и даже исключение закономерных экологических последствий. В то же время рост численности населения и повышение качества жизни привели к постоянно растущему спросу на практически все традиционные материалы, кроме разве что таких древних биоматериалов, как лен и конопля. Но в совокупности каждая современная нация сегодня нуждается в большем количестве дерева, камня, песка, металлов и нерудных полезных ископаемых, используемых с древних времен, чем 100, 50 или 25 лет назад. К этим традиционным материалам следует добавить значительно расширенное производство новых материалов – включая синтетические удобрения, полимеры (пластмассы), металлы и неметаллические элементы, ранее

не использованные в доиндустриальных обществах. Ни в одном из этих процессов не было абсолютной дематериализации ни на уровне какой-либо крупной страны, ни на мировом уровне.

Возникает множество очевидных вопросов. Как долго будут продолжаться эти теперь прочно укоренившиеся тенденции? Как долго они могут продолжаться? Какие ограничения накладывают природные ресурсы на дальнейший экспоненциальный рост добычи полезных ископаемых и современных видов синтеза, основанных на использовании невозобновляемого сырья? Существуют ли какие-либо непреодолимые экономические препятствия, которые заставят нас ограничить потребление материалов? Пойдем глубже: существуют ли экологические ограничения, которые в XXI веке сделают невозможным такой же рост использования материалов, как в XX веке? И самые важные вопросы: должны ли мы пропагандировать какие-либо рациональные ограничения материального потребления? И если да, то как?

На некоторые из этих вопросов можно ответить, воспользовавшись неоспоримыми доказательствами или сославшись на наиболее вероятные перспективы возможных технических достижений. Соответственно, в начале этой последней главы, мы рассмотрим лучшие из имеющихся у нас доказательства доступности основных материальных ресурсов в контексте возможных будущих требований, а затем обратимся к возможностям замены, переработки и повторного использования материалов. Другие вопросы, заданные в предыдущем пункте, подразумевают суждения о фундаментальных ценностях, а в этих случаях гораздо сложнее найти общую основу и составить рекомендации, которые соответствовали бы обоим критериям – широкой распространенности и реальной эффективности.

Сложные связи множества динамичных показателей будущего роста материального потребления, в том числе переменных, которым присущи относительно внезапные изменения, вносят неизбежную неопределенность в любые долгосрочные прогнозы. Более двух десятилетий назад я решил воздержаться от предоставления таких прогнозов и, оставаясь верным этому решению, не буду ни давать каких-либо оценок наиболее вероятному уровню глобального или национального спроса на конкретные материалы к 2025 или 2050 году, ни предлагать сценарии развития дематериализации или сокращения влияния добычи и использования материалов на окружающую среду в будущем. Вместо этого я попробую оценить наиболее вероятные тенденции развития некоторых основных переменных, которые будут определять будущие темпы и последствия использования материалов.

Начнем с озабоченности по поводу наличия и возможности добычи природных ресурсов, непрерывные потоки которых стали незаменимы для поддержания и развития современной цивилизации. В следующем разделе я расскажу о нескольких способах меньше тратить впустую, эффективность которых обнадеживает: наш потенциал экономии материалов и энергии будет исчерпан еще далеко не скоро. Эти возможности в дальнейшем расширит использование новых материалов и новые достижения удельной дематериализации, но об этом нужно писать отдельную главу. Я закончу книгу (без каких-либо нормативных предписаний) вопросами о некоторых фундаментальных отклонениях от модели массового потребления XX века и возможностях более рационального распределения усилий.

6.1 Природные ресурсы

Мы не будем рассматривать историю изменения взглядов на количество природных ресурсов в мире и достаточность их для поддержания развития современной цивилизации. В США систематический интерес к этому вопросу начали проявлять в 1950-е годы (Президентская комиссия по ресурсной политике, 1952), в 1960-х годах он получил значительное развитие (Landsberg и Fischman, 1963; Landsberg, 1964; NAS, 1969), а начиная с 1970-х годов, был связан с вопросами энергетики и проблем окружающей среды. Кеннет Боулдинг (Boulding, 1970) призвал положить конец линейной экономике, которая извлекает ресурсы, превращает их в товары и выплевывает отходы – процесс, который он считал по своей сути губительным.

Обеспокоенность мировой общественности по поводу исчерпания минеральных ресурсов, возросшая в 70-х и 1980-х годах (Meadows и соавт., 1972; Barney, 1980; McLaren и Skinner, 1987; Ehrlich и Holdren, 1988), превратилась в спор неомальтузианцев и корнукопианцев (от греч. Cornucopia («рог изобилия») – приверженцы мнения, что исчерпание природных ресурсов в будущем будет компенсироваться новыми технологическими достижениями, что обеспечит непрерывный технический прогресс и рост благосостояния. – *Прим. пер.* Simon, 1981, 1995) и усилилась в связи с широтой и скоростью экологических изменений в глобальном масштабе. Последний этап этих начался с предсказания неминуемой пика глобальной добычи, за которым последует резкий спад (Campbell, 1997; Deffeyes, 2001; критику пика добычи нефти см.: Smil, 2006a).

Тот факт, что не было никакого глобального спада нефтедобычи, и что это вряд ли скоро случится, не остановил общественность от переноса этих опасений на другие ресурсы, особенно когда кажущийся неутолимым спрос Китая на минералы перечеркнул столетие неуклонного снижения стоимости сырья в мире для финансово благополучных потребителей (Sullivan и соавт., 2000; The Economist, 2011). Золото стало одним из последних в этом списке «предпиковой» добычи (Kerr, 2012). На самом деле, этот мем о пике добычи сейчас применяется ко всему: американский журналист Ричард Хейнберг (Heinberg, 2010) заявил, что скоро наступит пик всего, а чуть более сдержанный профессор Майкл Т. Клэр (Klare, 2012) предвидит «конец легкой добычи вообще». Он не говорит о каком-то неизбежном дефиците, но упоминает высокие цены и жесткую конкуренцию между компаниями и странами за сокращающиеся ресурсы.

В отличие от этих споров, говорить о которых в долгосрочной перспективе сложно и неконструктивно, краткосрочные перспективы снабжения основными минеральными ресурсами вполне определены, и писать о них нетрудно. Единственное условие рассмотрения этого показателя – правильно понимать фундаментальное различие между запасами и ресурсами (McKelvey, 1973). Ресурсы – это общая масса материала (элементов, химических соединений, минералов, руды) в земной коре; различают земные и подводные ресурсы. Очевидно, что показатели общего количества ресурсов нам достоверно не известны, и по мере активизации бурения и разведки большего количества месторождений их оценки обычно увеличиваются. Даже если нам были бы известны точные запасы того или иного ресурса, эта информация не позволила бы нам рассчитать время, за которое этот минерал был бы полностью

исчерпан: задолго до этого стоимость его добычи с большой глубины и выделения из залежей, в которых он присутствует в мизерных концентрациях, сделает его добычу совершенно нерентабельной.

Категория запасов имеет гораздо больший практический интерес: запасы – это доли ресурсов, которые могут быть извлечены из известных месторождений с известными издержками и с использованием имеющихся методов. Это означает, что ресурсы – раз и навсегда данное и окончательное (но плохо известное) число, в то время как запасы – движимые, точно известные, но постоянно меняющиеся совокупные величины: они получают из ресурсов через инвестиции и технические достижения, непрерывный процесс разведки и применения лучших методов извлечения, добычи и переработки. Полные удельные показатели запасов для страны, континента или всего мира обычно делятся на соответствующие годовые объемы добычи для расчета отношения запасов к добыче. Например, по данным Геологической службы США, отношение запасов к добыче меди в 2011 году составило 42,8 года (USGS, 2013).

Это соотношение не означает, что к концу 2054 года на Земле вообще не останется меди. На самом деле, общемировое отношение запасов к добыче этого металла в 1995 и 1980 году было примерно одинаковым, и относительное постоянство этого показателя (и большинства других показателей добычи минералов) означает, что в промышленности поддерживается приемлемый уровень отношения запасов к ежегодной добыче. Другими словами, усилия по переносу минералов из категории ресурсов в категорию запасов обеспечивают добычу с той же скоростью в течение определенного срока: не слишком короткого, чтобы породить неопределенность, но и не слишком долго, поскольку выявление запасов, до добычи которых не доберутся еще сто лет, не имеет никаких преимуществ. К сожалению, оказывается слишком много плохо осведомленных комментаторов, интерпретирующих отношение запасов к добыче как срок исчерпания всех объемов конкретного минерала. В действительности, нашей цивилизации не грозит опасность оказаться без минералов, ни совсем скоро (через несколько лет), ни в ближайшем будущем (через 10–20 лет), ни даже в масштабе жизни среднего человека (60–80 лет).

Ресурсы распространенных строительных материалов – песка, глины, камня – огромны, что исключает любые сомнения в их доступности в масштабе сроков существования цивилизации (в течение 103 лет). Обильные ресурсы кремния – материала электронной эры – очевидно, относятся к этой же категории. Выживание миллиардов людей требует применения удобрений для производства достаточного количества продовольствия, а у нас никогда не кончится атмосферный азот, необходимый для производства аммиака. Соединение, которое служит наиболее удобным источником водорода – природный газ – разведывается и добывается во все возрастающих количествах. В последние годы некоторые адепты неомальтузианства начали высказывать озабоченность пиком добычи фосфора (Beardsley, 2011), даже пиком добычи углекислого калия.

Возможно наиболее примечательно то, что этот новый страх (об исчерпании запасов минералов вообще и фосфатов в частности) появился в ведущем мировом еженедельном научном журнале *Nature*, где в рубрике «Взгляд на мир» утверждалось, что:

Цены на сырье во всем мире быстро растут. Это настоящий сдвиг парадигмы, возможно, наиболее важное экономическое событие со времен Промышленной революции. Попросту говоря, у нас заканчиваются ресурсы... Нет никаких резервных запасов... надвигается дефицит двух удобрений: фосфора (фосфата) и калия (углекислого калия). Эти два элемента нельзя синтезировать, заменить, они необходимы для выращивания всех форм жизни, и теперь их запасы подходят к концу. Это страшные утверждения... Я не нахожу удовлетворительного ответа на вопрос о том, что будет, когда эти удобрения закончатся, а я, поверьте, искал. Мне видится только один вывод: их использование необходимо резко сократить в ближайшие 20–40 лет, или мы начнем голодать (Grantham, 2012, стр. 303).

Я отметил, что Джереми Грантхэму стоило поискать еще совсем чуть-чуть (Smil, 2012). Поиск в Интернете привел бы его к публикации «Мировые запасы и ресурсы фосфатов» Международного центра исследований в области удобрений (Van Kauwenbergh, 2010). Это последнее подробное исследование мировых запасов фосфатов обнаружило, что их хватит на удовлетворение мировых потребностей в удобрениях на следующие 300–400 лет. Аналогичным образом, издание Геологической службы США «Сводка по минеральному сырью» 2012 года содержит сведения о значительных изменениях резервов фосфатов в Марокко, России, Алжире, Сенегале и Сирии и устанавливает мировое отношение запасов к добыче на уровне примерно 370 лет (USGS, 2012). Международная ассоциация производителей удобрений (членами которой являются большинство из наиболее известных производителей и дистрибьюторов удобрений в мире) подчеркнула, что она **«не считает, что пик добычи фосфора является насущной проблемой, или что истощение фосфатной породы неизбежно»** (выделено в оригинале; IFIA, IFIA, International Fertilizer Industry Association, 2013).

Однако в этом заявлении было подчеркнуто, что все «усилия по минимизации потерь фосфора в окружающую среду и оптимизации использования фосфора должны поощряться» – не только потому, что такие усилия позволят сэкономить деньги, но и потому, что чрезмерное применение фосфатов является одной из основных причин эвтрофикации вод. Действительно, призыв к минимизации потерь должен быть общемировым требованием, в первую очередь не из-за каких-либо опасений скорого истощения ресурсов, а поскольку расточительное использование материалов ведет к экономическим и экологическим издержкам. Кроме того (к этому я еще вернусь в заключительном разделе книги), гораздо больших успехов в сокращении применения удобрений можно добиться за счет сокращения среднего потребления мяса на душу населения во всех богатых странах, где удобрения сегодня используются для выращивания не еды, а корма для животных.

Что касается углекислого калия, то последнее отношение запасов к добыче, приведенное в отчете Геологической службы США, составляет более 250 лет. Не предвидится и дефицита металлических руд. Геологическая служба США оценивает глобальные запасы железной руды в более чем 80 миллиардов тонн, а ресурсы – в более чем 230 миллиардов тонн, запасы и ресурсы медной руды в 690 миллионов тонн и более чем 3 миллиарда тонн соответственно: в расчете на уровень добычи 2011

года отношение запасов к добыче железных и медных руд составляет 30 и 40 лет соответственно: как уже отмечалось, оно не сильно отличается от того же соотношения 20 или 40 лет назад, несмотря на то, что процессу перевода ресурсов в запасы пришлось догонять массовое увеличение добычи. Примерно такое же отношение запасов к добыче никеля и марганца, и значительно большее – для титана, ванадия и серебра. Редкоземельные металлы в действительности тоже не являются редкими: их содержание в земной коре не так уж и низко, хотя месторождений с концентрацией, достаточной для рентабельной добычи, меньше.

Это впечатление редкости создалось из-за того, что Китай почти монополизировал их добычу и на время сократил экспорт. В ответ на это сокращение в Северной Америке, Австралии и Африке произошел всплеск разведки, и открытие новых шахт скоро изменит эту неблагоприятную ситуацию (ССС, 2012). Есть возможность и для замены этих металлов (Holliday и соавт., 2012), и как только Китай начал ограничивать экспорт редкоземельных металлов, японские компании начали более активно исследовать способы их замены и переработки. Компания Hitachi успешно разработала машины, которые могут автоматически извлекать магниты из жестких дисков и компрессоров, а затем вырабатывать из них неодим и диспрозий высокой степени очистки сухим методом (Nemoto и соавт., 2011).

Роберт Гордон и его коллеги (Gordon и соавт., 2006, стр. 1213) пришли к выводу, что «нет никакой неотложной проблемы с запасами минеральных ресурсов, достаточных для удовлетворения потребности в геохимически дефицитных металлах». Точно так же после рассмотрения нужд главных отраслей экономики Томас Грэдель (Graedel, 2011, с. 332) обнаружил, что «по меньшей мере в обозримом будущем в мировом масштабе нет никаких значительных проблем в обеспечении энергетики основными металлами». Конечно, эти выводы не исключают возможности роста потребностей в энергии, а, следовательно, и затрат на добычу. Содержание металлов во многих разрабатываемых металлических рудах сокращается уже несколько поколений, в среднем примерно на 1 % в год.

Разумеется, содержание некоторых руд в некоторых странах сокращается гораздо быстрее; например, малазийские оловодобывающие компании сегодня имеют в два раза больше отходов, чем двадцать лет назад (Sims и Rusmana, 2011). В результате этого снижения качества руды (кроме алюминиевых и железных руд, изменений в качестве которых не ожидается) в сочетании с растущим спросом Терри Норгейт и Шариф Джаханшани (Norgate, Jahanshahi, 2011) оценивают возможное увеличение энергоемкости мировой добычи основных металлов (Al, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) в четыре раза к 2010 году – от примерно 2 ЭДж в 2010 году до 8,7 ЭДж. С другой стороны, такие расчеты не принимают во внимание дальнейших технических достижений и будущих изменений спроса.

Использование золота – пример ситуации, когда рационализация потребления металла может обеспечить спрос на него в важных отраслях промышленности: в 2011 году большую часть спроса на золото составляли ювелирные изделия (48 %) и деньги (41 % в слитках, монетах, медалях), и только 11 % (около 450 т) приходится на промышленность, причем электроника составляла 320 т, или менее 8 % совокупного спроса (Savage, 2013). В предстоящие десятилетия вероятное увеличение спроса на золото в электронной промышленности можно легко удовлетворить, перейдя

к более рациональному разграничению конечного использования металла и к почти полной переработке золота из богатых им отходов электрического и электронного оборудования: месторождения аллювиального золота дают 1–5 г золота/т породы, тогда как компьютерные платы дают 250 г/т, а мобильные телефоны – до 350 г/т (Owens, 2013).

В любом случае, в долгосрочной перспективе все выглядит иначе, особенно учитывая, что рано или поздно весь мир захочет потреблять столько же, сколько богатые страны в общем (и США в частности) потребляют в последнее время. Например, Роберт Гордон и его коллеги (Gordon и соавт., 2006) оценивают ресурсы меди в мире в 1,6 миллиарда тонн, но обеспечение каждого из 10 миллиардов человек будущего населения мира 170 кг меди (расход на душу населения в Северной Америке в 2000 году) потребует 1,7 миллиарда тонн меди – больше, чем содержится в земной коре по оценкам экспертов. Разумеется, на самом деле потребуется намного больше металла, чтобы восполнить неизбежные потери при использовании и переработке. Авторы предполагают, что для покрытия этой потребности нужно будет добыть весь цинк и всю платину, которые содержатся в литосфере.

С учетом сохранения исторических темпов роста потребления можно выполнить аналогичные расчеты, демонстрирующие возможные ограничения ресурсов. Средний уровень потребления меди (общемировое потребление которой до 1900 года составило примерно 10 миллионов тонн) за 50 лет с 1900 года составил: 70 миллионов тонн до 1950 года, 340 миллионов тонн до 2000 года и (если принять рост потребления после 1950 года за 3,3 % в год) 1700 миллионов тонн до 2050 года, что опять же превышает оценки поддающихся извлечению запасов металла. Такие расчеты можно интерпретировать как неопровержимое доказательство приближения катастрофического краха современной цивилизации, а можно – как интересные, но чрезмерно упрощенные упражнения, поскольку разумные предположения (сделанные на основе известных методов, опыт применения которых уже имеется) могут коренным образом изменить их интерпретацию.

Количество необходимых материальных запасов можно значительно снизить, уменьшив потребление на душу населения, особенно по мере роста цен на материалы; технические улучшения позволят поддерживать ту же функциональность, используя лишь малую долю материалов; необходимость в новой продукции можно снизить благодаря тщательной переработке – все эти изменения могут значительно сократить ожидаемый рост спроса; население может не достичь ожидаемых отметок к назначенному году; наконец, непонятно, почему именно спрос на материалы на душу населения в Северной Америке или США должен служить другим странам образцом для подражания. Кроме оценки запаса природных ресурсов и среднего спроса на них на душу населения (годового спроса или объема рециркуляции) есть еще три других основных переменных (или ограничения), которые определяют будущее материального производства: наши возможности по добыче материалов по доступной цене; степень воздействия процессов использования этих материалов на окружающую среду; а также степень заменимости материала.

Последний вариант имеет свои ограничения, заданные эволюцией биосферы: водород, кислород, углерод и азот – незаменимые макроэлементы любой формы жизни, но их доступность обеспечивают глобальные биохимические циклы. Так-

же в меньшем количестве требуются элементы, необходимые для построения отдельных органов и для обеспечения биохимических процессов: в них входят Ca, K, Na, Mg, Cl, S и небольшие количества Co, Cu, Cr, F, Fe, I, Mn, Mo, P, Se, Si, Sn и V. Однако общая масса этих элементов, которая необходима для поддержания жизни на Земле незначительна по сравнению с массой нерудных полезных ископаемых и металлических элементов, добываемых современной цивилизацией, поэтому проблема поиска заменителей распространяется в основном на металлические элементы, которые необходимы в относительно больших количествах, но отсутствуют в земной коре либо в относительно скромных концентрациях (в отличие от огромных ресурсов Fe, Al, Ca, K, Mg или Si), либо в менее доступных формах.

Медь – прекрасный пример этой категории металлов: она необходима не в таких огромных количествах, как сталь, но, тем не менее, используется во многих потребительских продуктах. Например, средний автомобиль содержит 1,5 км медного провода, а совокупная масса этого металла колеблется от 20 кг в небольшом автомобиле до 45 кг в большом кроссовере (USGS, 2009). Что бы мы делали без добычи новой меди? Переработка отходов в этом смысле не очень перспективна: к концу XX века США извлекли 101,5 миллиона тонн меди, и 16,5 миллиона тонн металла оставалось в отходах производства, главным образом, в отвалах (15,3 миллиона тонн меди в 12 миллиардах тонн отвалов) и шлаках (1,2 миллиона тонн меди в 212 миллионах тонн шлаков) (Lifset и соавт., 2002). Но, как отмечали Г. Геллер и Элвин Вайнберг (Goeller, Weinberg, 1976) десятилетия тому назад, в долгосрочной перспективе медь в электроприборах можно будет почти полностью заменить алюминием, а в конструкционном применении – алюминием, сталью, титаном, пластиками и композитными материалами. Низкие концентрации элементов в породе, повышающие стоимость добычи, перестанут быть проблемой, как только будет освоено высокоэффективное преобразование потоков возобновляемой энергии.

В действительности будущие материальные потребности будут определяться множеством динамических связей вышеописанных переменных. Примеров их взаимосвязи очень много. Даже почти полное исчерпание высококачественных месторождений полезных ископаемых не будет поводом для беспокойства, если благодаря новым методам станет возможно добывать ресурсы, добыча которых в прошлом была совершенно нерентабельной). Даже крайне ограниченный ресурсный потенциал (когда ресурс никак нельзя извлечь) перестает быть проблемой, если есть готовый заменитель. Потребление тех материалов, которые доступны в изобилии, может иметь неприемлемые экологические последствия, но и их можно сократить или избежать, заменив материал или значительно изменив спрос на него на душу населения.

В последние два-три десятилетия мы уже стали свидетелями начала некоторых таких сдвигов и формирования новых тенденций. На самом фундаментальном уровне произошли некоторые заметные сокращения средних темпов экономического развития во многих богатых странах. В период с 1990 по 2008 год (за год до резкого снижения из-за сильнейшего экономического спада после 1945) совокупный ежегодный рост ВВП составил 2,73 % в США, 2,03 % в Западной Европе и 1,24 % в Японии (IMF, 2013), намного ниже, чем в период с 1950 по 1973 год (год внезапного повышения цен на нефть ОПЕК), когда ВВП западноевропейских стран вырос на 4,79 %/год, США в среднем 3,93 % и Японии – на 9,29 %/год (Maddison, 2007).

Это ожидаемое замедление (характеризующее все крупные системы по мере достижения ими зрелости) сопровождается выравниванием и даже небольшим снижением потребления энергии и некоторых основных материалов на душу населения. В 2010 году в США на душу населения в среднем потребление первичной энергии было примерно на 8 % ниже уровня 1980 года, в Великобритании снижение за этот же период составило 9 %, в то время как с середины 1990-х годов в самых разных богатых странах – Италии и Швеции, Франции и Японии – показатели стабилизировались (наблюдались лишь незначительные колебания) (USEIA, 2013). В материальном выражении насыщенность потребления на душу населения, в некоторых случаях с последующим спадом, наблюдается для таких разных товаров, как сталь и цемент. После четырех десятилетий снижения (с колебаниями) показатели потребления стали на душу населения в 2008 году (до падения, вызванного глобальным экономическим спадом) был значительно ниже, чем в 1970 году, не только в Великобритании, но и во Франции и США, и немного ниже в Канаде и Японии (WSA, 2013).

Некоторые комментаторы сделали из долгосрочного абсолютного снижения использования материалов в Великобритании далеко идущие выводы, утверждая, что страна уже достигла пика материального потребления (Clark, 2011). Общие материальные потребности (прямые и косвенные потоки) сократились примерно на 21 % за период с 1990 по 2010 год, а прямые материальные затраты за этот же период – на 20 % (ONS, 2012). Материальная производительность Великобритании в эти двадцать лет выросла более чем в два раза, тогда как масса ресурсов по отношению к растущей экономической деятельности снизилась. Однако в эту оценку входят все виды топлива, и поэтому на нее сильно повлиял упадок добычи угля в Великобритании и быстрый переход к углеводородам, а показатель 2010 года отражает неспособность страны восстановиться после экономического кризиса 2008 года. В период с 1970 по 2007 год общие потребности страны в материалах выросли на 16 %. Разумеется, чтобы ясно увидеть долгосрочные тенденции, нужно больше времени.

Но нет сомнений в том, что сочетание удельной дематериализации (на единицу ВВП или на душу населения), минимального (или нулевого) роста населения и быстрого старения населения богатых стран все больше и больше будет ослаблять потребность страны в материалах. Среднегодовые темпы роста населения в более развитых регионах уже в 2005–2011 годах составляли всего 0,4 %, а к 2050–55 годам, согласно прогнозам, упадут до нуля; старение населения уже очевидно в Японии и в ЕС, и к 2030 году почти 30 % населения в более развитых странах будет старше 60 лет, по сравнению с 20 % в 2000 году (UNDESA, 2013). В результате будущий экономический рост в богатых обществах может и не потребовать существенных дополнительных материальных затрат, поскольку любые новые потребности, обусловленные умеренным ростом ВВП (1–2 %/год), достаточны для уже в значительной степени насыщенных рынков с медленно растущим (а во многих странах сокращающимся) и стареющим населением будут полностью или в значительной степени удовлетворены благодаря сочетанию дальнейшего снижения средней энергоемкости, удельной дематериализации продуктов и услуг, а также активизации переработки и повторного использования.

Страна, внесшая наибольший вклад в рост материального спроса прошлого поколения, Китай, удержит этот рекорд не дольше следующих 20–30 лет: рост ее ма-

териального потребления просто обязан замедлиться. В конце концов, в 2010 году эта страна уже потребляла на 36 % больше стали на душу населения, чем ЕС-27, и на 50 % больше, чем США. Недавний пик потребления цемента на душу населения в Китае составил в 2,5 раза больше уровня Японии, более чем в 3 раза больше уровня Германии и США, а в некоторых регионах страны уровень его потребления сравнялся с уровнем потребления в Испании в 2007 году перед упадком испанской строительной промышленности – 1300 кг/душу населения или даже превысил его; во всех странах, где годовое потребление цемента превысило 1 т на душу населения, «строительный пузырь» рано или поздно лопнул (Bell, 2012). Эти реалии необходимо рассматривать, опять же, с учетом замедления темпов прироста и относительно быстрого старения населения страны: к 2040 году в Китае будет столько же людей старше 60 лет, как в Японии в 2010 году (UNDESA, 2013).

Конечно, даже учитывая, что совокупные потребности в материалах в богатых странах мира почти стабилизировались, потребление на душу населения стабильно падает, а рост экономики Китая значительно замедлился, у нас впереди по-прежнему остаются десятки лет потенциально высокого спроса на энергию и все виды товаров в Индии и других густонаселенных странах Азии, а также в Африке. Это означает, что (не беря в расчет беспрецедентные стихийные бедствия и длительные экономические спады) мы не увидим значительного снижения общего объема добычи и производства материалов, и что сокращение глобальных темпов роста будет считаться благоприятным в течение следующего одного-двух поколений. Но несмотря на эти ограничения продолжительного (хоть и умеренного) роста материального потребления, есть много шансов внести изменения в этот процесс: повышение эффективности производства, долговечности и простоты переработки материалов с целью обеспечить их длительное использование и максимальную переработку с минимальными последствиями для окружающей среды.

6.2 Сокращение отходов

Несмотря на многие недавние улучшения на различных этапах производства, использования и повторного использования материалов, по-прежнему остается много различных возможностей тратить существенно меньше сырья и готовых продуктов. Систематического обзора этих возможностей легко хватит на целую отдельную книгу, а здесь я упомяну лишь несколько ярких примеров, демонстрирующих разнообразие возможных улучшений и их значительные результаты. Я остановлюсь на четырех категориях вариантов сокращения отходов: изменение конструкции продукта для сокращения отходов, переход к более рациональному и экономному производству, более активная и эффективная переработка и поощрение замены материала.

Однако прежде чем перейти к ним, я должен подчеркнуть, что наиболее важный не прямой способ рационализации и ограничения потребления материалов сегодня – использовать все возможности сократить энергоемкость на всех этапах работы с материалами от добычи и переработки минералов, транспортировки и производства до распределения и переработки или повторного использования побочных соединений и продуктов. Разница между передовыми методиками и реальными процессами на

сегодня отражает размер потенциальной экономии: почти в 2,5 раза для алюминия, в 2 раза для стали и только 1,3 раза для аммиака.

Конечно, на практике невозможно близко подойти к теоретическому минимуму, который позволит высвободить металлы из руды или синтезировать компоненты из их составляющих с минимально возможной потерей ресурсов, но и без всяких принципиально новых открытий можно достичь значительной экономии. Например, при подробной оценке целлюлозно-бумажной промышленности США средний расход энергии – взвешенный по типу производственного процесса (крафт, термомеханическая обработка) и типу бумаги (печать, облицовочный картон и др.) – составил 27,4 ГДж/т, а как применение наилучших известных на сегодня методик позволит снизить этот расход примерно на 26 % до 20,5 ГДж/т (Jacobs и IPST, 2006). Во многих других отраслях применение наиболее эффективных существующих методик также позволит сэкономить 20–30 % энергии.

Следует всегда стремиться к использованию минимально возможного количества материалов, за исключением случаев, когда это приведет к созданию менее безопасных, удобных или долговечных продуктов. Возможности для экономии путем изменения конструкции можно наиболее широко и эффективно применить в строительстве: неоптимальное проектирование зданий обычно означает, что общий расход материалов можно снизить на 30 %. Самый простой способ сократить использование материалов – упаковка. Межконтинентальная транспортировка требует достаточной защиты груза, но чрезмерная упаковка потребительских товаров (будь то инструменты, продукты питания или подарки) стала повсеместным атрибутом в современных богатых обществах, люди привыкли к этой часто бесполезной трате материала; упаковка просто снимается и выбрасывается.

Это относительно недавний феномен: еще в 1970-х годах не было такого, что каждый элемент заключается в блистерную упаковку, приклеенную к бумажной подложке (что значительно усложняет переработку этих двух очень разных материалов); простые в переработке бумажные пакеты широко распространились в продуктовых магазинах; а овощи и фрукты продаются расфасованные по пластиковым контейнерам и стаканам. Непревзойденный образец такой излишней упаковки – Япония, в которой продукты заворачиваются в несколько слоев бумаги и пластика. Численные показатели этого процесса вовсе не тривиальны: в расчете на душу населения ежегодно производится 40 кг только пластиковых отходов в Италии, Испании и Нидерландах, а средний показатель по ЕС составляет около 30 кг, а всего в Евросоюзе (в том числе в Швейцарии) в 2008 году было произведено 15,6 миллиона тонн отходов (ЕС, 2011). Этот переход к чрезмерной упаковке продукции была обусловлена стремлением к сокращению рабочих мест в продажах и ускорению оформления покупок, но его последствия для материального потребления и окружающей среды были плачевными.

Один из лучших систематических обзоров возможностей по экономии материалов в производстве можно найти в труде по оценке сокращения отходов от производства металлов, в частности стали и алюминия Джулиана Олвуда и Джонатана Каллена (Allwood и Cullen, 2012). Авторы выделяют такие возможности в шести различных последовательных категориях: использование меньшего количества металла в конструкции; снижение потерь конечной продукции; сокращение доли

брака; повторное использование металлических компонентов; стремление к увеличению долговечности продуктов и сокращение конечного спроса на услуги по обработке металла. Даже экономия металла, заложенная в конструкцию – возможно, наиболее очевидная цель рационального конструирования – далеко не полностью исчерпала себя. По оценкам Оллвуда и Каллена (Allwood и Cullen, 2012), облегченная конструкция стальных балок может снизить их массу на 20–50 %, экономия металла при производстве арматуры может составить более 30 %, а автомобильных кузовов – 40 %; в совокупности это 100 миллионов тонн сэкономленного металла, то есть почти столько же, сколько США израсходовали до 2008 года. Технология послойного наращивания (3D-печать) позволяет производить сложные формы с минимальными отходами (Gibson и соавт., 2010; Gebhardt, 2012).

Продление срока службы продукции – еще один очевидный способ экономии материала, но наибольшие результаты приносит снижение потерь в выходе продукции и сокращение доли брака. Большинство людей удивляются, узнав, что значительные доли вновь произведенных металлов (более 25 % стали, почти 50 % алюминия) не доходят до конечных продуктов: при производстве обычной балки уголкового сечения может использоваться 90 % произведенной стали, но для алюминиевой банки этот показатель составляет 50 %, а для алюминиевого крыла для самолета – всего 10 %. Эти показатели можно улучшить, изменив конструкцию продукта, и, хотя потери материала в процессе производства перерабатываются, процесс их переплавки требует энергии и загрязняет атмосферу выбросами.

Некоторые из этих внутренних отходов – неизбежные побочные продукты производственных процессов: отходы образуются при поверхностной обработке и резке металла, токарная стружка получается при сверлении, фрезеровании и шлифовании. Также металлы тратятся впустую из-за поверхностных и внутренних дефектов, вязкости обработки, а при выполнении некоторых операций получается много брака из-за большого количества заказанного сырья: новые материалы в идеальном состоянии не пригодаются и отправляются на переработку. По оценкам Оллвуда и Каллена (Allwood и Cullen, 2012), до 30 тонн каркасов для поверхностной обработки стали и до 20 тонн алюминиевой стружки не обязательно переплавлять – их можно использовать менее энергоемкими способами. Аналогичным образом, потери материалов на строительных площадках, которые обычно составляют около 10 % массы первоначально поставленных материалов, при правильном менеджменте можно легко сократить наполовину.

Большие возможности для расширения переработки остаются даже в производстве бумаги и алюминиевых банок – материалов, лидирующих по переработке во всех богатых странах (кроме, пожалуй, Японии, поскольку там вторичная переработка бумаги уже достигла предела возможностей). Возможно, наиболее примечателен тот факт, что до 2008 года бумага в США оставалась самым неперерабатываемым материалом, большая часть которого отправлялась на свалку (почти 21 % общей массы, тогда как для пластика этот показатель составил 17 %), и хотя к 2010 году она обогнала пластик по переработке (16,2 % непереработанной бумаги и 17,3 % пластика), общая масса бумаги на свалках составляла почти 27 тонн/год (USEPA, 2011a): это больше, чем масса всей бумаги и картона, произведенных Германией за тот же год (FAO, 2013).

И хотя в 2010 году в США масса бумаги, отправившейся на свалку, составила лишь половину той же массы в 1990 году (26,7 миллиона тонн и 52,5 миллиона тонн), за те же двадцать лет масса выброшенного пластика выросла на 70 %, а общая масса перерабатываемых полимеров, 28,5 т, превысила совокупное производство Франции и Германии за год (Plastics Europe, 2012). Другое сравнение: роюсь в мусорных баках крупного азиатского города, бродяга, собирающий мусор, будет целый день искать 1 кг пластиковых пакетов, тогда как в США на свалку ежедневно отправляются 80 тысяч тонн пластика. В то время как в США в 2010 году перерабатывалось только 8 % пластмассового мусора (от 23 % для ПЭТ-бутылок (полиэтилентерефталат) до менее чем 1 % для полипропилена), целью ЕС на 2020 год является полное отсутствие пластиковых отходов на свалках (EPRO, 2011). Для этого потребуются на 50 % поднять уровень переработки, который в 2010 году составил 66 % с примерно равными долями вторичной переработки и сжигания для выработки энергии. И, конечно, утилизация отходов не является синонимом переработки, поскольку значительные доли собранных отходов не используются повторно, а отправляются на свалки (после уменьшения объема путем измельчения или сжигания).

Необходимо стремиться к переработке максимально возможного количества материалов, и важнейший шаг, который мир должен предпринять в этом направлении, не требует никаких особенных приготовлений и разорительных инвестиций. При разработке продуктов должны учитываться разделение и утилизация отходов, что значительно упрощается благодаря использованию современных САД-программ, однако по-прежнему редко считается важным. Рациональная разработка продукта с учетом последующей переработки особенно важна для утилизации растущей массы отходов электрических и электронных устройств. Интересным проектом в этой области стало введение роботизированных киосков ecoATM (к концу 2012 года в США их появилось 100 штук), которые оценивают стоимость старых мобильных телефонов и выдают наличные за устройства, которые затем продаются заказчиком: фирма является посредником между потребителями и компаниями, которые ремонтируют и перепродают телефоны либо разбирают их на компоненты и перерабатывают в ценные металлы (ecoATM, 2013). Эту же модель можно применить для утилизации всех остальных электронных устройств.

С другой стороны, следует отметить, что, к счастью, некоторые прогнозы будущих потребностей в утилизации могут оказаться преувеличенными. Например, Лу и соавт. (Lu и соавт., 2010) дают прогноз, что к 2030 году количество ежегодно устаревающих компьютеров достигнет 700 миллионов единиц в развивающихся странах и до 300 миллионов в развитых регионах – но даже за короткое время, прошедшее с того момента, когда была написана эта статья (в 2009 году) стало ясно, что небольшие мобильные устройства будут приобретать все большую важность по мере того, как будут заполнять новые ниши (от электронной почты до фото банков и чтение журналов), которые раньше занимали персональные компьютеры. В результате состав отходов электронных устройств будет выглядеть совсем не так, как описано в этом довольно механическом прогнозе.

Как я показал во второй главе, история использования материалов в значительной степени состоит из их замен. Сейчас этот процесс становится как никогда важ-

ным, и самый простой пример этому – сокращение веса. Сокращение веса приводит к прекрасным результатам во всех видах промышленной металлообработки и не обязательно требует отказа от использования традиционных материалов с большим удельным весом. Оно достигается, например, за счет использования передовых высокопрочных видов стали, обработанных методом холодного формования или горячего штампования, или входящих в более легкие и прочные многослойные материалы: крыши для автомобилей со слоем полимеров толщиной менее чем в 0,4 мм между двумя стальными листами толщиной 0,2 и 0,3 мм весят почти на 40 % меньше цельнометаллических (Hoffmann, 2012).

Замена стали на алюминий развивается уже несколько десятилетий, особенно в автомобильной промышленности. В 1975 году средний автомобиль в США содержал 36 кг алюминия, к 2012 году – уже 155 кг, прежде всего в двигателе, коробке передач, дисках и колесах (Schultz, 2012). Тем не менее, остается еще множество других возможностей, и по оценкам Международного института алюминия (IAI, 2008), при сокращении веса в транспортном секторе можно снизить ежегодные выбросы CO₂ на 700 миллионов тонн: это выгодно для любого вида пассажирских и грузоперевозок (автомобили, грузовики, поезда, корабли и самолеты). Снижение веса продукции с использованием пластика, армированного углеродным волокном, особенно привлекательно, поскольку оно позволяет снизить массу автомобильного шасси на 50 % по сравнению со сталью и на 30 % – с алюминиевыми сплавами: подключаемый к электросети гибридный автомобиль BMW i3 – первый автомобиль с умеренной ценой, в котором используется углепластик (BMW, 2013).

Впрочем, возможности по снижению веса продукции везде, хотя некоторые из них сталкиваются с необычными барьерами в восприятии/предпочтении людей. Розлив вина в пластиковую упаковку – прекрасный пример такого барьера: учитывая объемы межконтинентальной торговли вином, миллионы бутылок, перевозимых контейнерными судами, в общем объеме такая замена приведет к огромной экономии энергии и материалов. Винные бутылки можно сделать легче (на целых 25 %), а качество вина не пострадает, если разливать вино в Tetra Pak – картонные упаковки с полимерным покрытием (даже если сравнивать упаковку в 1 л с бутылкой в 0,75 л), которые позволили бы снизить массу на 95 %; кроме того, энергия, затрачиваемая на весь жизненный цикл картонной упаковки, примерно на 70 % ниже, чем у стеклянных бутылок (Franklin Associates, 2006).

Напомню также, что снижение веса продукции не всегда является лучшим решением с точки зрения функциональности. В порядке от самых легких к самым тяжелым распространенные контейнеры для напитков располагаются так: алюминиевые банки, пластиковые бутылки, стальные банки, стеклянные бутылки; в соответствии с энергоемкостью от наиболее энергоемких к наименее – стекло, сталь, пластик, алюминий; что касается отношения энергоемкости производства к объему контейнера, то сначала идет сталь (3,4 МДж/л), затем пластики (3,5-5,5 МДж/л), стекло (примерно 8 МДж/л) и алюминий (9 МДж/л). Таким образом, в функциональном отношении сталь лидирует: все остальные материалы требуют больше энергии на производство контейнера на единицу объема жидкости (ImpEE Project, 2008). Качественные соображения часто являются наиболее важными, так как новые материалы могут обладать свойствами, позволяющие им заполнить новые ниши: например,

термопластичный эластомер Hytrel TPC-ET от DuPont обладает гибкостью резины и прочностью пластика (DuPont, 2013).

Один из самых последовательных замен стало производство электроники без использования свинца (Li и соавт., 2005). В Японии с 2005 года, а в ЕС с 2006 все новые электронные продукты производятся без использования свинца: вместо них используются сплавы без свинца (с оловом, серебром и медью) и электропроводные клеи. Еще более фундаментальный сдвиг – переход от кремния к полупроводниковым соединениям, которые обозначаются III-IV по их положению в периодической таблице химических элементов – арсениду галлия (GaAs), арсениду галлия-индия (InGaAs) и антимониду индия (InSb) – с зарядовой способностью, намного превышающей кремний (InSb – на 2 порядка) (Service, 2009).

6.3 Новые материалы и дематериализация

Перспективы использования новых материалов для производства лучших моделей часто используемых товаров и более эффективного (прежде всего, менее энергоемкого) и менее экологически вредного их производства и потребления сегодня обнадеживают как никогда, а научные разработки стремятся воплотить все эти цели в жизнь. Подробные технические описания некоторых из наиболее важных достижений науки и новых материалов, которые будут использоваться в энергетике и охране окружающей среды, в том числе в искусственном фотосинтезе, можно найти в труде Дэвида Джинли и Дэвида Кэйена (Ginley и Cahen, 2012). Особым достижением было бы внедрение новых материалов для лучшего (с точки зрения энергетической плотности и времени разрядки) хранения больших объемов энергии (Dunn и соавт., 2011).

Здесь я хотел бы отметить несколько замечательных достижений и полезных инноваций, которые обретут много важных практических применений в последующие 10–30 лет: от перспективных новых наноматериалов до старых материалов с новыми особенными свойствами или свойствами, расширенными до беспрецедентных масштабов. Наноматериалы – искусственно созданные структуры, размер которых хотя бы по одному из направлений находится в нанодиапазоне до 100 нм, – уже используются как катализаторы, компоненты фильтров, в полупроводниковой промышленности, как носители лекарственных средств и косметических препаратов. Они, безусловно, найдут применение в будущем в нескольких важных отраслях промышленности и растущем ряду предметов повседневного спроса. Графен – это двумерная (толщиной в один атом) углеродная структура, в которой предельная механическая прочность сочетается с исключительно высокой электронной и тепловой проводимостью (Novoselov и соавт., 2012). Его прочность на растяжение составляет 100 ТПа, что 5 порядков больше, чем прочность стали, упругость (модуль Юнга) почти равна упругости алмаза, по подвижности электронов он превосходит кремний на 2 порядка, а его теплопроводность на порядок выше, чем у серебра (Savage, 2012).

Производство этого материала – весьма сложная задача, но в будущем ожидается его широкое использование с самыми различными целями - от производства

покрытий и прозрачных проводящих слоев до высокочастотных транзисторов и датчиков. В 2013 году годовой объем производства углеродных нанотрубок (представляющих собой свернутые в цилиндр графеновые плоскости) достигло нескольких тысяч тонн; они уже используются в производстве таких разнообразных продуктов, как аккумуляторы, автозапчасти, фильтры для воды, покрытия, суперконденсаторы и электромагнитные экраны (de Volder и соавт., 2013). Планируется также применять их в новых молекулярных транзисторах (размером всего 9 нм), которые будут использоваться в качестве реле (Franklin и соавт., 2012).

Есть также много возможностей по изменению классических материалов и добавлению в них новых востребованных свойств. Например, это самоочищающиеся стеклянные поверхности, покрытые тонким слоем TiO_2 (который помогает очистить поверхность при помощи сочетания фотокатализа и гидрофильности – стекло Activ™ Пилкингтона), или сделанные из супергидрофобных материалов. TiO_2 может также входить в состав некоторых других материалов, подверженные воздействию окружающей среды, придавая им способность самоочищаться, поскольку под воздействием ультрафиолета молекулы диоксида титана катализируют реакции окисления органических веществ. На незащищенных поверхностях в конечном счете поселяются бактерии, мхи, водоросли и грибки, но обработанные поверхности будут противостоять этому (Pilkington, 2013). Сгибаемый бетон – еще один вариант инноваций в древнем материале.

Эксперименты показали, что зольная пыль может заменить 65 % цемента в сочетании с достаточным количеством суперпластификатора. Вместе с золой или вместо нее можно использовать металлургический шлак. Расход энергии на производство бетона тоже можно сократить, если применять другую, более прочную разновидность материала, разработанную Виктором Ли. Это гибкий материал, более известный как высокопрочный бетон или проектируемый цементный композит, содержит мелкие частицы полистирола. Когда полимерное волокно из поливинилового спирта добавляется к бетону, крошечные пластиковые волокна стягивают микротрещины и тем самым повышают несущую способность конструкции (Li, 2012).

Зарождается отрасль самовосстанавливающихся материалов (полимеров и композиционных материалов), которые могут устранять трещины и разрывы и восстанавливать свою функциональность (White и соавт., 2011). Не менее важные последствия будет иметь внедрение в широкое использование не только полностью биоразлагаемого (в результате окисления), но, более того, биокompостируемого пластика, который сможет разлагаться микроорганизмами на CO_2 и H_2O на промышленных компостных предприятиях за то же самое время, за которое обычно разлагаются органические отходы (Shalaby и Burg, 2004). Конечно, было бы еще лучше производить биоразлагаемые полимеры, функционально идентичные сегодняшним полимерам, исключительно из биомассы (например, производить полиэтилен и полипропилен из этанола, изготовленного из сахарного тростника). В следующие несколько десятилетий должно появиться множество повседневных и необычных приложений для новых биотехнологических материалов – структур, выращенных организмами и дополненных синтетическими материалами (Meuysers и соавт., 2013), а также печатанных структур, которые будут вести себя, как живые клетки (Reiffel и соавт., 2013).

Пожалуй, лучшим примером старого материала с исключительно многообещающим будущим является литий. Этот мягкий белый металл используется керамической и стекольной промышленностью, в смазочных материалах, полимерах и фармацевтических препаратах, но в будущем его будут в основном использовать в батареях, особенно в перезаряжаемых блоках в портативных электронных устройствах (компьютерах, планшетах, мобильных телефонах), инструментах и транспорте (Goonan, 2012). Общемировое производство этого металла в 2010 году достигло 28 100 т, примерно 70 % из которых производятся в Чили и Австралии, и недостатка в разрабатываемых ресурсах не наблюдается (USGS, 2013). Отношение запасов к добыче лития в 2010 году составляло более 400 лет; более половины мировых ресурсов металла находится в Боливии, Салар де Уюни, (Friedman-Rudovsky, 2011).

Новые решения, как всегда, приносят с собой новые проблемы. Есть опасения по поводу потенциальной токсичности материалов на наноуровне: они могут неблагоприятным образом взаимодействовать с молекулами живых тканей или просто оказаться токсичными (Nel и соавт., 2006). Добыча лития, изготовление из него сотни миллионов новых батарей для будущих электрических машин, и затем утилизация батарей вызовут новые экологические проблемы (Tahil, 2006). Массовое производство биополимеров потребует значительных объемов растительного сырья, которые будут конкурировать с пищей и кормовыми культурами и культивирование которых может иметь много нежелательных экологических последствий, что хорошо известно из других опытов интенсивного земледелия.

Дальновидность, новые нормы и правила, а также личная заинтересованность производителей в более экологически безопасных продуктах определяют пока непонятную степень этих последствий. Гораздо более очевидно, что новые материалы вносят важный вклад в продолжающуюся тенденцию удельной дематериализации продуктов и услуг: Боинг-787 и BMW i3 – лишь первые известные применения композиционных материалов в транспорте; за ними последует многих других самолетов и автомобилей, поездов и кораблей. Снижение веса продуктов с помощью новых и традиционных материалов (много примеров такого снижения веса было приведено в предыдущем разделе) в сочетании с лучшей конструкцией и более умными системами контроля обеспечат более высокую производительность и лучшую функциональность устройств с меньшей массой. И, хотя многие описания роботов будущего, которые будут безошибочно ставить диагнозы и служить личными ассистентами, являются, скорее, попыткой выдать желаемое за реалии завтрашнего дня, нет сомнений, что многие услуги все-таки будут использовать гораздо меньшее количество материалов.

Впрочем, мы можем быть уверены в том, чего эти достижения с собой не принесут: их совокупный эффект не приведет ни к какой совокупной абсолютной дематериализации в мировом масштабе. Мы не встретили ни одного прогноза снижения глобального спроса ни на один основной материал, и даже самые пессимистичные исследователи предсказывают значительный рост потребления в период с 2010 по 2050 год. Например, самые скромные прогнозы МЭА на 2010–2050 годы приводят такие цифры: 2,4 миллиарда тонн стали, 95 миллионов тонн алюминия, 3,8 миллиарда тонн цемента и 800 тонн бумаги (МЭА, 2010): это увеличение потребления стали на 70 %, алюминия на 33 %, цемента на 15 %, а бумаги – на 200 %. Аналогичным

образом, даже самые скромные и умеренные сценарии роста предусматривают рост использования тройных удобрений в период с 2010 по 2050 год на 40–70 % (Tilman и соавт., 2011; Blanco, 2011). Замедление роста спроса на пластмассы (примерно с 3 % в недавнем прошлом до 2 %) приведет к росту производства полимеров более чем в 2 раза к 2050 году. Согласно более смелым прогнозам, производство цемента в 2050 году может составить 4,5 миллиарда тонн, стали – 2,8 миллиарда тонн, а бумаги – 1,1 миллиарда тонн (IEA, 2010).

Перспективы развития конкретных стран – совсем другая история. Беспрецедентное расширение нескольких ключевых материальных потоков в Китае после 1990 года не может поддерживаться больше двух поколений, и ожидается, что к 2050 году производство стали и цемента (а также добычи песка и камня, необходимых для производства цемента) опустятся значительно ниже уровня 2010 года, но производство пластиков, бумаги и удобрений вырастет. Таким образом, совокупный материальный поток Китая в 2050 году трудно предсказать, но в других развивающихся странах абсолютной дематериализации наблюдаться не будет. Наиболее быстрый прирост будет в тех странах, в которых по-прежнему низкий уровень благосостояния на душу населения сочетается с относительно быстрым ростом населения: Индия, Пакистан, Нигерия и Эфиопия – наиболее яркие примеры в этой обширной категории.

Если богатые страны, население которых снижается и быстро стареет, постараются удержать свой совокупный расход материала на одном уровне, то в некоторых категориях будут наблюдаться значительные снижения расхода материалов: это относится к Японии и многим странам Евросоюза, особенно к расходу строительных материалов и удобрений. В США, напротив, необходимость обеспечения растущего населения (к 2050 году население США по оценкам составит чуть более 400 млн человек, тогда как в 2010 году оно составило 310 миллионов) и ремонта разрушающейся инфраструктуры не позволяет нам говорить о каком-либо сокращении совокупного расхода материалов до 2050 года.

Абсолютный расход сырья и промышленная обработка вредных веществ от растущих потоков материалов оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду: конечно, если бы не было удельной дематериализации, то ситуация с выбросами в атмосферу, загрязнением вод и земель, неправильной утилизацией и токсичными отходами в национальном и мировом масштабе была бы еще хуже, но большим успехом было бы с помощью постоянной удельной дематериализации, сдерживаемого роста населения и улучшений защиты окружающей среды замедлить упадок или в некоторых конкретных случаях остановить рост и даже значительно снизить существующие показатели (так же, как, например, удалось добиться снижения общемировых выбросов SO_2 и прекращению использования свинца в потребительских товарах).

В течение последнего поколения дематериализация, выраженная в снижении потребления товаров или энергии на единицу ВВП, прочно укоренилась как в развитых, так и в развивающихся странах (Ausubel и Waggoner, 2008), и нет никаких причин, по которым ее темпы не должны поддерживаться и даже расти. Но, как уже подчеркивалось, эта удельная дематериализация не приводит к какому-либо значительному снижению совокупного потребления в мировом масштабе – верно,

как раз обратное, по крайней мере для многих ключевых видов топлива, сырья и готовых продуктов. И хотя дальнейший прогресс в электронике в принципе является благоприятным фактором, ему будет не под силу остановить волну совокупного потребления.

Продемонстрируем эти ограничения рядом интересных сравнений. В главе 5 (в разделе 5.2 об удельной дематериализации) был приведен список устройств, которые могут быть заменены одним iPhone. Марион Тупи (Туру, 2012) сделал следующий вывод из этого списка:

Другими словами, дематериализация – хорошая новость для тех, кого волнует видимое противоречие между ростом населения мира с одной стороны и обеспеченности мира природными ресурсами с другой. Хотя мнения о нехватке ресурсов в будущем расходятся, дематериализация позволит нашему виду наслаждаться материальным комфортом и в то же время разумно распоряжаться планетой. Это особенно важно с точки зрения людей в развивающихся странах, которые должны иметь возможность испытать материальный достаток в эпоху озабоченности экологическими проблемами.

Я привел весь абзац, поскольку это идеальный пример надежд, которые люди, влюбленные в электронные гаджеты, возлагают на способность экономики преобразовывать потребление в общем и служить агентом дематериализации в частности. Насколько этот вывод может быть неправильным, хорошо видно по материальным последствиям распространения смартфонов и других электронных устройств. Коммуникатор Nokia, выпущенный в 1996 году, был одним из первых смартфонов, и потребовалось 16 лет, чтобы число этих устройств превысило 1 млрд: это произошло в третьем квартале 2012 года (mobiThinking, 2013). Даже если (как указано в главе 5) предположить, что покупка каждого из этого миллиарда устройств устранила необходимость в часах, будильнике, маленьком радиоприемнике, диктофоне и цифровом фотоаппарате, чистые совокупные сбережения, связанные с распространением мобильных телефонов (около 400 г/телефон: 500 г – вес пяти устройств, которые заменяет телефон весом в 110 г), достигли бы 400 000 т (в основном алюминия, стекла и микропроцессоров) к концу 2012 года.

Однако это всего лишь самообман, чисто теоретическое построение, поскольку даже таких снижений спроса, а тем более производства в действительности не наблюдалось. В первом десятилетии XXI века мировые продажи часов, в частности, элитных моделей, продолжали расти на 2-4 % в год, а с 2000 по 2012 год мировые продажи цифровых камер превысили 1 млрд единиц, а гораздо более крупных ЖК-телевизоров – 1,1 миллиард единиц (Dash, 2012). Даже предположив, что средний ЖК-телевизор (с экраном диагональю 80 см) весит всего 10 кг, это количество требует более 10 миллионов тонн материалов – главным образом алюминия, стекла и микропроцессоров, что перечеркивает даже максимальную теоретическую экономию от продаж смартфонов.

Этот ряд сравнений можно продолжить: растут продажи не только часов, цифровых камер и ЖК-телевизоров, но и автомобилей, и предметов роскоши, многие из которых (частные самолеты и яхты) представляют собой наиболее концентрирован-

ные воплощения энергоемкости отдельных материалов. Следовательно, даже если бы смартфоны все-таки полностью заменили будильники, визитницы, диктофоны и камеры, материальную экономию от отсутствия спроса на эти товары по большей части перечеркнул бы рост спроса на те же ресурсы от алюминия и стекла до проводов и микропроцессоров.

Есть и другие примеры поразительных требований будущей дематериализации, которые можно сравнить с усилиями по дальнейшему расширению материального потребления. Премия Qualcomm Tricorder Z Prize в размере 10 миллионов долларов полагается тому, кто представит конструкцию портативного (максимальным весом в 2,3 кг) устройства, «способного определять основные показатели здоровья и диагностировать 15 заболеваний» (Qualcomm, 2013) – первый шаг к дематериализации повседневных врачебных приемов. Но в то же время, Matternet, Интернет материальных продуктов, «создает логистическую парадигму будущего при помощи сети беспилотных летательных аппаратов» (Matternet, 2013). Предполагается, что дроны будут перевозить товары (сначала лекарства и запчасти) в тех регионах мира, где нет всесезонных дорог – очевидно, что эта разработка обладает огромным потенциалом для повышения материального потребления. К чему в плане материального потребления приведут эти две противоборствующие разработки (если окажутся коммерчески успешными)?

6.4 Шансы на кардинальные изменения

Любой серьезный обзор материальных потребностей человечества в будущем должен учитывать, что сегодня все еще слишком много людей живут в условиях неприемлемой бедности, унижающей человеческое достоинство, которая обуславливает недоедание, неадекватное медицинское обслуживание, болезненность, неполное образование, изнурительную работу, недостаточный отдых, отсутствие минимального комфорта и короткую продолжительность жизни. Все эти люди – а в зависимости от конкретной категории этого короткого списка чуть выше это от сотен миллионов до нескольких миллиардов человек – должны потреблять больше материалов на душу населения, чтобы жить достойной жизнью. Однако здесь же появляются первые сложности: какая жизнь считается достойной? В какой степени достойная жизнь, в отличие от таких общепризнанных показателей качества жизни, как детская смертность, заболеваемость и продолжительность жизни, определяется потреблением материалов? Как включить в эту оценку нематериальные показатели качества образования или отдыха? Насколько важны субъективные индикаторы благосостояния, удовлетворенность жизнью, относительное состояние счастья?

И это еще не все. Какова фактическая связь между потреблением материалов и объективным и субъективным качеством жизни, когда удовлетворены основные потребности в пище, одежде, жилье и мобильности? Переход от материальной бедности к скромному материальному комфорту улучшит многое в жизни, но, очевидно, не до бесконечности. Но если это так, то где находится точка насыщения? Можно ли этот уровень вообще осмысленно измерить? Эти вопросы необходимо задавать, даже если на них нет легких ответов, главным образом из-за того, что существует

ситуация, прямо противоположная материальной нищете, описанной в начале этого раздела: слишком много людей живет в состоянии избытка материалов, но это не приводит к физически более высокому качеству жизни, чем у умеренных потребителей, и не делает их особенно счастливыми.

На самом фундаментальном уровне речь идет о самой природе современной экономики. Для всех, кроме небольшого числа экономистов (обеспокоенных экологией), основная цель состоит в том, чтобы количество продукции постоянно росло. И не просто росло: предпочтительные годовые темпы роста экономики – больше 2, а лучше 3 %. Это единственная модель, единственная парадигма и заповедь, поскольку экономисты, стоящие за рулем современной экономики, не могут представить себе систему, которая будет добровольно расти в очень медленном темпе или вообще не расти, а идея тщательно контролируемого спада кажется им вообще невообразимой. Очевидно, что стремление к бесконечному росту – неустойчивая стратегия (Binswanger, 2009), а опыт восстановления после 2008 года показал, какими беспомощными становятся современные экономики, как только их рост немного замедляется, останавливается или в них наблюдается небольшой спад: растет безработица, падает уровень экономической активности, увеличиваются неравенство доходов и бюджетный дефицит.

Впрочем, можно представить себе альтернативы, и свободомыслящие экономисты и экологи уже давно предлагают отказаться от привычного понимания энергоемкости и материалоемкости, неразрывно связанных с прогрессом, и перейти к медленнорастущей, а затем нерастущей экономике и постепенно перейти к контролируемому сокращению энергоемкости и материальных потоков. Причины такого перехода очевидны: фундаментальная несовместимость необходимости дальнейшего экономического роста со вторым законом термодинамики (Georgescu-Roegen, 1971, 1975). В соответствии с этой точкой зрения основной целью рационального общества является минимизация энтропии. Говоря простым языком названий последних книг по этому вопросу, мы должны перестать закидывать уголь в топку потерявшего управление поезда экономического роста (Czech, 2000), противостоять потреблению (Princen и соавт., 2002), усвоить логику достаточности и порвать с «одноразовой культурой» (Slade, 2006).

Это требует создания нового общества, где, как только основные материальные потребности будут удовлетворены, чувство благополучия и удовлетворенности будет связано с вещами, который никак не коррелируют или совсем немного коррелируют с увеличением энергоемкости производств и расширением материального потребления. Идеальными кандидатами для этого сдвига представляются современные богатые страны: исследования, проведенные в США, Европе и Австралии пришли к выводу, что материализм негативно сказывается на удовлетворении жизнью, и погоня за богатством и благами, связанными с ним, приводит к уменьшению субъективного благополучия: Лиза Райан и Сузанне Дзюравец (Ryan и Dziurawiec, 2001) дают обзор исследований, проведенных до 2001 года, а Хаддерс и Пандалеаре (Hudders и Pandaleare, 2012) – более новых работ.

Эти факты легко подтверждаются доступными сегодня списками стран по уровню счастья и удовлетворения жизнью (Layard, 2005; White, 2006; Helliwell и соавт., 2012). Германия, самая богатая из стран с крупнейшей в Европе экономикой, впечат-

ляет уровнем материального достатка и потребления второстепенных товаров: частные дома выглядят основательно и ухоженно, немцы ездят на тяжелых автомобилях Audi, BMW и Mercedes без ограничения скорости по скоростным трассам – автобанам – (сознательно крайне расточительное мероприятие) и чаще других европейцев летают на дальние расстояния. Тем не менее, Германия находится на 43 месте по уровню счастья (Helliwell и Wang, 2012) – ниже Колумбии, Филиппин и Руанды, уровень благосостояния которых в разы меньше, чем в Германии.

Точно так же Япония, обладающая одной из крупнейших экономик в Азии, после Второй мировой войны оставила буддистскую простоту в своем стремлении к богатству: Хотя жилье в Японии довольно тесное, в этих маленьких домах и квартирах можно найти огромное количество предметов; дороги забиты автомобилями; в стране лучшая в мире система общественного транспорта, а ее жители постоянно путешествуют на большие расстояния, и тем не менее, в соответствии с индексом Уайта, у нее один из самых низких показателей удовлетворенности жизнью среди богатых стран (Япония находится на 90-м месте), меньше, чем у многих более бедных стран, в том числе Папуа Новой Гвинеи и Узбекистана. Если посмотреть на другие списки, ситуация не такая мрачная: по уровню средней удовлетворенности жизнью Япония занимает 41-е место, но и здесь она позади таких экономически отстающих стран, как Парагвай, Никарагуа и Туркменистан.

Где же эти довольно несчастные страны находятся на лестнице потребления? В то время как постоянное приобретение материальных благ не способствует счастью и удовлетворению, приводит ли это со временем к меньшему потреблению? Возможно, лишь относительно: в более долгосрочной перспективе не видно никаких значительных снижений потребления ни в Германии, ни во Франции – обладательницы второй крупнейшей экономики Европы и еще более несчастного населения. В течение пяти докризисных лет (с 2002 по 2007 год), по которым известна статистика прямого потребления материалов (Eurostat, 2013), общий расход материала в не очень счастливой Германии (номер 35, ниже Колумбии) и несчастной Франции (номер 62, ниже Аргентины и Монголии) увеличился на 5 и 6 % соответственно.

Сравнение счастливых и несчастных стран наводят на мысль об одном интересном отличии, которое ставит под сомнение связь ограничения материального потребления со счастьем. В период с 2002 по 2007 год Дания, Финляндия и Швеция – страны на вершине почти всех списков стран по удовлетворению жизнью/уровню счастья и которые при этом имеют такое же или даже более высокое качество жизни, чем Германия, Франция или Япония – увеличили свой расход материалов на 19, 16 и 20 % соответственно.

Неудивительно: как от любой зависимости, от привычки приобретать материальные блага не так просто избавиться – погоня за приобретениями может быть никак не связана с тем, какое место занимает страна в мировом рейтинге самых счастливых/удовлетворенных граждан. В ходе своего исследования изменений в материальном приобретении и желаниях Ричард Истерлин (Easterlin, 2003, стр. 1118-0 – 1118-1) пришел к выводу, что

по мере того, как люди приобретают предметы, которые кажутся им показателем высшего качества жизни (дом, автомобиль, телевизор), им больше

хочется приобретать другие предметы, которые ранее, возможно, и не рассматривались ими в таком качестве ... Этот вывод свидетельствует о том, что новые желания возникают только тогда, когда удовлетворены предыдущие, и, если судить по среднему количеству желаемых предметов, примерно в такой же степени.

Экономический спад 2008 и 2009 года повлиял на потребление во всех богатых странах, но придется ждать много лет, чтобы увидеть какие-либо явные тенденции – а пока можем только предполагать, что любое замедление роста (или спад) материального потребления основан на хроническом неудовлетворении жизнью и отсутствии счастья, либо что субъективное счастье не ведет к сокращению материального потребления. Тем не менее, даже явные признаки замедления роста материального спроса – это одно дело, а переход к значительно дематериализованной экономике – совсем другое. Уолтер Стэйхел (Stahel, 2011) пишет об экономике сферы услуг, «где успех измеряется в богатстве (капитале) и экономических выгодах от его использования» – в отличие от современной экономики, в которой успех зависит от производительности и обменной стоимости.

Его цель — «богатство без потребления ресурсов» – цель, которая, как он сам признает, мало интересна преобладающей сегодня экономике «реки», а я бы сказал, вообще всем кроме небольшого числа людей в любой стране с любым достатком. Другие исследователи предлагают «реверсию экономического роста» (Flipo и Schneider, 2008) для управления процветающей экономикой без роста (Victor, 2008; Jackson, 2009). Третьи утверждают, что начинать эти большие преобразования нужно именно сейчас, потому что быстро приближается «развязка экспонент» – конец экспоненциального роста материального потребления и ускорения роста долга (Morgan, 2010).

Некоторые уверены, что переход к новой парадигме не просто возможен (Jackson, 2009), но что в результате него «количество богатства, получаемое из одной единицы природных ресурсов, может вырасти в четыре раза». Таким образом, мы можем жить в два раза лучше, потребляя в два раза меньше (von Weizsacker и соавт., 1997, стр. xv). Последнее рассчитано на длительный срок (и, конечно, использует ВВП в качестве меры богатства – стандартный, но во многих отношениях ненадежный выбор), но, изучив действие мощных инерционных сил в истории, я понимаю, что мы не сможем и близко подойти к такой производительности в ближайшие 10-20 лет. Так какие практические шаги – которых не хватает, чтобы чудесным образом сдвинуть глобальную экономическую систему от реки растущих потоков энергии и материалов к циклу, созданному для управления стабильностью – могут быть приняты, сначала чтобы ограничить потребление материалов, а затем, чтобы начать движение к абсолютной дематериализации? Каков лучший путь к этой цели – через принуждение масс или просвещение единиц?

Конечно, в истории было множество примеров обществ, чьи правители держали население в материальной нищете, и это было не самое худшее, что можно было ожидать, ведь голод наносит неисправимо больший урон, чем отсутствие материальных благ. За примерами не нужно идти в далекое прошлое: за последние три поколения самыми тревожными из них стали маоистский Китай (и устроенный Мао

голод, от которого в период с 1959 по 1961 год погибло 30 миллионов человек) и продолжающееся сумасшествие в Северной Корее. Однако развитие современных обществ движется в другом направлении. Действительно, государства сегодня существуют в основном для того, чтобы поддерживать экономические, технические и законодательные основа общества и инфраструктуры массового потребления. Даже некогда многочисленные альтернативы, основанные на материальном ограничении или прямом обнищании – Советский Союз и коммунистический Китай – впоследствии с готовностью перешли к более активному потреблению (ключевое различие заключается в том, что в случае с Китаем партия не потеряла свой контроль).

Следовательно, крайне маловероятно, что скоро появится крупная экономика, лидеры которой будут обещать своим гражданам все меньше и меньше благ или по крайней мере столько благ, сколько есть. Конечно, всегда есть возможность, что личные интересы большого количества хорошо проинформированных индивидов объединятся для подрыва старой парадигмы, и что это сильно повлияет на материальное потребление. Я бы сказал здесь, что не стоит недооценивать привлекательность владения, приобретения и избыточного потребления. Без преувеличения материальные приобретения в современном обществе можно рассматривать просто как форму зависимого поведения, которое обычно ассоциируется с алкоголем, курением, наркотиками или азартными играми. Основное различие состоит в том, что это зависимое поведение получило еще более широкое распространение, пересекло все национальные и культурные барьеры и превратилась в непреодолимое глобальное явление.

По мере своего развития оно стало тесно связано с социально-классовым и статусным восприятием; оно открывает человеку возможность казаться тем, кем он не является, поощряет индивидуальное и семейное честолюбие; материальные приобретения стали инструментом желания, страсти и удовольствия, побуждающие людей потворствовать их обладателю. Не будет преувеличением представить в общем-то прозаический акт совершения покупок как выражение самоидентификации с целью отрицания безродности, отсутствия ролей и бюрократической рассудительности современной бюрократии, которая держит своих подданных в ловушке и ограничивает их свободу (Latimer, 2001).

Эти реалии значительно размыли, если не стерли, границы между необходимым и излишним потреблением; то, что вчера казалось недостижимым, сегодня стало необходимым. Они также превратили человеческие желания в непрерывный процесс сбора и выбрасывания по мере того, как массовое производство и потребление добились успеха в создании новой атмосферы эфемерности (Cooper, 2001). Преднамеренное устаревание стало ключевым фактором развития многих отраслей промышленности, производящих потребительские товары. Эта тенденция восходит к 1920 году, когда компания General Motors приняла решение выпускать новую модель ежегодно (Slade, 2006). Как несколько десятилетий назад отметил Анри Лефевр (Lefebvre, 1971), помимо устаревания продуктов есть еще устаревание потребностей.

Чтобы обеспечить бесконечность потребления, современное массовое производство заботится не только о повсеместном распространении товаров, но и о поддержании завораживающего изобилия и разнообразия, хотя это лишь поверхностное

разнообразии, за которым скрываются по существу одни и те же продукты в разной упаковке, продвигаемые по-разному. Питер Марш (Marsh, 2012) оценил мировое производство в 10 миллиардов различных продуктов ежегодно, и предположил, что их общее число (превышающее население мира) намного возрастет благодаря тенденции к массовой индивидуализации: сочетание САД и трехмерной печати позволит производителям создавать товары, идеально подстроенные под нужды конкретного потребителя. Если цены на такие товары опустятся достаточно низко и многие люди предпочтут приобретать персонализированные товары, что тогда произойдет с общим спросом на материалы?

Однако мы еще многое можем сделать – необязательно ждать, пока расход материала в богатых странах прижмут сокращение и старение населения и хроническая неудовлетворенность жизнью. Недостатка в эффективных мерах, которые мы можем предпринять, нет, однако основная проблема заключается в том, в каком масштабе они будут приниматься и поддерживаться производителями и потребителями в современном обществе. Пожалуй, самое очевидное, что можно сделать – это разрабатывать более долговечные товары. Нет никаких причин, по которым нельзя было бы разрабатывать автомобили и холодильники, срок службы которых составлял бы 20–25 лет (сейчас их средний срок службы – 10–12 лет, в то время как на авиалайнере при условии хорошего обслуживания можно безопасно летать в течение 30 лет). Точно так же можно удвоить срок службы электронных устройств.

С технической точки зрения это совсем не сложно, но конечные продукты будут стоить дороже, и придется поменять устоявшуюся за десятилетия привычку к частой смене моделей, конструкций и людей. Есть ли в Евросоюзе или США партия людей, которые с гордостью водят 17-летние автомобили? В индустрии электронных устройств, где вывод на рынок новых конструкций занимает месяцы, а не годы, а новая конструкция для некоторых людей стоит того, чтобы за несколько дней до выпуска вожделенного телефона вставать в очередь, чтобы получить его первыми, – идея долговечного мобильного телефона или ПК ведет к анафеме. Этот сдвиг не то чтобы совсем невозможен, но точно потребует времени.

Вариант, который позволит чаще менять модели и обеспечит полную переработку продукта по окончании срока его службы – не продавать крупные товары промышленного производства, а сдавать их в аренду на длительный срок, а затем возвращать производителям для демонтажа и повторного использования: этот подход можно применять к разным видам продуктов от компьютеров до автомобильных шин и от холодильников до кондиционеров. Варианты, направленные на повышение интенсивности использования продукции – еще один похожий способ решить растущую проблему неиспользуемых мощностей многих продуктов. Именно лизинг, а не владение, сегодня более популярен при осуществлении таких дорогостоящих операций, как использование морских буровых установок и транспортировка крупных объектов специальными кораблями и грузовыми самолетами; к 2012 году более трети всех авиалайнеров также брались в аренду.

Лизинг можно использовать для снижения растущего количества неиспользуемых мощностей различных потребительских продуктов от автомобилей и газонокосилок до специальных инструментов. Эти новые концепции аренды вещей – со-

вместного потребления, долевого владения и социального обмена – не сводятся к машинам и инструментам; их можно распространить на дома, путешествия и многие услуги (McFedries, 2012). Новые механизмы аренды и приема отработавших вещей на утилизацию, а в некоторых случаях даже на совершенствование, можно применять к текстилю, коврам и матрасам (Braungart, 2013). В то же время услуги аренды редко используемых инструментов и приборов существуют уже многие десятилетия, то же самое есть для автомобилей (с гарантированным возвращением автомобиля после согласованного периода) и мест отдыха (таймшеры на поочередное использование курортных квартир) – однако такие способы использования товаров занимают только очень небольшие доли их рынков. Для многих людей сама идея делить с кем-то свои драгоценные автомобили или инструменты немислима.

Очевидно, что доминирующая модель экономики – бесконечный рост – основана на глубоком желании человека владеть материальным имуществом, и с учетом глобального распределения богатства, рост потребления не закончится еще долго. Как подтверждает Ричард Истерлин (2003), потребители в богатых странах продолжают находить новые объекты желания. Кроссоверы – автомобили, содержащие 2-3 т металла, пластика, стекла и резины – были самым вожделенным объектом потребления за последнюю четверть века. Другие товары, с недавнего времени пользующиеся популярностью – домашние тренажеры, широкоформатные телевизоры и уличная мебель для веранды или террасы. Тренажеры весят десятки и сотни килограммов каждый (вместе с упаковкой вес домашнего набора тренажеров Bowflex Ultimate Home Gym – 239 кг), телевизор высокого разрешения с диагональю 150 см весит 26 кг, уличная мебель развилась от простых стульев из пластика или ротанга до больших обеденных столов и полноразмерных диванов, не говоря уж о грилях для барбекю, на которых можно готовить еду для десятков людей.

Наибольшая растущая волна материального потребления сейчас захватывает сотни миллионов обеспеченных людей в городах Азии и Латинской Америке (и – в меньшей степени – в Африке), чьи часто безвкусные попытки продемонстрировать всем свое благосостояние превосходят многие примеры подобного поведения в Европе и Северной Америке (Kamdar, 2011; People's Daily, 2013). Структура потребления китайских нуворишей кажется жалкой копией худших примеров распоряжения богатством в Америке: поддельные особняки в закрытых поселках, обязательно большие кроссоверы (Pierson, 2012) и одержимое коллекционирование предметов роскоши от швейцарских часов до индивидуально спроектированных яхт (KPMG China, 2013).

Прямо за этой волной уже проглядывается намного более крупный поток потребления, который поднимет несколько миллиардов людей в Азии и Латинской Америке, едва выживающих в деревне, на уровень зарождающегося благосостояния в растущих городах: подавляющее большинство этих материальных расходов будет направлено на повышение уровня жизни этих людей, но при этом будет расти и доля их легкомысленного потребления. За ней последует другая волна, которая затронет и население Африки, а к тому времени, как массовое потребление на этом континенте начнет расти, его население составит уже 2 миллиарда людей (в 2010 году их было всего 1 миллиард). Из цифр становится ясно: в 2013 году, возможно, около миллиарда человек являются (по разумным оценкам) достаточно богатыми,

еще полмиллиарда приближаются к этому уровню – но по-прежнему остается более 5 миллиардов людей, ждущих своей очереди на эскалаторе потребления.

По сравнению с оценками потенциального спроса все прошлые показатели кажутся незначительными; это лучше всего показывает сравнение средних показателей числа автомобилей. В богатых странах на удовлетворение потребности понадобилось более 500 автомобилей на 1000 человек (в 2010 году в США этот показатель составил почти 800, а в Японии – 600); в Бразилии в этом году было 300 автомобилей на 1000 человек, в Китае – менее 100, в Индии – примерно 20. Даже если в странах вне Северной Америки, Европы, Австралии и Японии потребность удовлетворится всего лишь третья японских показателей (примерно 200 автомобилей на 1000 человек), то придется выпустить более миллиарда автомобилей – то есть более чем в два раза больше, чем все автомобили, используемые в 2012 году (1,1 млрд). То же самое относится к холодильникам, телевизорам, кондиционерам, мебели и т. д.

Итак, массовое потребление материалов будет продолжаться, а пропорции материалов, необходимых для обеспечения достойного качества жизни, и материалов, которые вскоре после производства продуктов отправятся на свалку, будут меняться; при этом все используемые материалы потребуют для своей переработки невозполнимых природных ресурсов, а также значительных затрат энергии (в том числе на ставшую повседневной трансконтинентальную транспортировку), что приведет к загрязнению окружающей среды. Умерить и, в конечном счете, сократить эту глобальную волну массового потребления, взывая к здравому смыслу – подчеркивая невозможность сохранения существующей экономики, поднимая вопрос влияния растущего потребления на окружающую среду, проповедуя ответственность за сохранение природных ресурсов перед будущими поколениями или расхваливая преимущества этого ограничения в плане безопасности и экономии средств – это, по-прежнему, сизифов труд.

Сознательный личный выбор ограничения материального потребления – отказ от некоторых благ, ограничение своих желаний и переход к минимализму – больше похож на сознательную умеренность в питании. Очень немногие люди (менее 1 %) готовы придерживаться веганства - строгой формы вегетарианства, которая не допускает даже потребления молочных продуктов и яиц; и даже менее ограничивающие формы вегетарианства, которые я называю «вегетарианством через дефис» (лакто-, лактоово- и даже лакто-ово-песко-вегетарианство (допускается употребление молока, молока и яиц, молока, яиц и рыбы соответственно)), практикуются лишь несколькими процентами населения Запада (Smil, 2013). Точно так же будет с добровольным ограничением материальных потребностей.

Михир Камдар (Kamdar, 2011, стр. 17), описывая наслаждение изобилием среди индийских нуворишей, писал: «идея довольствоваться меньшим добровольно может понравиться только тем, у кого достаточно благ, чтобы сделать выбор иметь меньше». Однако это желание упростить жизнь среди материального изобилия обычно выражается в часто символическом отказе от нескольких потребностей и привычек, что не оказывает почти никакого влияния на общий спрос на материалы. Возможно, чтобы значительно подавить потребительский спрос и изменить «экономику реки», нам нужны сильные внешние стимулы: два из них уже есть и уже беспокоят цело-

вечество, однако пока не воспринимаются как достаточно серьезная угроза, чтобы прибегать к быстрым и глубоким изменениям.

После нескольких десятилетий относительно быстрого подъема температуры глобальное потепление приостановилось в период с 2000 по 2010 год (Guemas и соавт., 2013). Если этот застой продолжаться в течение еще десяти лет, весьма маловероятно, что крупные страны мира примут какие-либо радикальные меры по снижению выбросов парниковых газов (Киотский, Балийский и Копенгагенский договор оказались неэффективными и почти ничего не сделали для их ограничения). Однако, если выраженное повышение температуры на планете повторится и даже, более того, произойдет скачок температуры, то, скорее всего, будут приняты меры по удельной дематериализации (и декарбонизации) глобальной экономики и сокращению мирового спроса на материалы.

Другим решающим и непредсказуемым событием будет беспрецедентный экономический кризис, последствия которого окажутся гораздо шире и гораздо глубже, чем последствия спада, который начался в 2008 году, и конец которого для многих стран пока еще не предвидится. Возможно, лучший способ представить себе это – понаблюдать за поведением мировой экономики в течение длительного периода времени, которое похоже на поведение японской экономики с 1990 года: слабое развитие или стагнация в сочетании с дефляцией и бесконечным дефицитом бюджета. А ведь еще и другие кризисы, и катастрофы, которые могут привести к остановке роста потребления материалов или отбросить его на многие поколения назад (Smil, 2010).

К двум из этих постоянных возможностей – глобальной пандемии и столкновению Земли с астероидом – в последние годы, наконец, присмотрелись повнимательнее из-за эпидемий SARS, H1N1 и относительно близкого к Земле прохождения нескольких астероидов, а также впечатляющего случая падения Челябинского метеорита в феврале 2013 года. Новая пандемия даже с такой же смертностью, как в 1918-1919 году, приведет к смерти как минимум 150 миллионов человек по всему миру, тогда как последствия столкновения даже с небольшим астероидом (диаметром 200-400 м) будут зависеть от того, где оно произошло.

Атмосферные изменения (длительное похолодание, вызванное попаданием большого количества пыли в атмосферу) были бы гораздо больше, если бы астероид упал на землю, и экономические последствия, очевидно, будут более серьезными, если он упадет в Западной Европе или Восточном Китае, чем если он упадет в Восточной Африке или канадской Арктике. Однако современные общества, несмотря на значительный уровень доступных научных знаний, слишком мало думают о немислимых событиях и предпринимают слишком мало для того, чтобы повысить свой шанс справиться с маловероятными событиями, катастрофические последствия которых превзойдут все, что испытали люди за известную нам часть истории человечества.

Впрочем, в целом, озабоченность доступными запасами природных ресурсов на Земле и способностью биосферы справиться с последствиями их массового извлечения и использования в последние 50 лет возросла. Обеспокоенность в 1960-х годах породила научные исследования в 1970-х и принятие систематических мер в 1980-х, и с тех пор наблюдается постоянный поток новых исследований и отчетов

об изменении окружающей среды, истощении природных ресурсов, разрушении разнообразия живой природы и конкретных проблем водоснабжения, токсического загрязнения, эрозии почв, обезлесения и закисления океана. Но лишь очень немногие из этих исследований привели к принятию решительных и эффективных мер.

Самым лучшим достижением был, вероятно, глобальный запрет на использование хлорфторуглеродов, выбросы которых были причастны к разрушению озонового слоя; были и другие заметные улучшения – извлечение свинца из бензина и абсолютное сокращение выбросов SO_2 в мировом масштабе, широкое распространение по крайней мере первичной обработки воды в городах и, конечно же, все эти существенные сокращения энергоемкости всех основных промышленных изделий, описанных в этой книге, и связанное с ними снижение содержания веществ, загрязняющих воду и атмосферу, на единицу продукции во всех основных материалах – стали и цемента, аммиаке и стекле.

Однако подчеркну напоследок основную мысль: все эти впечатляющие достижения удельной дематериализации не привели ни к какому абсолютному снижению потребностей в материалах в мировом масштабе, а без учета только что описанных нами возможных катастроф, разрыв между теми, у которых все есть (в 2013 году примерно 1,5 миллиарда человек) и теми, у которых нет (в 2013 году – 5,5 миллиарда человек) настолько огромен, что достижение материально необеспеченными 4/5 населения мира даже трети среднего качества жизни в богатых странах, требует еще много поколений роста совокупного потребления материалов. Претенциозный прогноз даже показал бы, сколько конкретно поколений будет расти материальное потребление, но разумнее всего сомневаться в этом показателе, поскольку он складывается из сложного взаимодействия динамики роста населения, человеческих желаний и мировоззрения, экономического роста и цен на товары, технического прогресса, международных отношений, и изменений в мировой экологии.

Именно эти факторы определяют, насколько долго человечество может поддерживать явно неустойчивую «экономику реки». В настоящий момент еще ничего не предрешено, и нетрудно представить себе как рациональное будущее с ограниченным потреблением энергии и уровнем использования материалов, направленным на оптимизацию уровня жизни неизменного или даже медленно снижающегося количества людей, так и бессистемную погоню за энергией и материалами, которая по большей части приводит к безответственному потреблению с огромными потерями, углубляет мировой разрыв между населением с разным уровнем жизни и ослабляет базовые функции биосферы – единственное незаменимое основание любой цивилизации.

Будем надеяться, что человеческая находчивость (применение которой в последние два века достойно восхищения) и приспособляемость (которая, к сожалению, применялась не для предотвращения ожидаемых кризисов, а уже после того, как они наступили) рано или поздно поведут нас по первому пути. Но даже в этом случае изменение использования материалов человечеством будет постепенным и сложным процессом, исход которого нам неизвестен.

Приложение А:

Единицы и кратные единицы

Единицы, использованные в тексте

а	ар (единица площади, 10 x 10 м)
°С	градус Цельсия (единица температуры)
г	грамм (единица массы)
м	метр (единица длины)
Па	Паскаль (единица давления)
т	тонна (1000 кг)

Кратные единицы

Префикс	Сокращение	Научная нотация
дека	да	10 ¹
гекто	г	10 ²
кило	к	10 ³
мега	М	10 ⁶
гига	Г	10 ⁹
тера	Т	10 ¹²
пета	П	10 ¹⁵
экса	Э	10 ¹⁸
зетта	З	10 ²¹
иотта	И	10 ²⁴

Дольные единицы

Префикс	Сокращение	Научная нотация
деци	д	10^{-1}
санتي	с	10^{-2}
милли	м	10^{-3}
микро	мк	10^{-6}
нано	н	10^{-9}

Приложение В: Производство материалов, ВВП и население США, 1900–2005 гг.

	Всего	Строительные материалы	Древесина	Металлы	ВВП	Население
1900	144	55	60,3	10,3	422,8	76,0
1910	271	125	78,8	23,1	533,8	92,0
1920	277	115	67,2	30,6	687,7	105,7
1930	425	255	49,5	31,2	892,8	122,8
1940	519	319	48,7	45,6	1166,9	131,7
1950	851	501	56,2	77,9	2006,0	150,7
1960	1540	1120	49,1	77,7	2830,9	179,3
1970	2110	1530	60,2	98,4	4269,9	203,2
1980	2140	1500	58,8	97,8	5009,0	226,6
1990	2540	1840	77,9	100,8	8033,9	248,7
2000	3400	2560	82,3	143,8	11226,0	281,4
2005	3720	2850	91,4	137,8	12623,0	296,5

Значения потоков материалов даны в мегатоннах (Matos, 2009); годовой ВВП — в миллиардах долларов с поправкой на инфляцию (2005) (<http://www.measuringworth.com/usgdp/>); численность населения (за исключением 2005 года) дана по результатам переписи в миллионах человек (USCB, 2012).

Приложение С: Мировое население, экономический продукт, производство продовольствия, основных материалов и топлива, 1900–2010 гг.

	1900	1950	2000	2010
Население (млрд)	1,6	2,5	6,1	6,9
Эконом. продукт (1990 трлн долл.)	1,9	5,3	36,7	72,1
Продовольственные и кормовые культуры (Мт)	410	790	2850	3430
Биоматериалы				
Круглый лес (Гм ³)	1,3	1,7	3,4	3,4
Бумага (Мт)	17,0	43,7	324,0	394,0
Хлопок (Мт)	4,0	6,6	18,5	23,7
Металлы				
Сталь (Мт)	28,3	189,0	850,0	1440,0
Алюминий (Мт)	-	1,5	24,3	41,2
Медь (Мт)	0,5	2,4	13,2	16,1
Цемент (Мт)	13	133	1660	3260
Пластмассы (Мт)	-	1,5	200,0	265,0
Аммиак (Мт (норм))	-	4,8	108,0	131,0
Топливо				
Уголь (Мт)	825	1815	4693	7273

Сырая нефть (Мт)	21	537	3611	3913
Природный газ (Гм ³)	7	197	2179	2881

Население: (NEAA, 2013); экономический продукт: (Maddison, 2007), (IMF, 2013); продовольственные и кормовые культуры: (Smil, 2013); биоматериалы: (FAO, 2013); металлы, цемент и аммиак: (Kelly, Matos, 2013); пластмассы: (Europe Plastics, 2011); топливо: (Smil, 2010), (BP, 2013) и (NEAA, 2013).

Приложение D: Мировые энергозатраты на производство основных материалов в 2010 г.

Материал	Произведено ^a	Энергоемкость ^b	Совокупные энергозатраты
	(Мт)	(ГДж/т)	(ЭДж)
Сталь	1430	25	35,8
Алюминий	40,8	175	7,1
Хром	23,7	50	1,2
Медь	15,9	90	1,4
Марганец	13,9	50	0,7
Цинк	12	50	0,6
Цемент	3310	4	13,2
Стекло	56	7	0,4
Бумага	399	25	10,0
Пластмассы	265	80	21,2
Аммиак	59	40	6,3
Пластины из Si	90001	20000	0,18

^a (USGS, 2012), (NSG, 2011), (Takiguchi and Morita, 2011), (FAO, 2013).

^b (IEA, 2007), (Worrell и соавт., 2007), (Smil, 2008).

Приложение Е

Декарбонизация и обессеривание в глобальных поставках ископаемого топлива, 1900–2010

	Топливо (ЭДж)	Углерод (Гт С)	Углеродная емкость (кг С/ГДж)	Сера (Мт S)	Сероемкость (г S/ГДж)
1900	21,5	0,53	24,8	10,0	465
1950	72,5	1,63	22,5	29,1	401
2000	303,3	6,75	22,3	53,4	176
2010	437,1	9,14	20,9	51,5	118

Декарбонизация и обессеривание в общем снабжении первичной энергией (ОСПЭ), 1900–2010

	ОСПЭ (ЭДж)	Углерод (Гт С)	Углеродная емкость (кг С/ГДж)	Сера (Мт S)	Сероемкость (г S/ГДж)
1900	43,6	1,2	27,5	10,0	229
1950	100,7	2,5	24,8	29,1	289
2000	382,4	8,1	21,2	53,4	140
2010	544,0	10,5	19,3	51,5	95

Источники данных: ОСПЭ: (Smil, 2010) и (BP, 2013); углерод: (CDIAC, 2013); сера: (Smith и соавт., 2010) и (Klimont и соавт., 2013).

Список литературы

- AA (The Aluminum Association) (2003) *The Industry*, AA, Washington, DC.
- AA (2011) Auto Aluminum Usage Hits All-Time High, Expected to Aggressively Accelerate, New Survey of Automakers Says, <http://www.aluminum.org/AM/Template.cfm?Section=Home&TEMPLATE=/CM/ContentDisplay.cfm&CONTENTID=31938> (accessed 22 May 2013).
- AA (2012) U.S. Aluminum Beverage Can Recycling, <http://www.aluminum.org/Content/NavigationMenu/NewsStatistics/StatisticsReports/UsedBeverageCanRecyclingRate/UBCR RecyclingRate.pdf> (accessed 22 May 2013).
- AA (2013) The Infinitely Recyclable Aluminum Can, <http://www.aluminum.org/Content/NavigationMenu/TheIndustry/PackagingConsumerProductMarket/Can/default.htm> (accessed 22 May 2013).
- Abbott, R.T. and Dance, S.P. (2000) *Compendium of Seashells: A Color Guide to More Than 4,200 of the World's Marine Shells*, El Cason, CA: Odyssey Publications.
- Abe, S.S., Watanabe, Y., Onishi, T. *et al.* (2011) Nutrient storage in termite (*Macrotermes bellicosus*) mounds and the implications for nutrient dynamics in a tropical savanna Ultisol. *Soil Science and Plant Nutrition*, **57**: 786–795.
- Abeles, P.W. (1949) *The Principles and Practice of Prestressed Concrete*, Charles Lockwood, London.
- Abberson, A. (2003) *The History of Television, 1942 to 2000*, McFarland & Company, Jefferson, NC.
- Adam, J.-P. (1994) *Roman Building: Materials and Techniques*, Routledge, London.
- Adriaanse, A., Bringezu, S., Moriguchi, Y. *et al.* (1997) *Resource Flows: The Material Basis of Industrial Economies*, World Resources Institute, Washington, DC.
- Adshad, S.A.M. (1997) *Material Culture in Europe and China, 1400–1800*, Macmillan, London.
- Agrawal, G. (2010) *Fiber-Optic Communication Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Air Products (2013) <http://www.airproducts.com/> (accessed 22 May 2013).
- Aker Solution (2013) Statfjord B, <http://www.akersolutions.com/en/Global-menu/Projects/technology-segment/Engineering/Offshore-oil-and-gas-production-facilities1/Statfjord-B/> (accessed 22 May 2013).

- Aktas, C.B. and Bilec, M.M. (2012) Impact of lifetime on US residential building results. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **17**: 37–349.
- Alcoa (2012) Comparative Life Cycle Assessment of Aluminum and Steel Truck Wheels, http://www.alcoawheels.com/alcoawheels/north_america/en/pdf/Alcoa_Comparative_LCA_of_Truck_Wheels_with_CR_statement.pdf (accessed 19 June 2013).
- Allwood, J.M. and Cullen, J.M. (2012) *Sustainable Materials with Both Eyes Open*, UIT, Cambridge.
- Almond, J.K. (1981) A century of basic steel: Cleveland's place in successful removal of phosphorus from liquid iron in 1879, and development of basic converting in ensuing 100 years. *Ironmaking and Steelmaking*, **8**: 1–10.
- Almqvist, E. (2003) *History of Industrial Gases*, Springer, Berlin. Amato, I. (2013) Concrete solutions. *Nature*, **494**: 300–301.
- Ambrose, S.H. (1998) Late Pleistocene human population bottlenecks: volcanic winter, and the differentiation of modern humans. *Journal of Human Evolution*, **34**: 623–651.
- Anderson, R. and Anderson, R.C. (1926) *A Short History of the Sailing Ship*, Robert M. McBride, New York.
- Andrae, A.S.G. and Andersen, O. (2010) Life cycle assessments of consumer electronics – are they consistent? *International Journal of Life Cycle Assessment*, **15**: 827–836.
- APA (2013) Concrete Forming: Design/Construction Guide, <http://www.g-lumber.com/pdf/APA-Concrete-Formwork.pdf> (accessed 19 June 2013).
- Apple (2012) Apple Introduces iPhone 5, <http://www.apple.com/pr/library/2012/09/12Apple-Introduces-iPhone-5.html> (accessed 22 May 2013).
- ASCE (American Society of Civil Engineers) (2013) 2013 Report Card for America's Infrastructure, <http://www.infrastructurereportcard.org/a/#p/home> (accessed 22 May 2013).
- Atsushi, U. (1995) The riddle of Japan's quakeproof pagodas. *Japan Echo*, Spring: 70–77.
- Atterbury, P. (ed.) (1982) *The History of Porcelain*, Morrow, New York.
- Austin, P. (2010) Reducing Energy Consumption in Paper Making Using Advanced Process Control and Optimisation, <http://www.lcmp.eng.cam.ac.uk/wp-content/uploads/Reducing-Energy-Consumption-in-Paper-Making-using-APC-and-Optimization.pdf> (accessed 22 May 2013).
- Ausubel, J. (2003) *Decarbonization: The Next 100 Years*. Lecture at the 50th Anniversary Symposium of the Geology Foundation, April 25 2003, Jackson School of Geosciences, University of Texas, Austin, TX, <http://phe.rockefeller.edu/AustinDecarbonization/AustinDecarbonization.pdf> (accessed 22 May 2013).
- Ausubel, J.H. and Waggoner, P.E. (2008) Dematerialization: variety, caution, and persistence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**: 12774–12779.
- AWWS (American Water Works Service) (2004) Deteriorating Buried Infrastructure Management Challenges and Strategies, USEPA, Washington, DC.
- Ayres, R. (2008) The life-cycle of chlorine, Part I: chlorine production and the chlorine-mercury connection. *Journal of Industrial Ecology*, **1**: 81–94.
- Ayres, R.U., Kneese, A.V. and Allen, V. (1969) Production, consumption and externalities. *American Economic Review*, **59**: 282–297.

- Baekeland, L.H. (1909) Condensation product and method of making same. Specification of Letters Patent 942,809, Dec. 7, 1909, USPTO, Washington, DC.
- Bajpai, P. (2010) *Environmentally Friendly Production of Pulp and Paper*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.
- Ball Packaging Europe (2012) Light as a Feather, Tough as Ever, <http://www.ball-europe.com/businesscards/gb/687.html> (accessed 22 May 2013).
- Bandaranayake, S. (1974) *Sinhalese Monastic Architecture: The Vihāras of Anurādhapura*, E.J. Brill, Leiden.
- Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C. and Barlaz, M. (2009) Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **364**: 1985–1998.
- Barney, G.O. (ed.) (1980) *The Global 2000 Report to the President*, Council on Environmental Quality, Washington, DC.
- Barrett, W. (1990) World bullion flows, 1450–1800, in *The Rise of Merchant Empires: Long Distance Trade in the Early Modern World, 1350–1750* (ed J.D. Tracy), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 224–254.
- Barreveld, W.H. (1989) Rural Use of Lignocellulosic Residues. FAO, Rome.
- Barros, E., Pashani, B., Constantino, R. and Lavelle, P. (2002) Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. *Biology and Fertility of Soils*, **35**: 338–347.
- Beardsley, T.M. (2011) Peak phosphorus. *BioScience*, **61**: 91.
- Baumont, W.W. (1902 and 1906) *Motor Vehicles and Motors: Their Design Construction and Working by Steam Oil and Electricity*, Vol. 2: Archibald Constable & Company, Westminster.
- Beck, T.R. (2001) *Electrolytic Production of Aluminum*, Electrochemical Technology Corporation, Seattle, WA.
- de Beer, J., Worrell, E. and Blok, K. (1998) Future technologies for energy-efficient iron and steel making. *Annual Review of Energy and the Environment*, **23**: 123–205.
- Behrens, A., Giljum, S., Kovanda, J. and Niza, S. (2007) The material basis of the global economy. *Ecological Economics*, **64**: 444–453.
- Bell, I.L. (1884) *Principles of the Manufacture of Iron and Steel*, George Routledge & Sons, London.
- Bell, P. (2012) China: Ready for a New Era? International Cement Review (Mar 2012), <http://www.cemnet.com/Articles/story/149175/china-ready-for-a-new-era-.html> (accessed 22 May 2013).
- Berard, A. (ed.) (1991) *History, Science, Theology, and the Shroud*, Man in the Shroud Committee of Amarillo, Amarillo, TX.
- Berge, B. (2009) *The Ecology of Building Materials*, Elsevier, Amsterdam.
- Bernardini, O. and Galli, R. (1993) Dematerialization: long-term trends in the intensity of use of materials and energy. *Futures*, **25**: 431–448.
- Berry, R.S., Long, T.V. II, and Makino, H. (1975) An international comparison of polymers and their alternatives. *Energy Policy*, **3**: 144–155.
- Berry, B., Ritt, A., and Greissel, M. (1999) A Retrospective of Twentieth-Century Steel. Iron Age New Steel (Dec 1999).
- Bessemer, H. (1905) *Autobiography*, Offices of Engineering, London.

- Billington, D.P. (1989) *Robert Maillart's Bridges: The Art of Engineering*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Binczewski, G.J. (1995) The point of a monument: a history of the aluminum cap of the Washington Monument. *JOM*, **47**(11): 20–25.
- Binswanger, M. (2009) Is there a growth imperative in capitalist economies? A circular flow perspective. *Journal of Post Keynesian Economics*, **31**: 707–727.
- BIR (Bureau of International Recycling) (2011) Annual Report 2011, BIR, Brussels, <http://www.bir.org/assets/Documents/publications/brochures/2011-ARfinalE.pdf> (accessed 22 May 2013).
- BIR (2012) World Steel Recycling in Figures 2007–2011, BIR, Brussels, <http://www.bir.org/assets/Documents/publications/brochures/WorldSteelInFiguresIIIFINLoRes.pdf> (accessed 22 May 2013).
- Birch, A. (1967) *The Economic History of the British Iron and Steel Industry 1784–1879*, Cass, London.
- Birdsey, R.A. (1996) Carbon storage in United States forests, in *Forests and Global Change*, Vol. II (eds N. Sampson and D. Hair), American Forests, Washington, DC, pp. 1–25.
- Blanc, A., Holmes, L.L. and Harbottle, G. (1998) *Lutetian Limestones in the Paris Region: Petrographic and Compositional Examination*, Brookhaven National Laboratory, Brookhaven, NY.
- Blanco, M. (2011) Supply of and Access to Key Nutrients NPK for Fertilizers for Feeding the World in 2050. Agronomos ETSIAUPM, Madrid, http://eusoiils.jrc.ec.europa.eu/projects/NPK/Documents/Madrid_NPK_supply_report_FINAL_Blanco.pdf (accessed 22 May 2013).
- Boeckel, B. and Baumann, K.-H. (2008) Vertical and lateral variations in coccolithophore community structure across the subtropical frontal zone in the South Atlantic Ocean. *Marine Microcology*, **67**: 255–273.
- Boeing (2012) 747 Family, http://www.boeing.com/boeing/commercial/747family/747-8_facts.page (accessed 22 May 2013).
- Boesch, C. and Tomasello, M. (1998) Chimpanzee and human cultures. *Current Anthropology*, **39**: 591–614.
- Bolin, C.A. and Smith, S. (2011) Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. *Journal of Cleaner Production*, **19**: 620–629.
- Borchers, W. (1904) *Electric Smelting and Refining*, Charles Griffin and Company, London.
- Börjesson, P. and Gustavsson, L. (2000) Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from lifecycle and forest land-use perspectives. *Energy Policy*, **28**: 575–588.
- Bornehag, C.G. and Nanberg, E. (2010) Phthalate exposure and asthma in children. *International Journal of Andrology*, **33**: 333–345.
- Boskey, A.L. (2003) Biomineralization: an overview. *Connective Tissue Research*, **44** (Suppl. 1): 5–9.
- Boulding, K. (1970) *Economics as Science*, McGraw-Hill, New York.
- BP (British Petroleum) (2013) Statistical Review of World Energy, http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical

- _energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2012.pdf (accessed 22 May 2013).
- Braungart, M. (2013) Upcycle to eliminate waste. *Nature*, **494**: 174–175.
- Brice, G. (1752) *Description de La Ville de Paris, Et de Tout Ce Qu'elle Contient de Plus Remarquable*, Librairies Associés, Paris.
- Bringezu, S. and Schütz, H. (2001) *Total Material Requirement of the European Union*, European Environment Agency, Copenhagen.
- Broecker, W.S. (1970) A boundary condition on the evolution of atmospheric oxygen. *Journal of Geophysical Research*, **75**: 3553–3557.
- Broudy, E. (2000) *The Book of Looms: A History of the Handloom from Ancient Times to the Present*, University Press of New England, Lebanon, NH.
- Brown, K.S., Marean, C.W., Herries, A.I.R. *et al.* (2009) Fire as an engineering tool of early modern humans. *Science*, **325**: 859–862.
- Browne, M.A., Crump, P., Niven, S.J. *et al.* (2011) Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental Science and Technology*, **45**: 9175–9179.
- Brunetta, L. and Craig, C.L. (2010) *Spider Silk: Evolution and 400 Million Years of Spinning, Waiting, Snagging, and Mating*, Yale University Press, New Haven, CT.
- Brydson, J.A. (1975) *Plastic Materials*, Newnes-Butterworths, London.
- BTS (Bureau of Transportation Statistics) (2013) Passenger, http://www.rita.dot.gov/bts/data_and_statistics/by_subject/passenger.html (accessed 22 May 2013).
- Buckingham, D.A. (2006) *Steel Stocks in Use in Automobiles in the United States*, USGS, Denver, CO.
- Buehler, E. and Teal G.K. (1956) Process for producing semiconductive crystals of uniform resistivity. US Patent 2,768,914, Oct. 30, 1956, USPTO, Washington, DC.
- Burke, J. (2012) *Nest: The Art of Birds*, Allen & Unwin, Crows Nest, NSW.
- Campbell, C.J. (1997) *The Coming Oil Crisis*, Multi-Science Publishing and Petroconsultants, Brentwood.
- Canadian Wood Council (2004) *Wood-Frame Housing – A North American Marvel*. Ottawa: Canadian Wood Council, http://www.cwc.ca/documents/durability/BP5_WoodFramesAndEarthquakes.pdf (accessed 22 May 2013).
- Cathcart, R.B. (2011) Anthropoc rock: a brief history. *History of Geo- and Space Sciences*, **2**: 57–74.
- CARE (Carpet America Recovery Effort) (2012) CARE Annual Report 2011, http://www.carpetrecovery.org/pdf/annual_report/11_CARE-annual-rpt.pdf (accessed 22 May 2013).
- Carmona, M. and Camiller, P. (2002) *Hausmann: His Life and Times and the Making of Modern Paris*, Ivan R. Dee, Lanham, MD.
- Carothers, W.H. (1937) Linear condensation polymers. US Patent 2,071,250, Feb. 16, 1937, USPTO, Washington, DC.
- Cartwright, J., Cheng, J., Hagan, J *et al.* (2011) Assessing the Environmental Impacts of Industrial Laundering: Life Cycle Assessment of Polyester/Cotton Shirts, Donald Bren School of Environmental Science and Management, Santa Barbara, CA, http://www.bren.ucsb.edu/research/documents/missionlinen_report.pdf (accessed 22 May 2013).

- CCC (Canadian Chamber of Commerce) (2012) Canada's Rare Earth Deposits Can Offer a Substantial Competitive Advantage, <http://www.chamber.ca/images/uploads/Reports/2012/201204RareEarthElements.pdf> (accessed 22 May 2013).
- CDIAC (Carbon Dioxide Information Center) (2013) Fossil-Fuel CO₂ Emissions, http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html (accessed 22 May 2013).
- Cement Association of Canada (2006) A Life Cycle Perspective on Concrete and Asphalt Roadways: Embodied Primary Energy and Global Warming Potential, <http://www.cement.ca/images/stories/athena%20report%20Feb.%202%202007.pdf> (accessed 22 May 2013).
- Chang, A., Pashikanti, K. and Liu, Y.A. (2012) *Refinery Engineering*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim.
- Chapman, P.F., Leach, G. and Slessor, M. (1974) The energy cost of fuels. *Energy Policy*, **2**: 231–243.
- Charette, R.N. (2009) This Car Runs on Code. *IEEE Spectrum*, <http://spectrum.ieee.org/green-tech/advanced-cars/this-car-runs-on-code/0> (accessed 22 May 2013).
- Cherry, C.R. and Gottesfeld, P. (2009) Plans to distribute the next billion computers by 2015 create lead pollution risk. *Journal of Cleaner Production*, **17**: 1620–1628.
- China Daily (2011) China to Check Overcapacity of Flat Glass Production. *China Daily* (Oct 5, 2011), http://www.chinadaily.com.cn/business/2011-05/10/content_12480549.htm (accessed 19 June 2013).
- Clark, D. (2011) Peak Stuff: The Data. *The Guardian* (Nov 1, 2011), <http://www.theguardian.com/environment/blog/2011/nov/01/peak-stuff-consumption-data>.
- CMI (Can Manufacturers Institute) (2012) Aluminum Beverage Cans, <http://www.cancentral.com/pdf/AluminumBeverageCanFacts.pdf> (accessed 22 May 2013).
- CMI (2013) Steel Food Cans, <http://www.cancentral.com/pdf/SteelCanFoodFacts.pdf> (accessed 22 May 2013).
- Cobb, H.M. (2010) *The History of Stainless Steel*, ASM International, Materials Park, OH.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. and Galloway, T. (2011) Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, **62**: 2588–2597.
- Composites World (2006) Advanced Materials for Aircraft Interiors, <http://www.compositesworld.com/articles/advanced-materials-for-aircraft-interiors> (accessed 22 May 2013).
- Cooper, E. (2000) *Ten Thousand Years of Pottery*, British Museum, London.
- Cooper, R. (2001) Interpreting mass: collection/dispersion, in *The Consumption of Mass* (eds N. Lee and R. Munro), Blackwell Publishers, Oxford, pp. 16–43.
- Courland, R. (2011) *Concrete Planet*, Prometheus Books, New York.
- Cuenot, F. (2009) CO₂ emissions from new cars and vehicle weight in Europe; how the EU regulation could have been avoided and how to reach it? *Energy Policy*, **37**: 3832–3842.
- Cwalina, B. (2008) Biodeterioration of concrete. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, **4**: 133–140.
- Czech, B. (2000) *Shoveling Fuel for a Runaway Train: Errant Economists, Shameful Spenders, and a Plan to Stop Them All*, University of California Press, Berkeley, CA.

- Czochralski, J. (1918) Ein neues Verfahren zur Messung des Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle. *Zeitschrift der Physikalischen Chemie*, **92**: 219–221.
- Daigo, I., Igarashi, Y., Matsuno, Y. and Adachi, Y. (2009) Material stocks and flows accounting of copper and copper-based alloys in Japan. *Resources Conservation and Recycling*, **53**: 208–217.
- Daigo, I., Matsuno, Y. and Adachi, Y. (2010) Substance flow analysis of chromium and nickel in material flow of stainless steel in Japan. *Resources Conservation and Recycling*, **54**: 851–863.
- Daimler (2008) New Generation of 4-Cylinder Inline Engines, OM 651, http://vip.5053.com.cn/CarResource/B-%E5%A5%94%E9%A9%B0/%E5%85%A8%E9%83%A8%E8%BD%A6%E5%9E%8B/mediadb/mb_Acrobat/einf/204/einf_br204_cdi_OM651_en.pdf (accessed 19 June 2013).
- Daniel, G. (1980) Megalithic monuments. *Scientific American*, **263**(1), 78–90.
- Darwin, C.R. (1881) *The Formation of Vegetable Mould, Through the Action of Worms, With Observations on Their Habits*, John Murray, London.
- Das, S. (2011) Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **16**: 268–282.
- Dash, S. (2012) Large Size LCD Market Tracker, http://www.isuppli.com/Abstract/P28680_20130226081617.pdf (accessed 22 May 2013).
- Davidovits, J. (2002) *Ils ont bâti les Pyramides*, Jean-Cyrille Godefroy, Paris.
- Davidson, I. and McGrew, W.C. (2005) Stone tools and the uniqueness of human culture. *Journal of the Royal Anthropological Institute*, **11**: 793–817.
- Davis, S.C., Diegle, S.W. and Boundy, R.G. (2011) *Transportation Energy Data Book: Edition 30*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- Deffeyes, K.S. (2001) *Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Des Cars, J. (1988) *Hausmann, La Gloire du Second Empire*, Perrin, Paris.
- De Carvalho, C.S.M., Sales-Campos, C. and De Andrade, M.C.N. (2010) Mushrooms of the *Pleurotus* genus: a review of cultivation techniques. *Interciencia*, **35**: 177–182.
- Destination Oise (2013) The “Stone-Heritage Centre” in Saint-Maximin, <http://www.oisetourism.co.uk/Must-sees/Savoir-faire/The-stone-heritage-centre-in-Saint-Maximin/The-stone-heritage-centre-in-Saint-Maximin> (accessed 22 May 2013).
- Di Blasi, C., Branca, C. and A. Galgano. 2010. Biomass screening for the production of furfural via thermal decomposition. *Industrial and Engineering Chemistry Research* **49**: 2658-2671.
- Diderot, D. and D’Alembert, J.L.R. (1751–1777) *L’Encyclopedie ou Dictionnaire Raisonnable des Sciences des Arts et des Metiers*, Ave Approbation and Privilege du Roy, Paris.
- Diesel, R. (1913) *Die Entstehung des Dieselmotors*, Verlag von Julius Springer, Berlin.
- Doggett, M. (2010) Sustainability of the Global Copper Industry: Learning from the Past Three Decades, <http://www.amebc.ca/documents/roundup/Tech%20Session/Presentations/1505%20Doggett%20Mon.pdf> (accessed 22 May 2013).
- dotMobi (2013) Global Mobile Statistics 2013 Part A: Mobile Subscribers; Handset Market Share; Mobile Operators, <http://mobithinking.com/mobile-marketing-tools/latest-mobile-stats/a#subscribers> (accessed 23 May 2013).

- Duffar, T. (ed.) (2010) *Crystal Growth Processes Based on Capillarity: Czochralski, Floating Zone, Shaping and Crucible Techniques*, Wiley-Blackwell, Oxford.
- Duffy, C. (1985) *The Fortress in the Age of Vauban and Frederick the Great, 1660–1789*, Routledge & Kegan Paul, London.
- Dunn, B., Kamath, H. and J.-M. Tarascon. 2011. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science* **334**: 928–935.
- DuPont (2013) **DuPont Hytrel** → TPC-ET Thermoplastic Polyester Elastomer, http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/Products/Hytrel/Hytrel.html (accessed 23 May 2013).
- Durrer, R. (1948) Sauerstoff-frischen in gerlafingen. *Von Roll Werkzeitung*, **19**: 73–74.
- EAA (European Aluminium Association) (2012) Two Out of Three Aluminum Beverage Cans Recycled in Europe, http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/08/Press-Release-Alu-bevcans-recycling-2010final_16July2012.pdf (accessed 23 May 2013).
- EAA (2013) Aluminium Facts and Figures, <http://www.alueurope.eu/about-aluminium/facts-and-figures/> (accessed 23 May 2013).
- Easterlin, R.A. (2003) Explaining happiness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **100**: 1176–1183.
- EC (European Commission) (2009) LCA Tools, Services, Data and Studies, <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/download.vm> (accessed 23 May 2013).
- ecoATM (2013) Instant Cash for Phones and Other Electronics, <http://www.ecoatm.com/> (accessed 23 May 2013).
- Ecoinvent (2013) Swiss Center for Life Cycle inventories, <http://www.ecoinvent.ch/> (accessed 23 May 2013).
- Edinburgh Centre for Carbon Management (2006) Forestry Commission Scotland Greenhouse Gas Emissions Comparison Carbon benefits of Timber in Construction, [http://www.forestry.gov.uk/pdf/Carbonbenefitsoftimberinconstruction.pdf/\\$file/Carb-onbenefitsoftimberinconstruction.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/Carbonbenefitsoftimberinconstruction.pdf/$file/Carb-onbenefitsoftimberinconstruction.pdf) (accessed 23 May 2013).
- EEA (European Environmental Agency) (2013) Heating Degree Days, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/heating-degree-days-1> (accessed 23 May 2013).
- Ehrlich, P.R. and Holdren, J. (eds) (1988) *The Cassandra Conference: Resources and the Human Predicament*, Texas A&M University Press, College Station, TX.
- Elvidge, C.D., Tuttle, B.T., Sutton, P.C. *et al.* (2007) Global distribution and density of constructed impervious surfaces. *Sensors*, **7**: 1962–1979.
- EMCORE (2013) EMCORE Solar Panels Power the Orbital-Built LDCM Satellite, <http://investor.emcore.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=741286> (accessed 23 May 2013).
- Endler, J.A., Endler, L.C. and Doerr, N.R. 2010. Great bowerbirds create theaters with forced perspective when seen by their audience. *Current Biology* **20**: 1679–1684.
- Energetics (2000) Energy and Environmental Profile of the U.S. Chemical Industry, Energetics, Columbia, MD, http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/chemicals/pdfs/profile_chap1.pdf (accessed 23 May 2013).
- Engel, E. (1857) Die productions- und consumtionsverhältnisse des königreichs sachsen. *Zeitschrift des Statistischen Bureaus des Königlich-Sächsischen, Ministerium des Innern*, **8/9**: 1–54.

- EPN (Environmental Paper Network) (2007) Understanding Recycled Fiber, <http://www.greenpressinitiative.org/documents/recycledfiberfactsheet-EPN.pdf> (accessed 23 May 2013).
- EPRO (European Association of Plastics Recycling and Recovery Organisations) (2011) Plastic Packaging Statistics 2010, http://www.plasticseurope.org/documents/document/20111107101127-final_pe_factsfigures_uk2011_lr_041111.pdf (accessed 23 May 2013).
- Eriksson, P.-E. (2004) Comparative LCAs for Wood and Other Construction Methods, http://www.ewpa.com/Archive/2004/jun/Paper_032.pdf (accessed 23 May 2013).
- European Commission (2001) Economy-Wide Material Flow Accounts and Derived Indicators a Methodological Guide, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-34-00-536/EN/KS-34-00-536-EN.PDF (accessed 23 May 2013).
- Eurostat (2009) Economy Wide Material Flow Accounts: Compilation Guidelines for Reporting to the 2009 Eurostat Questionnaire Version 01 – June 2009, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environmental_accounts/documents/Eurostat%20MFA%20compilation%20guide%20for%202009%20reporting.pdf (accessed 23 May 2013).
- Eurostat (2012) In the EU27, Almost Half of Renewable Energy Comes from Wood and Wood Waste, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_PUBLIC/5-29112012-AP/EN/5-29112012-AP-EN.PDF (accessed 23 May 2013).
- Eurostat (2013) Material Flow Accounts, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Material_flow_accounts#Per_capita_levels (accessed 23 May 2013).
- FAO (Food and Agriculture Organization). (1990) Energy Conservation in the Mechanical Forest Industries, FAO, Rome, <http://www.fao.org/docrep/T0269E/T0269E00.htm> (accessed 23 May 2013).
- FAO (2011) World Statistical Compendium for Raw Hides and Skins, Leather and Leather Footwear 1992–2011, FAO, Rome.
- FAO (2013) FAOSTAT, <http://faostat.fao.org/site/291/default.aspx> (accessed 23 May 2013).
- Felton, N. (2008) Consumption Spreads Faster Today. *New York Times* (Feb 10, 2008), http://www.nytimes.com/imagepages/2008/02/10/opinion/10op_graphic_ready.html (accessed 19 June 2013).
- Fernandes, S.D., Trautmann, N.M., Streets, D.G. *et al.* (2007) Global biofuel use, 1850–2000. *Global Biogeochemical Cycles*, **21**: GB2019. doi: 10.1029/2006GB002836
- Fernández, E., Boyd, P., Holligan, P.M. and Harbour, D.S. (1993) Production of organic and inorganic carbon by a large-scale coccolithophore bloom in the northeast Atlantic Ocean. *Marine Ecology-Progress Series*, **97**: 271–285.
- Fernández-González, F. (2006) *Ship Structures under Sail and under Gunfire*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, http://oa.upm.es/1520/1/PONEN_FRANCISCO_FERNANDEZ_GONZALEZ_01.pdf (accessed 23 May 2013).
- Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Giljum, S. *et al.* (2011) Methodology and indicators of economy-wide material flow accounting. *Journal of Industrial Ecology*, **15**: 855–876.
- Fitchen, J. (1961) *The Construction of Gothic Cathedrals: A Study of Medieval Vault Erection*, The University of Chicago Press, Chicago.

- Fleming, P.A. and Loveridge, J.P. (2003) Miombo woodland termite mounds: resource islands for small vertebrates? *Journal of Zoology, London*, **259**: 161–168.
- Flipo, F. and Schneider, F. (eds) (2008) Proceedings of the 1st International Conference on Economic De-Growth for Ecological Sustainability and Social Equity, <http://events.it-sudparis.eu/degrowthconference/appe/Degrowth%20Conference%20%20Proceedings.pdf> (accessed 23 May 2013).
- FLSmith (2011) Rotary Kilns for Cement Plants, <http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%20for%20kilns%20and%20firing/RotaryKilnsforcement-plants.ashx> (accessed 23 May 2013).
- Flynn, D.O. and Giráldez, A. (1995) Born with a “Silver Spoon”: the origin of world trade in 1571. *Journal of World History*, **6**: 202–221.
- Föll, H. (2000) *Electronic Materials*, University of Kiel, Kiel.
- Forest Products Laboratory (2010) *Wood Handbook*. Madison, WI: USDA, http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgr/fpl_gtr190.pdf (accessed 23 May 2013).
- Forth Bridges (2013) Forth Rail Bridge Facts and Figures, <http://archive.is/C09r> (accessed 3 July 2013).
- Frank, A.G. (1998) *ReOrient: Global Economy in the Asian Age*, University of California Press, Berkeley, CA.
- Franklin, A.D., Luisier, M., Han, S.-J. *et al.* (2012) Sub-10 nm carbon nanotube transistor. *Nano Letters*, **12**: 758–762.
- Franklin Associates (2006) Life Cycle Inventory of Container Systems for Wine, http://www.tetrapak.com/se/Documents/WineContainers_report%5B1%5D.pdf (accessed 23 May 2013).
- Franz, J.E. (1974) N-phosphonomethyl-glycine Phytotoxicant Compositions. US Patent 3,799,758, Mar. 26, 1974, USPTO, Washington, DC.
- Friedman-Rudovsky, J. (2011) Dreams of lithium empire. *Science*, **334**: 896–897.
- Frison, G.C. (1987) Prehistoric, plains-mountain, large-mammal, communal hunting strategies, in *The Evolution of Human Hunting* (eds M.H. Nitecki and D.V. Nitecki), Plenum Press, New York, pp. 177–223.
- Fruehan, R. (ed.) (1998) *The Making, Shaping and Treating of Steel Steelmaking and Refining Volume*, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA.
- Gao, F., Nie, Z.R. and Wang, Z.H. (2009) Greenhouse gas emissions and reduction potential of primary aluminum production in China. *Sciences in Chin Series E: Technological Sciences*, **52**: 2161–2166.
- Georgescu-Roegen, N. (1971) *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Georgescu-Roegen, N. (1975) Energy and economic myths. *Ecologist*, **5**: 164–174, 242–252.
- Geschichte-Club VÖEST (1991) *Geschichte der VÖEST: Rückblick auf die Wechselhaften Jahre des Grössten Österreichischen Industrieunternehmens*, Geschichte-Club VÖEST, Linz.
- GHK (2006) A Study to Examine the Benefits of the End of Life Vehicles Directive and the Costs and Benefits of a Revision of the 2015 Targets for Recycling, Re-Use and Recovery Under the ELV Directive, http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/study/final_report.pdf (accessed 23 May 2013).

- Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B. (2010) *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, New York.
- Giljum, S., C. Lutz, A. Jungnitz *et al.* 2008. *Global Dimensions of European Natural Resource Use*. Vienna: Sustainable Europe Research Institute, <http://seri.at/wp-content/uploads/2009/08/SERI-Working-Paper-7.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Ginley, D.S. and Cahen, D. (eds) (2012) *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ginsburg, M. (ed.) (1991) *The Illustrated History of Textiles*, Studio Editions, London.
- Global Environmental Facility (2012) Energy Efficiency Improvements in the Indian Brick Industry, <http://www.resourceefficientbricks.org/background.php> (accessed 23 May 2013).
- Glulam (2013) Why Glulam? <http://www.lilleheden.dk/uk/glulam.asp> (accessed 23 May 2013).
- Goeller, H.E. and Weinberg, A.M. (1976) The age of substitutability. *Science*, **191**: 683–689.
- Gold, B., Peirce, W.S., Rosegger, G. and Perlman, M. (1984) *Technological Progress and Industrial Leadership: The Growth of the U.S. Steel Industry, 1900–1970*, Lexington Books, Lexington, MA.
- Gong, X., Nie, Z., Wang, Z. *et al.* (2012) Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing. *Journal of Industrial Ecology*, **16**: 576–587.
- Goodman, S.H. (ed.) (1998) *Handbook of Thermoset Plastics*, Noyes Publications, Westwood, NJ.
- Goonan, T.G. (2012) Lithium Use in Batteries, http://pubs.usgs.gov/circ/1371/pdf/circ1371_508.pdf (accessed 23 May 2013).
- Gordon, R.B., Bertram, M. and Graedel, T.E. (2006) Metals stocks and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**: 1209–1214.
- Gould, J.L., Gould, C.G. and Grant, C. (2007) *Animal Architects: Building and the Evolution of Intelligence*, Basic Books, New York.
- Graedel, T.E. (2011) On the future availability of the energy metals. *Annual Review of Material Research*, **41**: 323–35.
- Graedel, T.E., Allwood, J.M., Birat, J.-P. *et al.* (2011) Recycling Rates of Metals, http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf (accessed 23 May 2013).
- Grantham, J. (2012) Be persuasive. Be brave. Be arrested (if necessary). *Nature*, **491**: 303.
- Green Delta (2013) OpenLCA Case Study of a Beer Bottle: Aluminium Can vs PET Bottle, Green Delta, Berlin, http://www.openlca.org/c/document_library/get_file?uuid=2f1207d9-2481-416b-8ba1-a59ef821e0d7&groupId=15473 (accessed 23 May 2013).
- Greenpeace (2013) Go PVC-Free, <http://www.greenpeace.org/usa/en/campaigns/toxics/go-pvc-free/> (accessed 23 May 2013).
- Grimes, S., Donaldson, J., and Gomez, G.C. (2008) Report on Environmental Benefits of Recycling, BIR, Brussels, http://www.bir.org/assets/Documents/publications/brochures/BIR_CO2_report.pdf (accessed 23 May 2013).

- Grotte, J. and Marrey, B. (2000) *Freyssinet: la Précontrainte et l'Europe, 1930–1945*, Éditions du Linteau, Paris.
- GSM Arena (2013) Mobile Phone Evolution: Story of Shapes and Sizes, http://www.gsmarena.com/mobile_phone-evolution-review-493.php (accessed 23 May 2013).
- Guemas, V., Doblas-Reyes, F.J., Andreu-Burillo, I. and Asif, M. (2013) Retrospective prediction of the global warming slowdown in the past decade. *Nature Climate Change*. doi: 10.1038/nclimate1863
- Gunston, B. (1986) *World Encyclopedia of Aero Engines*, Patrick Stephens, Wellingborough.
- Gypsum Association (2013) Gypsum and Sustainability, <http://www.gypsumsustainability.org/recycled.html> (accessed 23 May 2013).
- Haberl, H., Weisz, H., Amann, C. *et al.* (2006) The energetic metabolism of the European Union and the United States. *Journal of Industrial Ecology*, **10**: 151–171.
- Habu, J. (2004) *Ancient Jomon of Japan*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Hahn, P.O. (2001) The 300 mm silicon wafer – a cost an technology challenge. *Micro-electronic Engineering*, **56**: 3–13.
- Hall, E.C. (1996) *Journey to the Moon: The History of the Apollo Guidance Computer*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, DC.
- Hansell, M.H. (2007) *Built by Animals: The Natural History of Animal Architecture*, Oxford University Press, Oxford.
- Harpending, H.C., Batzer, M.A., Gurven, M. *et al.* (1998) Genetic traces of ancient demography. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **95**: 1961–1967.
- Harper, D. (1992) *Eutrophication of Freshwaters: Principles, Problems and Restoration*, Springer-Verlag, New York.
- Hasanbeigi, A., Price, L., Aden, N., *et al.* 2012. *A Comparison of Iron and Steel Production Energy Intensity in China and the U.S.* Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory http://china.lbl.gov/sites/china.lbl.gov/files/US_China_Steel_Comparison_Report_EN_19July2011.pdf (accessed 23 May 2013).
- Hasanbeigi, A., Price, L. and Lin, E. (2012) Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: a technical review. *Renewable & Sustainable Energy*, **16**: 6220–6238.
- Hatayama, H., Daigo, I., Matsuno, Y. and Adachi, Y. (2009) Assessment of the recycling of aluminum in Japan, the United States, Europe and China. *Materials Transactions*, **50**: 650–656.
- Hatayama, H., Daigo, I., Matsuno, Y. and Adachi, Y. (2010) Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics. *Environmental Science & Technology*, **44**: 6457–6463.
- Heal, D.W. (1975) Modern perspectives on the history of fuel economy in the iron and steel industry. *Ironmaking and Steelmaking*, **4**: 222–227.
- Hebbert, F.J. (1990) *Soldier of France: Sébastien le Prestre de Vauban, 1633–1707*, P. Lang, New York.
- Heinberg, R. (2010) *Peak Everything: Waking Up to the Century of Declines*, New Society Publishers, Gabriola Island, BC.

- Helliwell, R., Layard, R., and Sachs, J. (2012) World Happiness Report, [http://www.earth.columbia.edu/sitefiles/file/Sachs%20Writing/2012/World%20Happiness%20 Report.pdf](http://www.earth.columbia.edu/sitefiles/file/Sachs%20Writing/2012/World%20Happiness%20Report.pdf) (accessed 23 May 2013).
- Helliwell, R. and Wang, S. (2012) The state of world happiness, in *World Happiness Report* (eds R. Helliwell, R. Layard and J. Sachs), University of British Columbia, Vancouver, BC, pp. 10–57.
- Herman, A. (2012) *Freedom's Forge: How American Business Produced Victory in World War II*, Random House, New York.
- Herman, R., Ardekani, S.A. and Ausubel, J.H. (1990) Dematerialization. *Technological Forecasting and Social Change*, **37**: 333–347.
- Hermes, M.E. (1996) *Enough for One Lifetime: Wallace Carothers, Inventor of Nylon*, American Chemical Society and the Chemical Heritage Foundation, Washington, DC.
- Herold, A. (2003) Comparison of CO₂ Emission Factors for Fuels Used in Greenhouse Gas Inventories and Consequences for Monitoring and Reporting Under the EC Emissions Trading Scheme, http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACC_TechnPaper_2003_10_CO2_EF_fuels.pdf (accessed 23 May 2013).
- Hills, R.L. (1993) *Power from Steam: A History of the Stationary Steam Engine*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Hodgson, E. (1990) *Safer Insecticides Development and Use*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Hoffmann, O. (2012) Steel Lightweight Materials and Design for Environmental Friendly Mobility, ThyssenKrupp Steel Europe, http://www.industrialtechnologies2012.eu/sites/default/files/presentations_session/03_Oliver_Hoffmann.pdf (accessed 23 May 2013).
- Hogan, W.T. (1971) *Economic History of the Iron and Steel Industry in the United States*, Lexington Books, Lexington, MA.
- Hölldobler, B. and Wilson, E.O. (1990) *The Ants*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Holliday, R., Harper, T. and J. Heber. 2012. *Simply No Substitute?* Birmingham: Cientifica, <http://www.cientifica.com/wp-content/uploads/downloads/2012/09/Simply-No-Substitute.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Holt, J.A. and Easy, J.F. (1993) Numbers and biomass of mound-building termites (Isoptera) in a semiarid tropical woodland near Charters Towers, North Queensland, Australia. *Sociobiology*, **21**: 281–286.
- Hong, S., Candelone, J.P., Patterson, C.C. and Boutron, C.F. (1994) Greenland ice evidence of hemisphere lead pollution two millennia ago by Greek and Roman civilizations. *Science*, **265**: 1841–1843.
- Horn, R.E., Grant, T. and Verghese, K. (2009) *Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects*, CSIRO Publishing, Canberra.
- Hosford, W.F. and Duncan, J.L. (1994) The aluminum beverage can. *Scientific American*, **271**: 48–53.
- Hudders, L. and Pandelaere, M. (2012) The silver lining of materialism: the impact of luxury consumption on subjective well-being. *Journal of Happiness Studies*, **13**: 411–437.
- IAI (International Aluminium Institute) (2007) Life Cycle Assessment of Aluminium: Inventory Data for the Primary Aluminium Industry.

- IAI (2008) Transport and Aluminium, http://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2013/01/15/none_21 (accessed 23 May 2013).
- IAI (2012) 75% of All Aluminium Ever Produced is Currently Still in Productive Use, <http://recycling.world-aluminium.org/index.php?id=126> (accessed 23 May 2013).
- Ibeh, C. (2011) *Thermoplastic Materials: Properties, Manufacturing Methods, and Applications*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- IEA (2007) Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions. IEA, Paris, http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/tracking_emissions.pdf (accessed 23 May 2013).
- IEA (2010) Energy Technology Perspectives, <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/etp2010.pdf> (accessed 23 May 2013).
- IEA (2013) Statistics and Balances, IEA, Paris, <http://www.iea.org/stats/index.asp> (accessed 19 June 2013).
- IFIA (International Fertilizer Industry Association) (2013) Phosphorus and “Peak Phosphate”, <http://www.fertilizer.org/ifa/HomePage/SUSTAINABILITY/Phosphorus-peak-phosphate> (accessed 23 May 2013).
- IFIAS (International Federation of Institutes for Advanced Study) (1974) Energy Analysis Workshop on Methodology and Conventions, Stockholm, IFIAS.
- ILZSG (International Lead and Zinc Study Group) (2013) <http://www.ilzsg.org/static/home.aspx> (accessed 23 May 2013).
- IMF (2013) Data and Statistics, <http://www.imf.org/external/data.htm> (accessed 23 May 2013).
- ImpEE Project. 2013. *Plastic Waste in the UK*. University of Cambridge: The Cambridge-MIT Institute, <http://www-g.eng.cam.ac.uk/impee/topics/RecyclePlastics/files/Recycling%20Plastic%20v3%20PDF.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Inoue, T., Takematsu, Y., Hyodo, F. *et al.* (2001) The abundance and biomass of subterranean termites (Isoptera) in a dry evergreen forest of northeast Thailand. *Sociobiology*, **37**: 41–52.
- Intel (2011) From Sand to Silicon, http://download.intel.com/newsroom/kits/chipmaking/pdfs/Sand-to-Silicon_32nm-Version.pdf (accessed 23 May 2013).
- Intel (2012) The Intel Xeon Phi, <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/solution-briefs/high-performance-xeon-phi-coprocessor-brief-2.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Intel (2013) Intel Timeline: A History of Innovation, <http://www.intel.com/content/www/us/en/history/historic-timeline.html> (accessed 23 May 2013).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva.
- IRA (International Rubber Association) (2013) Natural Rubber Statistics, <http://www.intrubberassoc.org/v2/> (accessed 23 May 2013).
- IRGC (International Risk Governance Council) (2013) The Rebound Effect: Implications of Consumer Behaviour for Robust Energy Policies, IRGC, Lausanne, http://www.irgc.org/wp-content/uploads/2013/04/IRGC_ReboundEffect-FINAL.pdf (accessed 23 May 2013).
- ISO (International Organization for Standardization) ISO 14040:2006. (2006a) *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*, ISO,

- Geneva, http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=37456 (accessed 23 May 2013).
- ISO ISO 14044:2006. (2006b) *ISO 14044:2006 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines*, ISO, Geneva, http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=38498 (accessed 23 May 2013).
- Jackson, T. (2009) *Prosperity without Growth: Economics for Finite Planet*, Earthscan, London.
- Jacobs and IPST (Institute of Paper Science and Technology) (2006) *Pulp and Paper Industry: Energy Bandwidth Study*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- James, H. (2001) Use and production of solid sawn timber in the United States. *Forest Products Journal*, **51**: 23–28.
- Japan Paper Association (2013) Paper and Paperboard Production, <http://www.jpaa.gr.jp/en/industry/data02/> (accessed 23 May 2013).
- Jenkins, D. (ed.) (2003) *The Cambridge History of Western Textiles*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jevons, W.S. (1865) *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal Mines*, Macmillan, London.
- Jolliet, O., Saade, M., Shaked, S. and Jolliet, A. (2013) *Environmental Life Cycle Assessment*, Waterstones, London.
- Jönsson, Å., Tillman, A.M. and Svensson, T. (1997) Life cycle assessment of flooring materials: case study. *Building and Environment*, **32**: 245–255.
- Kahhat, R. and Williams, E. (2012) Materials flow analysis of e-waste: domestic flows and exports of used computers from the United States. *Resources Conservation and Recycling*, **67**: 67–74.
- Kalliala, E.M. and Nousiainen, P. (1999) Environmental profile of cotton and polyester-cotton fabrics. *AUTEX Research Journal*, **1**: 8–20.
- Kamdar, M. (2011) The pleasures of excess. *World Policy Journal*, **28**: 15–19.
- Karg, S. (2011) New research on the cultural history of the useful plant *Linum usitatissimum* L. (flax), a resource for food and textiles for 8,000 years. *Vegetation History and Archaeobotany*, **20**: 507–508.
- Kato, K., Murata, A. and Sakuta, K. (1997) Energy payback time and life-cycle CO₂ emission of residential PV power system with silicon PV module. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **6**: 105–115.
- Kauppi, P.E., Rautiainen, K.T., Korhonen, A. *et al.* (2010) Changing stock of biomass carbon in a boreal forest over 93 years. *Forest Ecology and Management*, **259**: 1239–1244.
- Kawaoka, K., Tsuda, A., Matsuoka, Y. *et al.* (2006) Latest Blast Furnace Relining Technology at Nippon Steel. Nippon Steel Technical Report 94, pp. 127–132.
- Kawashima, C. (1986) *Minka: Traditional Houses of Rural Japan*, Kodansha, Tokyo.
- Kaye, G.D. (2002) Using GIS to estimate the total volume of Mauna Loa Volcano, Hawai'i, 98th Annual Meeting, May 13-15, 2002, https://gsa.confex.com/gsa/2002CD/finalprogram/abstract_34712.htm (accessed 23 May 2013).
- Kelly T.D. and G. Matos. 2011. *Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States*, Data Series, Vol. **140**: Washington, DC: U.S. Geological Survey, <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/> (accessed 23 May 2013).

- Kelly, T.D. and Matos, G.R. (2013) Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States, <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/> (accessed 23 May 2013).
- Kenny, C. (2012) Paving Paradise. *Foreign Policy* (Jan/Feb 2012), pp. 31–32.
- Kenny, J.F., Barber, N.L., Hutson, S.S. *et al.* (2009) *Estimated Use of Water in the United States in 2005*, USGS, Washington, DC <http://www.epa.gov/otaq/fetrends.htm#report> (accessed 23 May 2013).
- Kermeli, K., Worrell, E. and E. Masanet. 2011. *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Concrete Industry*. Berkeley, CA: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Kerr, R.A. (2012) Is the world tottering on the precipice of peak gold? *Science*, **335**: 1038–1039.
- King, C.D. (1948) *Seventy-Five Years of Progress in Iron and Steel*, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, New York.
- Klare, M.T. (2012) The end of easy everything. *Current History*, **111**: 24–28.
- Klein Goldewijk, K., Beusen, A. and P. Janssen. 2010. Long-term dynamic modelling of global population and built-up area in a spatially explicit way: HYDE 3.1. *The Holocene* **20**: 565–573.
- Klimont, Z., Smith, S.J. and J. Cofala, 2013. The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide: 2000–2011 emissions. *Environmental Research Letters* **8**:1–6.
- Kole, C. and Michler, C. (2010) *Transgenic Crop Plants*, Springer, Berlin.
- Kovanda, J. and Hak, T. (2011) Historical perspectives of material use in Czechoslovakia in 1855–2007. *Ecological Indicators*, **11**: 1375–1384.
- KPMG China (2013) Global Reach of China Luxury, KPMG China, Hong Kong, <http://www.kpmg.com/CN/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/Global-Reach-China-Luxury-201301.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Krausmann, F. (2008) The global socio-metabolic transition: past and present metabolic profiles and their future trajectories. *Journal of Industrial Ecology*, **12**: 637–656.
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N. *et al.* (2009) Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, **68**: 2696–2705.
- Krausmann, F., Gingrich, S. and Nourbakhch-Sabet, R. (2011) The metabolic transition in Japan. *Journal of Industrial Ecology*, **15**: 877–892.
- Kuriki, S., Daigo, I., Matsuno, Y. *et al.* (2010) Recycling potential of platinum group metals in Japan. *Journal of Japan Institute of Metals*, **74**: 801–805.
- Kvavadze, E., Bar-Yosef, O., Belfer-Cohen, A. *et al.* (2009) 30,000-year-old wild flax fibers. *Science*, **325**: 1359.
- Lampert, L., Quéguiner, B., Labasque, L. *et al.* (2002) Spatial variability of phytoplankton composition and biomass on the eastern continental shelf of the Bay of Biscay (north-east Atlantic Ocean). Evidence for a bloom of *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) in spring 1998. *Continental Shelf Research*, **22**: 1225–1247.
- Landsberg, H.H. (1964) *Natural Resources for U.S. Growth: A Look Ahead to the Year 2000*, Johns Hopkins Press, Baltimore, MD.
- Landsberg, H.H., Fischman, L.L. and J.L. Fisher. 1963. *Resources in America's Future: Patterns of Requirements and Availabilities, 1960-2000*. Baltimore, MD: Johns Hopkins Press.

- Latimer, J. (2001). All-consuming passions: materials and subjectivity in the age of enhancement. In: N. Lee and R. Munro, eds., *The Consumption of Mass*, Oxford, Blackwell Publishers, pp. 158–173.
- Lauk, C., Haberl, H., Erb, K.-H. et al. (2012) Global socioeconomic carbon stocks in long-lived products 1900–2008. *Environmental Research Letters*, **7**: 034023 <http://iopscience.iop.org/1748-9326/7/3/034023> (accessed 23 May 2013).
- Layard, R. (2005) *Happiness*, The Penguin Press, New York.
- Leach, E.R. (1959) Hydraulic society in Ceylon. *Past and Present*, **15**: 2–26. Lefebvre, H. (1971) *Everyday Life in the Modern World*, Allen Lane, London.
- Lenzen, M. and Dey, C.J. (2000) Truncation error in embodied energy analysis of basic iron and steel products. *Energy*, **25**: 577–585.
- Lenzen, M. and Treloar, G. (2003) Differential convergence of life-cycle inventories toward upstream production layers, implications for life-cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, **6**: 3–4.
- Lei, Q. (2011) The Development of China's Cement Industry, <http://www.tema.org.tr/images/file/Cin%20Cimento%20Birligi%20Baskani%20Lei%20QIANZHI%20.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Li, J. (2012a) World Bank Experience on Clean Brick Production in South Asia Region, http://www.ine.gov.mx/descargas/dgcneca/2012_ladrilleras_pon_s6_jli_eng.pdf (accessed 23 May 2013).
- Li, V. (2012b) Can concrete be bendable? *American Scientist*, **100**: 484–493.
- Li, Y., Richardson, J.B., Walker, A.K. et al. (2006) PTCLP heavy metal leaching of personal computer components. *Journal of Environmental Engineering*, **2006**: 497–504.
- Li, C., Zhang, Q., Krotkov, N.A. et al. (2010) Recent large reduction in sulfur dioxide emissions from Chinese power plants observed by the Ozone Monitoring Instrument. *Geophysical Research Letters*, **37**: L08807. doi: 10.1029/2010GL042594
- Lifset, R.J., Gordon, R., Graedel, T. et al. (2002) Where has all the copper gone: the stocks and flows project, Part 1. *Journal of Metallurgy*, **2002**: 21–26.
- Linde, C.P. (1916) *Aus Meinem Leben und von Meiner Arbeit*, R. Oldenbourg, München.
- Linebaugh, P. (1993) *The London Hanged: Crime and Civil Society in the Eighteenth Century*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Longhurst, A.H. (1979) *The Story of the Stūpa*, Asian Educational Services, New Delhi.
- Lowenstam, H.A. (1981) Minerals formed by organisms. *Science*, **211**: 1126–1130.
- Lu, Z., Streets, D.G., Zhang, Q. et al. (2010) Sulfur dioxide emission in China and sulfur trends in East Asia since 2000. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **10**: 6311–6331.
- Luo, Z. and Soria, A. (2008) Prospective Study of the World Aluminium Industry, European Commission, Seville, <ftp://ftp.jrc.es/pub/EURdoc/JRC40221.pdf> (accessed 23 May 2013).
- MacBean, C. (2013) *The Pesticide Manual: A World Compendium*, CABI, Wallingford.
- Macfarlane, A. and Martin, G. (2002) *Glass: A World History*, University of Chicago Press, Chicago.
- Maddison, A. (2007) *Contours of the World Economy, 1-2030 AD*, Oxford University Press, Oxford.
- Madlool, N.A., Saidur, R., Hossian, M.S. and Rahim, N.A. (2011) A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**: 2042–2060.

- Magnaghi, G. (2011) Recovered Paper Market in 2010, <http://www.bir.org/assets/Documents/industry/MagnaghiReport2010.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Malpass, D.B. (2010) *Introduction to Industrial Polyethylene: Properties, Catalysts, and Processes*, Wiley-Scrivener, New York.
- Marchetti, C. (1985) Nuclear plants and nuclear niches. *Nuclear Science and Engineering*, **90**: 521–526.
- Markets and Markets (2011) Hydrogen Generation Market, <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hydrogen-generation-market-494.html> (accessed 23 May 2013).
- Marsh, P. (2012) *The New Industrial Revolution: Consumers, Globalisation and the End of Mass Production*, Yale University Press, New Haven, CT.
- Matos, G.R. (2009) *Use of Minerals and Materials in the United States from 1900 through 2006*, USGS, Washington, DC <http://pubs.usgs.gov/fs/2009/3008/> (accessed 23 May 2013).
- Matos, G. and Wagner, L. (1998) Consumption of materials in the United States, 1900–1995. *Annual Review of Energy*, **23**: 107–122 <http://pubs.usgs.gov/annrev/ar-23-107/aerdocnew.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Matternet (2013) <http://matternet.us/> (accessed 23 May 2013).
- Matthews, E., Bringezu, S., Fischer-Kowalski, M. et al. (2000) *The Weight of Nations: Material Outflows from Industrial Economies*, World Resources Institute, Washington, DC.
- McFedries, P. (2012) Consumption 2.0. *IEEE Spectrum*, **2012**: 26.
- McLaren, D.J. and Skinner, B.J. (eds) (1987) *Resources and World Development*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J. et al. (1972) *The Limits to Growth*, Universe Books, New York.
- Meyers, M.A., McKittrick, J. and P. Chen. 2013. Structural biological materials: critical mechanics-materials connections. *Science* **339**: 773–779.
- Miettinen, A., Sarmaja-Korjonen, K., Sonninen, E. et al. (2008) *The Palaeoenvironment of the Antrea Net Find*, Finnish Antiquarian Society, Helsinki.
- McKelvey, V.E. (1973) Mineral resource estimates and public policy, in *United States Mineral Resources* (eds D.A. Brobst and W.P. Pratt), USGS, Washington, DC, pp. 9–19.
- McWhan, D. (2012) *Sand and Silicon: Science that Changed the World*, Oxford University Press, New York.
- Meil, J., Bushi, L., Garrahan, P. et al. (2009) *Status of Energy Use in the Canadian Wood Products Sector*, Forintek, Vancouver, BC http://www.forintek.ca/public/pdf/Public_Information/technical_rpt/Status%20on%20Energy%20use%20in%20Canadian%20Wood%20Products%20sector%20-%202010.pdf (accessed 23 May 2013).
- Mendoza, J., Domenico, A., Fatemeh, J. et al. (2012) Life cycle assessment of granite application in sidewalks. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **17**: 580–592.
- Menzel, P. (1995) *Material World: A Global Family Portrait*, Sierra Club, San Francisco, CA.
- Mersiowsky, I. (2002) Long-term fate of PVC products and their additives in landfills. *Progress in Polymer Science*, **27**: 2227–2277.

- Metz, B., O. Davidson, H. de Coninck, *et al.* (eds) 2005. *Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mitscherlich, G. (1963) *Zustand, Wachstum und Nutzung des Waldes im Wandel der Zeit*, Freiburger Universitätsreden, Freiburg.
- Mitsubishi (2005) LCA Results of Aluminum Can, Mitsubishi Materials, Tokyo, http://www.jia-page.or.jp/environment/epd/directory/img/LCAresult_e.pdf (accessed 23 May 2013).
- mobiThinking (2013) Global Mobile Statistics 2013 Part A: Mobile Subscribers; Handset Market Share; Mobile Operators, <http://mobithinking.com/mobile-marketing-tools/latest-mobile-stats/a#phone-shipments> (accessed 23 May 2013).
- Moll, S., Popescu, C., and Nickel, R. (2012) EU's Resource Productivity on the Increase, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-SF-12-022/EN/KS-SF-12-022-EN.PDF (accessed 23 May 2013).
- Montgomery Ward & Company (1895) *Catalogue and Buyers' Guide 1895*, Skyhorse Publishing, New York 2008.
- Moore, G. (1965) Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, **38**: 114–117.
- Moore, G.E. (1975) Progress in digital integrated electronics. Technical Digest, IEEE International Electron Devices Meeting, pp. 11–13.
- Moore, C.J. (2008) Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing long-term threat. *Environmental Research*, **108**: 131–139.
- Moore, C.G. and Phillips, C. (2011) *Plastic Ocean*, Penguin, London.
- Morgan, T. 2010. *End-game: The Denouement of Exponentials*. Tullett Prebon, London, http://www.tullettprebon.com/Documents/strategyinsights/tp0610d_tpsi_006.pdf (accessed 23 May 2013).
- Morita, Z. and Emi, T. (eds) (2003) *An Introduction to Iron and Steel Processing*, Kawasaki Steel 21st Century Foundation, Tokyo.
- Mukerji, C. (1983) *From Graven Images: Patterns of Modern Materialism*, Columbia University Press, New York.
- Muradov, N.Z. and Nejat Véziröđlu, T. (eds) (2012) *Carbon-Neutral Fuels and Energy Carriers*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- NAHB (National Association of Home Builders) (2010) Smaller homes to remain popular even after recession's end, http://www.nahb.org/news_details.aspx?newsID=11485&fromGSA=1 (accessed 19 June 2013).
- NAS (National Academy of Sciences) (1969) *Resources and Man*, W.H. Freeman, San Francisco, CA.
- National Archives (2012) British Empire: Living in the British Empire – India, <http://www.nationalarchives.gov.uk/education/empire/pdf/g2cs4s2.pdf> (accessed 23 May 2013).
- NBSC (National Bureau of Statistics of China) (2013) Statistical Data, <http://www.stats.gov.cn/english/> (accessed 23 May 2013).
- Ndoro, W. (1997) The Great Zimbabwe. *Scientific American*, **277**: 94–99.
- NEAA (Netherlands Environmental Assessment Agency) (2013) HYDE site: History Database of the Global Environment, <http://themasites.pbl.nl/tridion/en/themasites/hyde/> (accessed 19 June 2013).

- Nel, A., Tian, X., Lutz, M. *et al.* (2006) Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science*, **311**: 622–627.
- Nemoto, T., Tanaka, Y., Tsujioka, S. *et al.* (2011) Resource recycling for sustainable industrial development. *Hitachi Review*, **60**: 335–340.
- Newby, F. (ed.) (2001) *Early Reinforced Concrete*, Ashgate Publishing Ltd, Burlington, VY.
- Nielsen, S. (2003) Boeing turns to Russian programming talent in massive database project. *Serverworld*, **1**: 1–4.
- Norgate, T. and Jahanshahi, S. (2011) Reducing the greenhouse gas footprint of primary metal production: where should the focus be? *Minerals Engineering*, **24**: 1563–1570.
- Novoselov, K.S., Falko, V.I., Colombo, L. *et al.* (2012) A roadmap for graphene. *Nature*, **490**: 192–200.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2009) U.S. Life Cycle Inventory Database Roadmap, <http://www.nrel.gov/lci/pdfs/45153.pdf> (accessed 23 May 2013).
- NREL (2013a) Best Research-Cell Efficiencies, http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg (accessed 23 May 2013).
- NREL (2013b) U.S. Life Cycle Inventory Database, <http://www.nrel.gov/lci/> (accessed 23 May 2013).
- NRC (2009) Energy Benchmarking: Canadian Potash Production Facilities, NRC, Ottawa, <http://oee.nrcan.gc.ca/publications/infosource/pub/cipec/Potash-production/7132> (accessed 23 May 2013).
- NSG (2011) NSG Group and the Flat Glass Industry 2011, http://www.nsg.co.jp/□/media/NSG/Site%20Content/Temporary%20Downloads/Japanese/NSGFGI_2011%20EN2.ashx (accessed 23 May 2013).
- Nuttall, G.H. (1967) *Theory and Operation of the Fourdrinier Paper Machine*, Phillips, London.
- Oakes, J. (2005) *Inuit annuraangit. Our Clothes: A Travelling Exhibition of Inuit Clothing*, Aboriginal Issues Press, Winnipeg.
- O'Brien, C.J., Peloquin, J.A., Vogt, M. *et al.* (2012) Global marine phytoplankton functional type biomass distributions: coccolithophores. *Earth Systems Scientific Data Discussions*, **5**: 491–520.
- OEA (Organization of European Aluminium Refiners and Remelters) (2010) Aluminium Recycling in Europe, <http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2011/08/Aluminium-recycling-in-Europe-2007.pdf> (accessed 23 May 2013).
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) (1995) *The Life Cycle Approach: An Overview of Product/Process Analysis*, OECD, Paris.
- OECD (2013) Energy Intensity, <http://www.oecd-ilibrary.org/docserver/download/3011041ec047.pdf?expires=1366555903&id=id&acname=guest&checksum=BDB5DB8A6AD551F0E60F1C824BF3C719> (accessed 23 May 2013).
- ONS (Office for National Statistics) (2012) UK Environmental Accounts, 2012, http://www.ons.gov.uk/ons/dcp171778_267211.pdf (accessed 23 May 2013).
- Owens, B. (2013) Mining: extreme prospects. *Nature*, **495**: S4–S6.
- Pant, S. (1976) *The Origin and Development of Stupa Architecture in India*, Bharata Manisha, New Delhi.

- Paper Recycling Promotion Center (2009) Statistics of Recovered Paper in Japan, <http://www.prpc.or.jp/menu05/pdf/statics-of-recovered-paper2008.pdf> (accessed 19 June 2013).
- Paper Recycling Promotion Center (2012) 2011 Statistics of Recovered Paper in Japan, <http://www.prpc.or.jp/linkfile/english-paperrecycling.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Patterson, C.C. (1972) Silver stocks and losses in ancient and medieval times. *The Economic History Review*, **25**: 205–233.
- PCA (Portland Cement Association) (2011) Concrete Design and Production, http://www.cement.org/tech/cct_concrete_prod.asp (accessed 23 May 2013).
- PE Americas (2010) Life Cycle Impact Assessment of Aluminum Beverage Cans, PE Americas, Boston, MA, <http://www.container-recycling.org/assets/pdfs/aluminum/LCA-2010-AluminumAssoc.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Penner, M., Power, K., Muhairwe, C. *et al.* (1997) *Canada's Forest Biomass Resources: Deriving Estimates from Canada's Forestry Inventory*, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC <http://cfs.nrcan.gc.ca/publications/?id=4775> (accessed 19 June 2013).
- People's Daily (2013) China's Luxury Consumption Hits \$46 Billion. People's Daily Online (Jan 15), <http://english.peopledaily.com.cn/90778/8093172.html> (accessed 23 May 2013).
- Peray, K.E. (1986) *The Rotary Cement Kiln*, Chemical Publishing, New York.
- Petersen, A.K. and Solberg, B. (2002) Greenhouse gas emissions, life-cycle inventory and cost-efficiency of using laminated wood instead of steel construction. Case: beams at Gardermoen airport. *Environmental Science and Policy*, **5**: 169–182.
- Petersen, A.K. and Solberg, B. (2004) Greenhouse gas emissions and costs over the life cycle of wood and alternative flooring materials. *Climatic Change*, **64**: 143–167.
- Pierson, D. (2012) SUVs are Big in China. Los Angeles Times (Apr 24), <http://articles.latimes.com/2012/apr/24/business/la-fi-china-suv-20120425> (accessed 23 May 2013).
- Pilkington, L.A.B. (1969) Review lecture. The float glass process. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, **314**: 1–25.
- Pilkington, L.A.B. (2010) Pilkington and the Flat Glass Industry 2010 <http://www.pilkington.com/resources/pfgi2010.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Pilkington, L.A.B. (2013) Self-Cleaning, <http://www.pilkington.com/products/bp/by-benefit/selfcleaning/home.htm>.
- Pilz, H., Brandt, B. and Fehringer, R. (2010) *The Impact of Plastics on Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions in Europe*, Denkstatt, Vienna http://www.plasticseurope.org/documents/document/20111107113205-e_ghg_packaging_denkstatt_vers_1_1.pdf (accessed 23 May 2013).
- Plastics Europe (2011) Plastics – The Facts, 2011, Plastics Europe, Brussels, http://www.plasticseurope.org/documents/document/20111107101127-final_pe_factsfigures_uk2011_lr_041111.pdf (accessed 23 May 2013).
- Plastics Europe (2012) Plastics – The Facts 2012, <http://www.plasticseurope.org/cust/documentrequest.aspx?DocID=54693> (accessed 23 May 2013).
- Porada, E. (1965) *The Art of Ancient Iran: Pre-Islamic Cultures*, Crown Publishers, New York.
- Potočnik, J. (2012) Any Future for the Plastic Industry in Europe? http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-12-632_en.htm (accessed 23 May 2013).

- Prak, M. (2011) Mega-structures of the middle ages: the construction of religious buildings in Europe and Asia, c. 1000-1500. *Journal of Global History*, **6**: 381–406.
- President's Materials Policy Commission (1952) *Resources for Freedom, A Report to the President by the President's Materials Policy Commission*, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Princen, T., Maniates, M. and Conca, K. (eds) (2002) *Confronting Consumption*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Qualcomm (2013) Qualcomm Tricorder X Prize, <http://www.qualcommtricorderxprize.org/competition-details/overview> (accessed 23 May 2013).
- Rafiqul, I., Weber, C., Lehmann, B. and Voss, A. (2005) Energy efficiency improvements in ammonia production – perspectives and uncertainties. *Energy*, **30**: 2487–2504.
- Reeves, G.M., Sims, I. and J. C. Cripps. 2006. *Clay Materials used in Construction*. London: Geological Society.
- Reiffel, A.J., Kafka, C., Hernandez, K.A. *et al.* (2013) High-fidelity tissue engineering of patient-specific auricles for reconstruction of pediatric microtia and other auricular deformities. *PLoS ONE*, **8**: e56506. doi: 10.1371/journal.pone.0056506 (Epub 2013 Feb 20).
- Research and Markets (2013) Global and Chinese Industrial Gases Industry Report, 2012–2013, Research and Markets, Dublin.
- Richardson, B.A. (1978) *Wood Preservation*, Construction Press, New York.
- Robinson, B.H. (2009) E-waste: an assessment of global production and /environmental impacts. *Science of the Total Environment*, **408**: 183–191.
- Roche, D. (2000) *A History of Everyday Things: The Birth of Consumption in France, 1600-1800*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ruthven, D.M., Farooq, S. and Knaebel, K.S. (1993) *Pressure Swing Adsorption*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Ryan, L. and Dziurawiec, S. (2001) Materialism and its relationship to life satisfaction. *Social Indicators Research*, **55**: 185–197.
- Salmon, E.T. (1999) *Roman Coins and Public Life under the Empire*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- Savage, N. (2012) Graphene. *Nature*, **483**: 530–531.
- Savage, N. (2013) Mine, all mine! *Nature*, **495**: 52–53.
- Schandl, H. and Eisenmenger, N. (2006) Regional patterns in global resource extraction. *Journal of Industrial Ecology*, **10**: 133–147.
- Schandl, H., Poldy, F., Turner, G.M. *et al.* (2008) Australia's resource use categories. *Journal of Industrial Ecology*, **12**: 669–685.
- Scheel, H.J. and Fukuda, T. (eds) (2004) *Crystal Growth Technology*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Schmidt, M., Hottenroth, H., Schottler, M. *et al.* (2012) Life cycle assessment of silicon wafer processing for microelectronic chips and solar cells. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **17**: 126–144.
- Schoer, K., Kovanda, J., and Lauwigi, C. (2012) Economy-Wide Material Flow Accounts (EW-MFA), http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environmental_accounts/documents/Economy-wide%20material%20flow%20accounts%20compi-lat_ion%20guide%20%20-.pdf (accessed 23 May 2013).

- Schoer, K., Weinzettel, J., Kovanda, J. *et al.* (2012) Raw material consumption of the European Union –concept, calculation method, and results. *Environmental Science and Technology*, **46**: 8903–8909.
- Schultz, D. (2012) The Past, Present and Future of Aluminum in North American Light Vehicles, <http://www.drivealuminum.org/research-resources/PDF/Speeches%20and%20Presentations/2012/The-Past-Present-and-Future-of-Aluminum.pdf> (accessed 19 June 2013).
- Schutz, B. (2002) *Great Cathedrals*, Abrams, New York.
- Semon, W.L. (1933) Synthetic rubber-like composition and method of making same. US Patent 1,929,453, USPTO, Washington, DC.
- SERI (Sustainable Europe Research Institute) (2013) The Online Portal for Material Flow Data, <http://www.materialflows.net/> (accessed 23 May 2013).
- Service, R.F. (2009) Is silicon’s reign nearing its end? *Science*, **323**: 1000–1002.
- Sethuraj, M.R. and Mathew, N.M. (eds) (1992) *Natural Rubber: Biology, Cultivation, and Technology*, Elsevier, New York.
- Sevenster, A. (2008) Eco-profiles and environmental declarations for PVC. *Plastic, Rubber and Composites*, **37**: 403–405.
- SFA (State Forestry Administration) (2009) *China Forestry Statistical Yearbook 2009*, China Forestry Publishing House, Beijing.
- Shadman, F. and McManus, T.J. (2004) Comment on “The 1.7 kilogram microchip: energy and material use in the production of semiconductor devices”. *Environmental Science and Technology*, **38**: 1915.
- Shaeffer, R.E. (1992) *Reinforced Concrete: Preliminary Design for Architects and Builders*, McGraw-Hill, New York.
- Shafizadeh, F. (1981) Basic principles of direct combustion, in *Biomass Conversion Process for Energy and Fuels* (eds S.S. Sofer and O.R. Zabrosky), Plenum Press, New York, pp. 103–112.
- Shalaby, W.S. and Burg, K.J.L. (eds) (2004) *Absorbable and Biodegradable Polymers*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Shephard, S. (2000) *Pickled, Potted, and Canned: How the Art and Science of Food Preserving Changed the World*, Simon & Schuster, New York.
- Shumaker, R.W., Walkup, K.R. and B.B. Beck. 2011. *Animal Tool Behavior: The Use and Manufacture of Tools by Animals*. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press.
- SIA (Semiconductor Industry Association) (2013) Historical Billings Reports, <http://www.sia-online.org/clientuploads/directory/IndustryStatistics/GSR1976-December%202012.xls> (accessed 23 May 2013).
- Sibley, S.F. (2011) *Overview of Flow Studies for Recycling Metal Commodities in the United States*, USGS, Washington, DC <http://pubs.usgs.gov/circ/circ1196-AA/pdf/circ1196-AA.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Sika. 2005. *Concrete Handbook*. Zurich: Sika. http://gbr.sika.com/content/dam/Corporate/01_General/publications/sika_concrete_handbook.pdf (accessed 23 May 2013).
- Simon, J. (1981) *The Ultimate Resource*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Simon, J. (ed.) (1995) *The State of Humanity*, Blackwell-Wiley, New York.

- Sims, G. and Rusmana, Y. (2011) Tin Gets Scarcer Amid Growing Global Demand. Bloomberg, <http://tininvestingnews.com/933-tin-gets-scarcer-amid-growing-global-demand.html> (accessed 23 May 2013).
- Singh, R. (2006) Lac Culture, Department of Zoology, Udai Pratap Autonomous College, Varanasi.
- Singh, S.J., Krausmann, F., Gingrich, S. *et al.* (2012) India's biophysical economy, 1961–2008. Sustainability in a national and global context. *Ecological Economics*, **76**: 60–69.
- Sivak, M. and Tsimhoni, O. (2009) Fuel efficiency of vehicles on US roads: 1936–2006. *Energy Policy*, **37**: 3168–3170.
- Slade, G. (2006) *Made to Break: Technology and Obsolescence in America*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Smil, V., Nachman, P. and T.C. Long, II., 1983. *Energy Analysis in Agriculture*. Boulder, CO: Westview.
- Smil, V. (1994) *Energy in World History*, Westview, Boulder, CO.
- Smil, V. (1999) Crop residues: agriculture's largest harvest. *BioScience*, **49**: 299–308.
- Smil, V. (2000) *Feeding the World*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Smil, V. (2001) *Enriching the Earth*, The MIT Press, Cambridge, MA. Smil, V. (2003) *Energy at the Crossroads*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Smil, V. (2005) *Creating the Twentieth Century*, Oxford University Press, New York.
- Smil, V. (2006a) *Transforming the Twentieth Century*, Oxford University Press, New York.
- Smil, V. (2006b) Peak oil: a catastrophist cult and complex realities. *World Watch*, **19**: 22–24.
- Smil, V. (2007) Light behind the fall: Japan's electricity consumption, the environment, and economic growth. *Japan Focus* <http://www.vaclavsmil.com/wp-content/uploads/docs/smil-article-light-behind-fall-20070000-apj.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Smil, V. (2008) *Energy in Nature and Society*, The MIT Press, Cambridge, MA. Smil, V. (2010) *Prime Movers of Globalization*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Smil, V. (2012) Jeremy Grantham, Starving for Facts. *The American* (Dec 5), [http://www.vaclavsmil.com/wp-content/uploads/Jeremy-Grantham-Starving-for-Facts - The-American-Magazine.pdf](http://www.vaclavsmil.com/wp-content/uploads/Jeremy-Grantham-Starving-for-Facts-The-American-Magazine.pdf) (accessed 23 May 2013).
- Smil, V. (2013) *Harvesting the Biosphere*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Smith, D.C. (1970) *History of Papermaking in the United States*, Lockwood Publishing, New York.
- Smith, S.J., van Aardenne, J., Klimont, Z. *et al.* (2010) Anthropogenic sulfur dioxide emissions 1850–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, **10**: 16111–16151.
- Solarplaza (2013) Top 10 World's Most Efficient Solar PV Mono-Crystalline Cells, <http://www.solarplaza.com/top10-monocrystalline-cell-efficiency/> (accessed 23 May 2013).
- Sommath, S.S., Davalis, J.F., Zipfel, M.G. *et al.* (1995) A review of wood railroad ties performance. *Forest Products Journal*, **45**: 55.
- Stahel, W.R. (1997) The service economy: 'wealth without resource consumption'? *Philosophical Transactions of the Royal Society London A*, **355**: 1309–1319.

- Stanley, S.M., Ries, J.B. and Hardie, L.A. (2005) Seawater chemistry, coccolithophore population growth, and the origin of Cretaceous chalk. *Geology*, **33**: 593–596.
- STAP (Scientific and Technical Advisory Panel) (2011) Marine Debris as a Global Environmental Problem, <http://www.thegef.org/gef/sites/thegef.org/files/publication/STAP%20MarineDebris%20-%20website.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Steinberger, J.K., Krausmann, F. and Eisenmenger, N. (2010) Global patterns of materials use: a socioeconomic and geophysical analysis. *Ecological Economics*, **69**: 1148–1158.
- Stenkjaer, N. (2009) Straw Ovens, http://www.folkcenter.net/gb/rd/biogas/technologies/straw_ovens/ (accessed 23 May 2013).
- Stephan, D. 2012. The world's largest low-density polyethylene plant inaugurated in Qatar. *Process Worldwide*, http://www.process-worldwide.com/engineering_construction/materials/polymers/articles/386413 (accessed 23 May 2013).
- Stern, B.R. and Lagos, G. (2008) Are there health risks from the migration of chemical substances from plastic pipes to drinking water? A review. *Human and Ecological Assessment*, **14**: 753–779.
- Strawbale (2013) <http://www.strawbale.com/> (accessed 23 May 2013).
- Strom, E.T. and Rasmussen, S.C. (eds) (2011) *100+ Years of Plastics: Leo Baekeland and Beyond*, Oxford University Press, New York.
- Stuart, M. (2012) Concrete Deterioration, PDH Center, Fairfax, <http://www.pdhonline.org/courses/s155/s155content.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Sui, T. (2010) China's Cement Industry Towards Sustainability, http://www.italcementigroup.com/NR/rdonlyres/4FFAD881-52B9-439B-8D51-965D7CC4588F/0/Tongbo_UK.pd (accessed 23 May 2013).
- Sullivan, D.E., Sznoppek, J.L. and L.A. Wagner. 2000. *20th Century U.S. Mineral Prices Decline in Constant Dollars*. Washington, DC: USGS. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr00389> (accessed 23 May 2013).
- Sun, W., Cai, J. and Ye, Z. (2013) Advances in energy conservation of china steel industry. *Scientific World Journal*, **2013**: 247035. doi: 10.1155/2013/247035
- Suwanmanee, U., Varabuntoonvit, V., Chaiwutthinan, P. et al. (2013) Life cycle assessment of single use thermoform boxes made from polystyrene (PS), polylactic acid (PLA), and PLA starch: cradle to consumer gate. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **18**: 401–417.
- Tahil, W. (2006) The Trouble with Lithium: Implications of Future PHEV Production for Lithium Demand, http://tyler.blogware.com/lithium_shortage.pdf (accessed 23 May 2013).
- Takiguchi, H. and Morita, K. (2011) Global flow analysis of crystalline silicon, in *Crystalline Silicon – Properties and Uses* (ed S. Basu), InTech, pp. 329–355.
- Tanner, A.H. (1998) *Continuous Casting: A Revolution in Steel*, Write Stuff Enterprises, Fort Lauderdale.
- Taylor, P., Funk, C. and A. Clark. 2006. *Luxury or Necessity? Things We Can't Live Without: The List Has Grown in the Past Decade*. Washington, DC: Pew Research Center, <http://www.pewsocialtrends.org/files/2010/10/Luxury.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Terakado, R., Takahashi, K., Daigo, I. et al. (2009) In-use stock of copper in Japan estimated by bottom-up approach. *Journal of the Japan Institute of Metals*, **73**: 713–719.

- The Economist (2011) Commodities: Crowded Out. *The Economist* (Sep 24, 2011), <http://www.economist.com/node/21528986> (accessed 19 June 2013).
- The Linde Group (2004) 125 Years of Linde, http://www.the-linde-group.com/internet_global.thelindegrou.global/en/images/chronicle_e%5B1%5D14_9855.pdf (accessed 23 May 2013).
- The Linde Group (2012) Cryogenic Air Separation: History and Technological Progress, The Linde Group, Wiesbaden.
- Thieme, H. (1997) Lower Paleolithic hunting spears from Germany. *Nature*, **385**: 807–810.
- Thomas, J. (ed.) (1979) *Energy Analysis*, Westview Press, Boulder, CO.
- Thomsen, C.J. (1836) *Ledetraad Til Nordisk Oldkyndighed, udg. af det Kongelige Nordiske Oldskrift-selskab*, S. L. Møllers, Copenhagen.
- Thorpe, R.S. and Williams-Thorpe, O. (1991) The myth of long-distance megalith transport. *Antiquity*, **65**: 64–73.
- ThyssenKrupp (2012) Crew Celebrates Milestone: Europe's Biggest Blast Furnace Produces 70 Millionth Ton of Steel, http://www.thyssenkrupp.com/en/presse/art_detail.html&eid=TKBase_1328095396431_284885812 (accessed 23 May 2013).
- Tickner, J.A., Schettler, T., Guidotti, T. *et al.* (2001) Health risks posed by use of di-2-ethylhexyl phthalate (DEHP) in PVC medical devices: a critical review. *American Journal of Industrial Medicine*, **39**: 100–111.
- Tilahun, A., Kebede, F., Yamoah, C. *et al.* (2012) Quantifying the masses of Macrotermes subhyalinus mounds and evaluating their use as a soil amendment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **157**: 54–59.
- Tilman D., Balzer, C., Hill J., Befort, B.L. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108**: 20260–20264.
- Tréguer, P., Nelson, D.M., van Bennekom, A.J. *et al.* (1995) The silica balance in the world ocean: a reestimate. *Science*, **268**: 375–379.
- Trinkhaus, E. (2005) Early modern humans. *Annual Review of Anthropology*, **34**: 207–30.
- Tupy, M.L. (2012) Why iPhone 5 and Siri are Good for Capitalism, <http://www.cato.org/blog/miracle-iphone-or-how-capitalism-can-be-good-environment> (accessed 23 May 2013).
- Turkenburg, W.C., Arent, D.J., Bertani, R. *et al.* (2000) Renewable energy technologies, in *World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability* (eds J. Goldemberg *et al.*), UNDP, New York, pp. 219–227.
- Turner, J.S. (2000) *The Extended Organism*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Twede, D. (2002) The packaging technology and science of ancient transport amphoras. *Packaging Technology and Science*, **15**: 181–195.
- Twede, D. (2005) The cask age: the technology and history of wooden barrels. *Packaging Technology and Science*, **18**: 253–264.
- Ulm, F.-J. (2012) Innovationspotenzial Beton: Von Atomen zur Grünen Infrastruktur. *Beton- und Stahlbetonbau*, **107**: 504–509.
- UN (United Nations) (2013) Energy Statistics, <http://unstats.un.org/unsd/energy/> (accessed 23 May 2013).
- UNDESA (United Nation Department of Economic and Social Affairs) (2013) Detailed Indicators, http://esa.un.org/wpp/unpp/panel_indicators.htm (accessed 19 June 2013).

- Underwood, J.R. (2001) Anthropogenic rocks as a fourth basic class. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7: 104–110.
- UNDP (United Nations Development Programme) (2013) International Human Development Indicators, <http://hdr.undp.org/en/statistics/> (accessed 23 May 2013).
- UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) (2010) Forest Product Conversion Factors for the UNECE Region, UNECE, Geneva, <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/publications/DP-49.pdf> (accessed 23 May 2013).
- UNEP (2009) Distribution of Marine Litter, <http://www.unep.org/regionalseas/marinelitter/about/distribution/default.asp> (accessed 23 May 2013).
- Unger, P.W. (ed.) (1994) *Managing Agricultural Residues*, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- University of Stuttgart (2007) *The Sustainability of Packaging Systems for Fruit and Vegetable Transport in Europe Based on Life-Cycle Analysis*, University of Stuttgart, Stuttgart.
- USCB (United States Census Bureau) (2012) The 2012 Statistical Abstract, <http://www.census.gov/compendia/statab/> (accessed 23 May 2013).
- USDA (United States Department of Agriculture) (2001) *U.S. Forest Facts and Historical Trends*, Forest Service, Washington, DC.
- USDA (2003) *U.S. Timber Production, Trade, Consumption, and Price Statistics 1965–2002*, Forest Service, Washington, DC.
- USDA (2012) 2012 Agricultural Statistics Annual, http://www.nass.usda.gov/Publications/Ag_Statistics/2012/index.asp (accessed 23 May 2013).
- USDOE (US Department of Energy) (2005) Light Vehicle Market Share by Size Class, 1975–2005, http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/facts/2005/fcvt_fotw387.html (accessed 23 May 2013).
- USDOE (2007) U.S. Energy Requirements for Aluminum Production Historical Perspective, Theoretical Limits and Current Practices, http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/aluminum/pdfs/al_theoretical.pdf (accessed 23 May 2013).
- USDOT (US Department of Transport) (2012) History of the Interstate Highway System, <http://www.fhwa.dot.gov/interstate/history.htm> (accessed 23 May 2013).
- USEIA (United States Energy Information Agency) (2013) Sources and Uses, <http://www.eia.gov/> (accessed 23 May 2013).
- USEPA (US Environmental Protection Agency) (2003) *Background Document for Life-Cycle Greenhouse Gas Emission Factors for Clay Brick Reuse and Concrete Recycling*, USEPA, Washington, DC.
- USEPA. 2011a. *Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Tables and Figures for 2010*. Washington, DC: US EPA. http://www.epa.gov/wastes/nonhaz/municipal/pubs/msw_2010_data_tables.pdf (accessed 23 May 2013).
- USEPA (2011b) Paper Making and Recycling, <http://www.epa.gov/osw/conserves/materials/paper/basics/papermaking.htm> (accessed 23 May 2013).
- USEPA (2012a) Statistics on the Management of Used and End-of-Life Electronics, <http://www.epa.gov/osw/conserves/materials/ecycling/manage.htm> (accessed 23 May 2013).

- USEPA (2012b) *Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2011*, US EPA, Washington, DC <http://www.epa.gov/otaq/fetrends.htm#report> (accessed 23 May 2013).
- USEPA (2013) National Emissions Inventory (NEI) Air Pollutant Emissions Trends Data, <http://www.epa.gov/ttnchie1/trends/> (accessed 23 May 2013).
- USGS (2001) Obsolete Computers, “Gold Mine,” or High-Tech Trash? <http://pubs.usgs.gov/fs/fs060-01/> (accessed 23 May 2013).
- USGS (2005) Metals Stocks in Use in the United States, <http://pubs.usgs.gov/fs/2005/3090/2005-3090.pdf> (accessed 23 May 2013).
- USGS (2006a) Materials in use in U.S. Interstate Highways, <http://pubs.usgs.gov/fs/2006/3127/2006-3127.pdf> (accessed 23 May 2013).
- USGS (2006b) Recycled Cell Phones – A Treasure Trove of Valuable Materials, <http://pubs.usgs.gov/fs/2006/3097/> (accessed 23 May 2013).
- USGS. 2008. Demand for minerals in the United States. *The Encyclopedia of Earth*. Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, http://www.eoearth.org/article/Demand_for_minerals_in_the_United_States?topic=49532 (accessed 23 May 2013)
- USGS (2009) *Copper – A Metal for the Ages*, USGS, Reston, VA <http://pubs.usgs.gov/fs/2009/3031/> (accessed 23 May 2013).
- USGS (2012) Mineral Commodity Summaries 2012, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf> (accessed 23 May 2013).
- USGS (2013) Materials Flow, <http://minerals.usgs.gov/minerals/mflow/> (accessed 23 May 2013).
- Vale (2013) The Vale Fleet, <http://www.vale.com/EN/business/logistics/shipping/Pages/default.aspx> (accessed 23 May 2013).
- van der Voet, E., van Oers, L. and Nikolic, I. (2005) Dematerialization: not just a matter of weight. *Journal of Industrial Ecology*, **8**: 121–137.
- Vandiver, P., Soffer, O., Klima, B. and Svoboda, J. (1989) The origins of ceramic technology at Dolni-Vestonice, Czechoslovakia. *Science*, **246**: 1002–1008.
- Van Kauwenbergh, S.J. (2010) World phosphate rock reserves and resources. http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADW835.pdf (accessed 23 May 2013).
- Vasconcellos, A. (2010) Biomass and abundance of termites in three remnant areas of Atlantic forest in northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Entomologia*, **54**: 455–461.
- de Volder, M.F.L., Tawfick, S.H., Baughman, R.H. and Hart, A.J. (2013) Carbon nanotubes: present and future commercial applications. *Science*, **339**: 535–538.
- Verbraeck, A. (ed.) (1976) *The Energy Accounting of Materials, Products, Processes and Services*, TNO (Netherlands Institute for Applied Scientific Research), Rotterdam.
- Victor, P. (2008) *Managing Without Growth: Slower By Design, Not Disaster*, Edward Elgar, Cheltenham.
- Vinylfacts (2013) Plastic Myths Unwrapped, <http://www.vinylfacts.com/> (accessed 23 May 2013).
- Vlachopoulos, J. 2009. *An Assessment of Energy Savings from Mechanical Recycling of Polyethylene Versus New Feedstock*. Washington, DC: World Bank, [https://cdm.unfccc.int/filestorage/N/P/L/NPLRYFK7SEWG4001ZJ3MX58VHC62AU/Assessment%20of%20energy%20savings%20in%20recycling%20versus%20new%](https://cdm.unfccc.int/filestorage/N/P/L/NPLRYFK7SEWG4001ZJ3MX58VHC62AU/Assessment%20of%20energy%20savings%20in%20recycling%20versus%20new%20)

- 20feedstock.pdf?t=Z2p8bWxtMW84fDCrwXFgQdsVIyozX6A6hUbG (accessed 23 May 2013).
- Wärtsilä (2013) Wärtsilä RT-flex96C/RTA96C, <http://www.wartsila.com/en/engines/low-speed-engines/RT-flex96C> (accessed 23 May 2013).
- Watts, P. (1905) *The Ships of the Royal Navy as They Existed at the Time of Trafalgar*, Institution of Naval Architects, London.
- von Weizsacker, E., Lovins, A.B. and Lovins, L.H. (1997) *Factor Four Doubling Wealth, Halving Resource Use* by, Earthscan, London.
- WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) (2004) *Mobility 2030: Meeting the Challenges of Sustainability*, WBCSD, Geneva.
- Weisberg, D.E. (2008) Engineering Design Revolution, <http://www.cadhistory.net/> (accessed 23 May 2013).
- Weisz, H., Krausmann, F., Amann, C. *et al.* (2006) The physical economy of the European Union: cross-country comparison and determinants of material consumption. *Ecological Economics*, **58**: 676–698.
- Wendel, J.F., Small, R.L., Cronn, R.C. and Brubaker, C.L. (1999) Genes, jeans, and genomes: reconstructing the history of cotton, in *Plant Evolution in Man-Made Habitats* (eds L.W.D. van Raamsdonk and J.C.M. den Nijs), University of Amsterdam, Amsterdam, pp. 133–161.
- Wesseler, J.H.H. (ed.) (2005) *Environmental Costs and Benefits of Transgenic Crops*, Springer, Berlin.
- White, A. (2006) Happiness is Being Healthy, Wealthy and Wise, <http://www.le.ac.uk/ebulletin-archive/ebulletin/news/press-releases/2000-2009/2006/07/nparticle.2006-07-28.html> (accessed 23 May 2013).
- White, S.R., Blaiszik, B.J., Kramer, S.L.B. *et al.* (2011) Self-healing polymers and composites. *American Scientists*, **99**: 392–399.
- Whiten, A., Goodall, J. and McGrew, W.C. (1999) Cultures in chimpanzees. *Nature*, **399**: 682–685.
- Wilburn, D.R. and Goonan, T. (2013) *Aggregates from Natural and Recycled Sources*, USGS, Washington, DC <http://pubs.usgs.gov/circ/1998/c1176/c1176.html> (accessed 23 May 2013).
- Wilkins, J., Schoville, B.J., Brown, K.S. and Chazan, M. (2012) Evidence for early hafted hunting technology. *Science*, **338**: 942–946.
- Wilkinson, P.H. (1936) *Diesel Aircraft Engines*, P.H. Wilkinson, Brooklyn, NY.
- Wilkinson, C.F. and Lamb, J.C. VI, (1999) The potential health effects of phthalate esters in children's toys: a review and risk assessment. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, **30**: 140–155.
- Williams, E. (2003) Forecasting material and economic flows in the global production chain for silicon. *Technological Forecasting and Social Change*, **70**: 341–357.
- Williams, E. (2004) Energy intensity of computer manufacturing: hybrid assessment combining process and economic input–output methods. *Environmental Science and Technology*, **38**: 6166–6174.
- Williams, E. (2011) Environmental effects of information and communication technologies. *Nature*, **479**: 354–358.

- Williams, E., Ayres, R.U. and Heller, M. (2002) The 1.7 kilogram microchip: Energy and material use in the production of semiconductor devices. *Environmental Science and Technology*, **36**: 5504–5510.
- Wilson, A. and Boehland, J. (2005) Small is beautiful: U.S. house size, resource use, and the environment. *Journal of Industrial Ecology*, **9**: 277–287.
- Williams, M. (2006) *Deforesting the Earth: From Prehistory to Global Crisis*, The University of Chicago Press, Chicago.
- van Winkle, T.L., Edeleanu, J., Prosser, E.A. and Walker, C.A. (1978) Cotton versus polyester. *American Scientist*, **66**: 280–290.
- Winter, N.B. (2012) Understanding Cement, <http://www.understanding-cement.com/understanding-cement-book.html> (accessed 23 May 2013).
- Wirsenius, S. (2000) *Human Use of Land and Organic Materials*, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Wood, R., Lenzen, M. and B. Foran. 2009. A material history of Australia: evolution of material intensity and drivers of change. *Journal of Industrial Ecology* **13**: 847–862.
- World Bank (2007) Export Marketing of Gum Arabic from Sudan, http://siteresources.worldbank.org/INTAFRMDTF/Resources/Gum_Arabic_Policy_Note.pdf (accessed 23 May 2013).
- World Bank (2013a) Countries and Economies, <http://data.worldbank.org/country> (accessed 23 May 2013).
- World Bank (2013b) Motor Vehicles (Per 1,000 People), <http://data.worldbank.org/indicator/IS.VEH.NVEH.P3> (accessed 23 May 2013).
- Worrell, E. and Galitsky, C. (2008) *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making*, Ernst Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA <http://www.energystar.gov/ia/business/industry/LBNL-54036.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Worrell, E., Neelis, M., Price, L. et al. (2008) *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors*, Ernst Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA <http://ies.lbl.gov/iespubs/62806.pdf> (accessed 23 May 2013).
- Wrangham, R.W., McGrew, W.C., de Waal, F. B. M., and Heltne, P. G., eds. 1996. *Chimpanzee Cultures*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- WSA (World Steel Association) (2011a) Steel and Raw Materials, WSA, Brussels, http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/fact-sheets/Fact-sheet_Raw-materials2011/document/Fact%20sheet_Raw%20materials2011.pdf (accessed 23 May 2013).
- WSA (2011b) Methodology Report: Life Cycle Inventory Study for Steel Products, <http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/LCA-Methodology-Report/document/LCA%20Methodology%20Report.pdf> (accessed 23 May 2013).
- WSA (2013) Statistics Archive, <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive.html> (accessed 23 May 2013).
- Wu, X., Zhang, C., Goldberg, P. et al. (2012) Early pottery at 20,000 years ago in Xianrendong Cave, China. *Science*, **336**: 1696–1700.
- Yellishetty, M., Ranjith, P.G. and Tharumarajah, A. (2010) Iron ore and steel production trends and material flows in the world: Is this really sustainable? *Resources Conservation and Recycling*, **54**: 1084–1094.

- Yogananda, P. 1946. *Autobiography of a Yogi*. New York: The Philosophical Library, <http://www.crystalclarity.com/yogananda/chap30.php> (accessed 23 May 2013).
- Zeist, W. and Bakker-Heeres, J.A.H. (1975) Evidence for linseed cultivation before 6000 BC. *Journal of Archaeological Science*, **2**: 215–219.
- Ziegler, K. (1963) Consequences and Development of an Invention, Nobel Lecture, December 12, 1963, The Nobel Prize in Chemistry 1963, Nobel e-Museum, Stockholm, http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1963/ziegler-lecture.html (accessed 19 June 2013).
- Zulehner, W. (2003) Historical overview of silicon crystal pulling development. *Materials Science and Engineering*, **73**: 1–12.

Указатель

- Адсорбция 89
- Автомобили 42, 50, 52-3, 79-81, 110-12, 123, 129, 134, 155, 160-1, 164-6, 168-72, 174, 187, 206, 212, 224-5
энергозатраты 123, 129, 134
- Азот 3, 8-9, 12, 56-7, 59, 86-8, 90-92, 109, 111, 119, 130, 132, 138, 143-4, 191, 202, 205
- Акведуки 22, 23
- Алюминий 4, 40, 43-4, 51-2, 56-7, 59, 62, 75-6, 79-80, 94, 101, 110-12, 125, 127-9, 131-2, 141, 144-7, 149, 157-9, 161, 165-6, 173-4, 180-2, 188, 204, 206, 209-10, 212, 215, 217-8
банки 101, 144-5, 147, 158-9, 173, 210, 212
в автомобильной промышленности 79-80, 161, 173-4
в самолетостроении 52, 80, 165
переработка 144-7, 157-9, 209-10
применение 51-2, 62, 79-80, 112, 159, 161, 174, 180-1, 206, 215, 217-8
производство 43-4, 52, 56-7, 75-6, 94, 110, 141, 144-7, 180
энергозатраты 127-9, 131-2, 141
- Аммиак 4, 9, 56-7, 86, 89, 91-92, 111, 129-130, 182, 188, 202, 209, 227
синтез Габера-Боша 56-7, 89, 91-2, 119, 129
энергозатраты 129-130
- Амфоры 26
- Анализ жизненного цикла (ОЖЦ) 101, 121, 133-142, 144, 154
- Аргон 8, 86-7
- Асфальт 4, 7, 38, 67, 69, 107, 108, 111, 135, 141
- Балласт 33, 38, 70, 109
- Банки
алюминиевые 101, 144-5, 147, 158-9, 173, 210, 212
мусорные корзины 83-4, 147
под напитки 141, 154, 157-8, 173
стальные 158, 212
- Батареи 49, 53, 94, 97, 111, 128, 131, 145, 149, 150, 171, 180, 214-15
фотоэлектрические (ФЭ) 94, 97
- Бензин 176, 192-3, 227
- Бетон 4, 23, 27-8, 37-9, 48-50, 59, 63-5, 69-74, 106, 108-9, 118, 123, 134, 139-41, 214
в Китае 73-74, 118, 207-8
в строительстве 39, 71-4
железобетон 39, 43, 49-50, 72, 140
износ 71-3
- Биоматериалы 7, 60-1, 105, 107, 123, 132, 139, 143, 199,
См. также Бумага, Древесная масса (целлюлоза), Солома, Древесина, Дерево
- Биоминерализаторы 11-12, 14-15
- Бокситы 2, 5, 44, 79, 119, 131, 144

- Бревно, лес 7, 62, 64
 Бронза 28-30, 37, 43
 Бумага 4, 44-5, 47-8, 60-61, 63, 65-8, 75, 87, 124-5, 144, 153-6, 178-9, 209-211
 переработка 67, 107-8, 124-5, 141, 144, 146-9, 209-210
 производство 57, 62, 66-8, 144, 148-9, 156, 210, 216
 расход (потребление) 66-7, 112, 179, 215
 энергозатраты 124, 132
 Вода 1-8, 12, 15, 19, 25, 27, 38-9, 42, 59, 70, 73-4, 85, 88, 90, 94, 104, 109, 116, 126, 135-9, 142-4, 159, 188, 214, 227
 в отчетах о материальных потоках 1, 3-6
 Водород 8-9, 57, 81, 86-90, 130, 192-4, 202, 205
 Газы
 парниковые (ПГ) 101, 137, 191, 226
 промышленные 8, 45, 85-89
 Гелий 86, 88, 109
 Германий 89, 95, 145
 Глина 12-3, 14, 18-9, 21, 25-8, 37, 39, 46, 69, 125-6, 156, 199, 202
 Гоминины 17
 Гончарные изделия 20
 Гравий 6, 25, 27, 31, 38, 59, 69-70, 105-6, 108, 114-6, 125, 178-9, 199
 Графен 213-4
 Двигатели
 бензиновые 53, 155, 159-161, 168, внутреннего сгорания 107, 155, 159-60, 171
 дизельные 123, 155, 161-2, 165, 168, 183
 паровые 37, 45, 107, 159-61, 165-6, 182
 Декарбонизация (обезуглероживание) 30, 40-1, 76, 191-5, 197, 226
 Дематериализация 153-82, 215-8
 в национальных экономиках 175-182
 последствия 165-175
 удельная 154, 157-165
 Дерево, древесина, деревянный 3-4, 7, 11, 13, 18, 21-3, 25-6, 28, 31, 32-4, 36-7, 39, 41-2, 45, 47-8, 50, 53-4, 59-65, 67, 80, 105-8, 112, 119, 123-5, 134, 137, 139-141, 143, 148, 157, 159, 175, 178-180, 192-4, 199
 в истории 17-18, 21-39
 в строительстве 25, 32-3
 заготовка 62-3, 100, 137
 композиционная, композитная 65, 139
 расход (потребление) 179-180, 200
 топливная 39, 47, 62
 энергозатраты 123-4, 128, 134
 Десульфуризация (обессеривание) 67, 87, 90, 194, 196-7
 отходящий газ (ОГ) 67
 Диатомы 16
 Дизайн (конструирование, проектирование) 23, 27, 31, 33, 37, 49, 52, 154-6, 166, 209-10, 214, 224
 автоматизированное (CAD) 154-6, 211, 223
 Диоксид (двуокись)
 азота 138
 серы 138, 192-7, 227
 титана 87, 214
 углерода 2-3, 12, 71-2, 88, 135-9, 142, 191-195, 203, 214
 Дома 18, 21-2, 25, 27, 31-3, 35-7, 42, 46, 49-50, 54, 56, 64-6, 71, 74, 84, 122, 124, 134, 140-141, 179-180, 182, 187, 220
 Дороги 3, 8, 31, 38, 50, 52-3, 70-74, 105, 109, 111, 135, 141, 147, 171, 175, 218, 220
 Римские 23, 25
 Древесный уголь 33, 36-7, 39, 47, 63, 192
 Емкость
 материалов 103, 111, 116, 132, 179, 182, 219
 углерода 193
 энергии 123, 127-8, 130, 132, 157, 182-191, 212

- Железо
 выплавка 29, 30, 33-4, 40, 51, 77, 121, 127, 140, 146
 ковачное 34, 41
 чугуны 29-30, 34, 40-1, 75-7, 174
 Железные дороги 37-9, 42, 47-8, 70, 123, 162, 174-5
 Жилье, жилища 9-10, 18, 21, 32, 35, 37, 64, 66, 68, 72, 80, 108, 134, 145, 118, 218, 220
 в Северной Америке 32, 64, 124, 175
 ОЖЦ 134, 140-1
 Заполнители
 строительные 25, 27, 38, 44, 59, 69-73, 108-109, 125,
 Затраты (расходы, входные показатели)
 прямые материальные (ПМЗ) 100, 102
 Зола
 унос 72, 125-26, 188, 214
 Золото 22, 29, 34, 43, 75, 15, 128-9, 145, 150-1, 201, 204-5
 Известняк 16, 19, 21, 26-7, 30, 35, 37, 39, 41, 51, 70, 77-8, 86, 125-6, 196
 Известь 19, 27, 88, 196
 Империя
 Римская 21, 23, 29
 Инструменты 9, 12-13, 17, 18, 22, 28, 30-32, 34, 40-42, 62, 68, 102, 121-2, 141, 143, 155-6, 165, 196, 209, 215, 222-4
 Инфраструктура 9-11, 22, 37, 49, 52, 72-4, 105-6, 108, 113-4, 118, 121, 134, 153, 155-6, 173, 175, 181, 186, 191, 216, 222
 Калий 8, 12, 56, 92-3, 109, 119-120, 132, 202-203
 Калийные соли (поташ) 59, 118, 130
 Кальций 15-6, 19, 28, 79, 88, 95, 125
 Камень, каменный 4-6, 13, 17-24, 26, 28-9, 35-7, 69-70, 108-109, 175, 179-180
 в Париже 35-7
 тесаный 35, 37, 70, 109, 125
 Камеры 67, 163-4, 217-8,
 Каминьы 32, 182
 Карбонаты 14, 16, 55, 73
 Кварц 17, 54, 94, 96, 109, 131
 Керамика 19-20, 26, 44, 69, 125-6, 141, 151
 Кирпичи 21-23, 25-27, 36-7, 46, 51, 64, 68-70, 74, 125, 132, 143, 180,
 размеры 25
 энергозатраты 125
 Кислород 2-8, 40, 51, 76, 86-8, 90, 100, 104, 138, 140, 162, 205
 Китай 64, 67-74, 77-9, 81, 90, 92, 94, 101, 103, 108, 111, 117-20, 123, 125-8, 130, 141, 146, 148, 150, 173, 175, 181-2, 185-6, 189-90, 193-6, 201, 204, 207-8, 216, 221-2, 225-6
 бетон 73-74, 118, 207-8
 история 19, 21, 26, 28, 31, 34, 36
 расход (потребление) материалов 48-9, 52-3, 64, 67-8, 70-2, 81, 117-20, 146, 148, 207-8, 224-5
 металлы 52, 77-9, 141, 146, 148
 Клееная древесина 65, 124
 Кожа 4, 7, 21, 61, 108, 149
 Кокколитофориды 15-16
 Кокс 30, 33-4, 39-40, 51, 76-7, 79, 88, 121, 123, 126-129
 Компьютеры 66, 96, 110, 135, 149-51, 153-55, 162-3, 165-7, 181, 211, 215, 223
 персональные 10, 135, 163, 165-7, 211
 Конопля (пенька) 60, 199
 Корабли 23-4, 33-4, 42, 47, 61, 77-8, 123, 175, 212
 контейнерные суда 52, 162, 165, 183, 212
 Кремнезем (диоксид кремния) 16, 50, 54, 94, 109
 Кремний (Si) 16, 39, 44, 53-4, 56-7, 69, 73, 87, 94-7, 109, 123, 125, 130-2, 149, 206
 кристаллический 54,
 поликристаллический 60, 94-7, 131
 энергозатраты 130-1
 Крепости 31, 36
 Культуры 2-5, 7-8, 13, 46, 57, 60, 62, 83,

- 92-4, 100, 105-6, 115, 122, 133, 178, 215
- Латунь 28-30, 37, 43
- Лен 21, 60, 199
- Литий 215
- Материалы
- в доисторические времена 48-57
 - в древнем мире 21-30
 - в ЕС 112-116
 - в Китае 117-121
 - в раннем Новом времени 30-36
 - в современном мире 36-45
 - в Средние века 21-30
 - в США 107-114
 - в электронике 94-7
 - в XX веке 46-57
 - замены 85, 139, 153-8, 164, 172-5, 180, 193, 204-206, 208, 211-214
 - используемые организмами 12-16
 - композитные 44, 129, 157, 172, 174
 - национальные, на уровне отдельных стран 107-121
 - новые 213-215
 - отчеты, учет 101-106
 - по всему миру 101-106
 - потоки (движение) 99-121
 - скрытые 1-6, 43, 63, 100, 102, 104-105, 121, 177
 - энергозатраты 121-132, 208-209
- Мебель 31-3, 49, 59, 61, 84, 140, 156, 165, 176, 180, 224,5
- Мегалиты 11, 20, 22
- Медь 22, 24, 28-9, 37, 40, 43-4, 52, 57, 64, 69, 75, 86, 92, 110, 112-3, 115, 119-20, 128-9, 139, 145, 149-51, 158, 181, 188, 195, 202-6, 213
- Металлы 4, 8, 75-80, 86, 110-115, 127-8, 131, 145-7, 150-151, 178-180, 199, 204-206, 209-210, 215
- лом, металлолом 50, 76-7, 80, 110, 120, 123, 127, 144, 146-7
 - переработка 78, 80, 107, 109-110, 115, 120, 139, 143, 145-6, 159, 173, 179, 204-204, 210
 - тяжелые 5,8, 53, 111, 133, 142, 145, 149-150, 165, 180
- энергозатраты 127-132
- См. также Медь, Золото, Железо, Свинец, Серебро, Сталь, Цинк.
- Метан 9, 87, 89, 105, 192-5
- Микропроцессоры 43, 94-6, 150, 156-7, 163-5, 181, 217-218
- Монолиты 20, 24
- Мосты 23, 29-30, 40, 42, 49, 52, 65, 73, 108
- Муравьи 13
- Население 17, 21, 37, 47, 57, 74, 107, 113, 117, 119-120, 167, 170-171, 173, 182, 189, 191, 200, 207-8, 215, 220-1, 223-5, 227
- мировое 31, 56-7, 63, 105, 118, 132, 205, 217, 223, 227
- Небоскребы 23, 39, 42-3, 49, 51, 71
- Нефть
- пик 201
 - сырая 7, 16, 47, 82, 105, 111, 115, 129, 137, 139, 148, 168-9, 171, 192-6
- ОПЕК (Организация стран-экспортеров нефти) 120, 122, 206
- Охотники-собиратели 18-9
- Паритет
- покупательной способности 117, 154, 185-6, 190
- Перерабатывающие заводы 67, 87, 90, 143
- Переработка 1-2, 5,-6, 16, 44, 46-7, 53, 55-7, 59, 68, 99, 101, 107, 120, 123, 125, 136, 139-140, 143, 147-8, 174, 191, 200, 202, 206-207, 209, 211, 225
- алюминия 44, 110, 128, 144, 146, 157, 173, 210
 - бумаги 67, 107-8, 124-5, 141, 144, 146-9, 209-210
 - металлов 78, 80, 107, 109-110, 115, 120, 139, 143, 145-6, 159, 173, 179, 204-204, 210
 - отходов электронных изделий («электронных отходов») 145, 149-150, 183

- пластмасс 55, 81, 83, 129, 144, 146-8, 210, 211
- Песок 1, 6-8, 27-8, 38, 69-70, 108-109, 116, 125, 175, 179
- Пестициды 3, 8, 93, 136
- Печи
доменные 30, 33-4, 37, 42, 51, 75, 77, 86, 119, 121, 123, 125-8, 134, 140
кислородно-конвертерные, конвертерные 51, 76-7, 86, 127-8
мартовские 41, 50, 76-7
электродуговые (ЭДП) 50, 76-8, 86, 123, 127
- Пиломатериалы (лесоматериалы) 18, 22, 39-40, 47, 60-6, 123-4, 140, 143
в горнодобывающей отрасли 39-40, 48
в строительстве 59, 64, 140
- Пирамиды 23-4, 27, 43
- Пластмассы (пластик) 13, 47, 52, 54-7, 59, 63, 75, 80-81, 84-6, 108, 119-120, 129, 133-4, 139, 142-151, 158, 174, 199, 211, 216
океанический мусор 142
переработка 55, 81, 83, 129, 144, 146-8, 210, 211
энергозатраты 165, 167-9
- Плотины 12-3, 49, 71, 73-4, 108, 118
- Плотность
удельная 24, 32, 42, 49-50, 54, 57, 61-4, 84, 96, 100, 112, 136
энергетическая 192
- Площадь
непроницаемая поверхность 74
- Поливинилхлорид (ПВХ) 56, 81, 84-5, 101, 129, 138, 144, 147
- Полипропилен (ПП) 56, 81, 83-5, 129, 144, 211, 214
- Полиэтилен (ПЭ) 55-6, 80-83, 85, 129, 135-6, 147, 175
высокой плотности (ПЭВП) 56, 82-3, 129, 142, 148
низкой плотности (ПЭНП) 81-3, 129
- Полиэтилентерефталат (ПЭТ) 55, 147-8, 211
- Породы
антропоные 74
- Поставки (снабжение) первичной энергией, общее (ОСПЭ) 120, 128, 131-2, 138, 183-4, 187-9
- Продукт
валовой внутренний (ВВП) 63, 75, 105, 107, 117-119, 154, 176-9, 185-6, 189, 190, 206-7, 216, 221
- Продукты питания, продовольствие 7, 13, 133, 136, 202
- Пропилен 81, 83
- Протоиндустриализация 31
- Птицы 12-14, 16, 60, 113, 142
- Радио 53-4, 115, 164, 167, 180, 217
- Ракеты 87-8, 159-160, 162
- Рама 60
- Расход (потребление)
прямые материальные затраты (ПМЗ) 100, 102
- Расходы (затраты)
общие материальные (ОМЗ) 100-102, 178
- Резина (каучук) 3, 8, 55, 83, 84, 213, 224
натуральный 61
- Ресурсы 1-2, 7, 46, 68, 89, 102-103, 107, 116-117, 128, 160, 165, 175, 177, 184-7, 190, 200-201, 215, 217-218, 221
пиковое производство (добыча) 201
природные 200-207, 209, 217, 221, 225-7
- Руды 3, 5, 13-14, 16, 19, 28, 34, 51-2, 77, 104, 106, 113-114, 120, 127, 138, 157, 174, 178, 183, 188, 201, 204, 209
железные 2, 28-30, 75, 77-8, 113, 115, 118-119, 121, 123, 131, 181, 203-204
медные 113, 119, 203-204
- Самолеты 50, 52, 80, 108, 111-2, 135, 147, 155-156, 158-9, 161, 172-5, 186-7, 210, 212, 215, 217, 223
- Airbus 50, 80, 155, 172, 186

- Boeing 50, 81, 155, 158, 165, 172, 186, 215
- Свинец 22, 29, 53, 75, 86, 95, 110-11, 145, 149, 188, 195, 213, 216, 227
- Серебро 29, 32, 34, 43, 75, 128, 145, 151, 204, 213
- Сизаль 60
- Синтез
Габера-Боша 56-7, 91-2, 119, 129
- Солома 18, 25, 32, 37, 46-8, 60, 68, 115, 148
- Соотношение
запасов/добычи 202-4
массы/мощности 161, 166, 168
мощности/веса 124-5
Н:С 193
- Сотовые телефоны 150-1, 153, 163-4, 167-8, 181, 205, 211, 215, 223
дематериализация в связи с ними 164, 216-7
- Сталь 13, 23, 25, 30, 34, 39-43, 48-52, 56-7, 59, 64-5, 72-3, 75-9, 101, 110-111, 115, 120, 123-4, 127, 132-4, 137-140, 144-6, 149, 154, 157-8, 166, 173-5, 180-181, 206-7, 209-210, 212-213, 227
переработка 144-6, 157
производство 38, 41, 56, 86-7, 110, 119, 121, 127-8, 131-2, 144, 215-216
расход (потребление) 106, 111, 181, 208
энергозатраты 127, 122-3, 182, 190
- Станки 21, 34-5, 40, 45
- Стекло 13, 17, 27-8, 31-2, 38-9, 50-1, 54-5, 69, 74, 86-7, 94, 118-9, 125-6, 132, 134, 145, 149-1, 158, 165, 212, 214, 217-8, 224, 227
- Стоунхендж 20
- Строения (сооружения)
монументальные 21, 23, 25
- США 2, 48-9, 55, 62-3, 67-8, 89, 92-3, 120, 122, 125, 129, 133, 165
расход (потребление) материалов 5-6, 52, 66, 71, 78, 85, 107-112, 146, 150, 169-172, 174, 176, 178-181, 183-189, 195, 207-210, 223
- металлы 41, 49-50, 76-7, 80, 128, 145-6, 159, 212
- Текстиль 20, 28, 34, 42, 45, 80, 100, 224
- Телевизоры 54, 115, 150-1, 164, 167, 181, 217, 220, 224-5
- Термиты 13-14, 64
- Титан 52, 75, 82, 106, 128, 145, 146, 175, 204, 206, 214
- Топливо
ископаемое 1-5, 9, 13, 14, 16, 37, 39, 48, 63, 72, 75, 87, 100, 103-5, 107, 115-6, 120, 128, 131, 136-9, 156, 165, 175, 177-9, 183-4, 187, 191, 193-6
- Транзисторы 94-7, 132, 149, 157, 163, 214
- Транспортировка (перевозка) 11, 20, 22, 24, 34, 38, 42, 69, 72, 77, 123, 126-7, 136, 139, 166, 171, 1734, 187, 208, 209, 223, 225
- Турбины
водяные 45, 124, 160
газовые 107, 159-160, 162, 166, 188
паровые 130, 155, 159, 162
- Уголь 1-2, 5-7, 16, 28, 30-4, 37, 39, 47-8, 76-8, 87, 89-90, 105, 107, 121, 126-7, 130, 137, 140, 160, 166, 177-8, 182, 187-90, 192-7
и декарбонизация (обезуглероживание) 30, 40-1, 76, 191-5, 197, 226
- Удобрения 56-7, 59, 86, 91-3, 111, 118-9, 130, 132, 136, 177, 182, 199, 202-3, 216
азотные 57, 59, 86, 91-2, 119, 132
- Упаковка 48, 55, 81, 84, 125, 130, 132, 139, 141, 158, 209, 213, 223-4
- Фанера 4, 48, 61, 63-5, 124
- Форд, Модель Т 42, 50, 161, 168-9
внедорожники (кроссоверы) 10, 168-9, 171-2, 206, 224
расход (потребление) топлива 171
- США 168-72

- Фосфаты 59, 92-3, 100, 109, 130, 138, 202-203
- Фосфор 12, 41, 56, 92-3, 119, 130, 132, 149, 202-203
- Хлопок 3-4, 7, 21, 60-1, 107, 112, 135-6, 179
- Храмы 23, 26
- Целлюлоза (древесная масса) 4, 22, 45-7, 55, 62-4, 66-7, 87, 106, 124, 134, 137, 148-9, 156, 192-3, 209
- Цемент 4, 27, 38-9, 59, 70-2, 86, 106, 108-9, 118, 125-6, 132, 137, 175, 181-2, 190, 207-8, 214-6, 227
- в Китае 171, 190
- портландцемент 39, 69, 125-6, 141
- римский 27
- энергозатраты 125-6
- Цеолиты 88-89
- Цинк 4, 22, 28-9, 44, 53, 75, 86, 92, 95, 110-111, 128, 145, 175, 195, 205
- Чертежи 154-15
- Шкуры
- животных 60-1
- Шпалы
- железнодорожные 38-39, 48, 64
- Щебень 69-70, 108-109
- Эвтрофикация 6, 138, 203
- Эквивалент
- сырьевой (СЭ) 113-5
- Электричество 6, 42-4, 52-4, 63-4, 71, 76, 80, 97, 108, 116, 120-122, 125-8, 130-131, 135, 138, 141, 143, 149, 156, 159-160, 162, 166-7, 171, 175, 180-184, 186-9, 191-7, 205-6, 212
- Электроника 52-6, 60, 81, 86, 95, 97, 102, 120, 131, 134, 137, 145, 149, 150, 164-5, 167, 180-1, 204, 213, 217
- Энергия
- затраты энергии на производство материалов 121-33, 135, 138-41, 182, 209, 212
- расход (потребление) 88, 121-33, 135, 138-41, 166, 176, 182-4, 186-8, 190-2, 209, 211-2
- эффективность преобразования 72, 87-8, 96, 124, 126-8, 130-1, 167-8, 171, 176, 182-92, 199-200
- Этилен 80-86, 129, 175, 211, 214
- Япония 2, 5, 21-2, 26, 37, 48, 51, 53, 64, 67, 72, 74, 76-9, 90, 92, 100, 102-3, 120, 144, 146, 149, 170-1, 175, 177-8, 185-91, 195, 206-10, 213, 216, 220, 225
- автомобили 170-1, 187
- переработка 112, 114-115
- расход (потребление) материалов 42, 77, 79-80, 90-91, 93, 171, 175
- сталь 59-60

ВАЦЛАВ СМІЛ

Создавая современный мир
Материалы и дематериализация

Печать офсетная. Формат 70х100/16.

Усл. печ. л. 18,5. Тираж 1000 экз.

Гарнитура «Таймс»

Подписано в печать 5.12.2017 г.

СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННОГО МИРА

Материалы и дематериализация



ВАЦЛАВ СМИЛ

Почетный профессор, Университет Манитобы, Канада

Потребление материалов в развитых странах все растет— когда придет пора остановиться? Приведет ли относительная дематериализация к абсолютному снижению потребности в материалах? Книга «Создание современного мира. Материалы и дематериализация» анализирует и содержит ответы на эти и многие другие вопросы.

В ходе своего развития современный мир стал зависеть от небывалых потоков материалов. Теперь даже самого эффективного производства и максимизации возможностей переработки может быть недостаточно для обеспечения такого уровня дематериализации, который позволил бы смягчить негативные последствия возрастающей потребности в материалах, обусловленной как ростом населения, так и повышением уровня жизни. В книге анализируются связанные с этим издержки, а также потенциальные возможности дематериализации современных экономик.

В книге «Создание современного мира. Материалы и дематериализация» рассматриваются основные материалы, с давних пор известные человеку и используемые им по сегодняшний день, от дерева и камня до металлов, сплавов, пластмасс и кремния; описываются процессы добычи и производства таких материалов, а также их основное применение. Подробно анализируется развитие и постоянное улучшение возможностей по добыче, обработке, синтезу, конечной обработке, распределению материалов, а также энергозатраты и воздействие на экологию, связанные с растущим потреблением материалов. В завершение приводится прогноз на будущее, обсуждаются перспективы дематериализации и возможные ограничения, связанные с материалами.

Данная междисциплинарная работа будет интересна и полезна читателям, занятым в таких сферах, как ресурсная экономика, экология, энергетика, геология полезных ископаемых, теория отраслевых рынков, основы технологии и материаловедение.



доступна в электронном виде



**ФОНД ИНФРАСТРУКТУРНЫХ
И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ
ПРОГРАММ**

Группа РОСНАНО