

Энергетические ресурсы XXI столетия: проблемы и прогнозы. Могут ли возобновляемые источники энергии заменить ископаемое топливо? †

В.С.Арутюнов,^{a, b} Г.В.Лисичкин^c

^a Институт химической физики имени Н.Н.Семенова Российской академии наук
Россия, 119991 Москва, ул. Косыгина, 4

^b Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Факультет фундаментальной физико-химической инженерии
Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 51

^c Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Химический факультет
Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3

Проанализированы современное состояние и основные тенденции развития мировой энергетики. Сделан вывод о том, что на протяжении всего XXI столетия роль альтернативных источников энергии будет оставаться достаточно скромной. Основным источником энергии до конца века останется ископаемое топливо. Из-за сокращения доступных ресурсов нефти ее доля в мировом энергобалансе будет постоянно снижаться, а доля природного газа — расти. Показано, что энергетика, основанная на любых источниках, включая альтернативные, не может быть экологически чистой, если масштаб производства энергии велик. В долгосрочной перспективе у человечества пока нет других достаточно масштабных источников, кроме термоядерной энергетики, однако переход на этот источник не решит проблему теплового баланса планеты.
Библиография — 70 ссылок.

Оглавление

I. Введение	777
II. Современное состояние энергетики	779
III. Критерии оценки источников энергии	781
IV. Виды и принципиальные особенности возобновляемых источников	790
V. Принципиальные проблемы, возникающие при использовании возобновляемых источников энергии	800
VI. Прогноз развития возобновляемых источников энергии	802
VII. Заключение	803

В.С.Арутюнов (V.S.Arutyunov). Доктор химических наук, заведующий лабораторией окисления углеводородов ИХФ РАН, профессор ФФФИ МГУ.

Телефон: +7(495)939–7287, e-mail: v_arutyunov@mail.ru
Область научных интересов: кинетика газофазных реакций, окислительная конверсия углеводородных газов, экологические и ресурсные проблемы энергетики и транспорта.

Г.В.Лисичкин (G.V.Lisichkin). Доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией химии поверхности кафедры химии и органического катализа Химического факультета МГУ.
Телефон: +7(495) 939–4638,
e-mail: lisich@petrol.chem.msu.ru

Область научных интересов: химия поверхностных соединений, гетерогенный катализ, проблемы альтернативной энергетики.

I. Введение

Энергия — одно из немногих фундаментальных понятий окружающего нас мира. И уже одно это оправдывает то внимание, которое уделяется связанным с ней вопросам во всех сферах человеческой деятельности. Однако в данном обзоре нас будет интересовать только относительно узкий, но жизненно важный для прогноза возможных путей развития современной техногенной цивилизации круг вопросов, связанных с источниками энергии.

Если мы как уникальная цивилизация хотим избежать деградации, то обречены постоянно увеличивать потребление энергии (что не исключает снижения удельного расхода энергии на отдельные промышленные процессы по мере их

† Выводы и численные расчеты, сделанные авторами данного обзора, являются дискуссионными, и редакция за их содержание ответственности не несет.

совершенствования). Как совместить эту тенденцию с ограниченными возможностями нашей планеты, уже практически полностью освоенной человеком, — главный вызов нашему обществу.¹

В свете этой глобальной энергетической проблемы удивительно, что основная дискуссия по энергетическим вопросам, особенно в развитых странах, ведется (причем не только в средствах массовой информации, но и в научных изданиях) вокруг несравненно менее значимой проблемы более широкого использования так называемых альтернативных источников энергии. В результате у многих людей сложилось твердое убеждение, что повсеместный переход к «возобновляемым», «экологически чистым», «зеленым» источникам энергии позволит решить не только современные, но и все будущие энергетические и экологические проблемы человечества, и что такой переход способен обеспечить не только комфортное существование, достигнутое современным западным обществом, но и его устойчивое развитие. В свою очередь, это способствовало возникновению различных «зеленых» движений, поддерживаемых преимущественно благополучными западными обывателями, убежденными в том, что ограничение энергопотребления и ужесточение экологических норм, разумеется, без ущерба для их комфорта и снижения уровня жизни, способны сохранить эти комфорт и благополучие не только для них, но и для их потомков. Показательно, что «зеленые» движения практически не имеют успеха и поддержки в развивающихся странах, для населения которых гораздо более актуально повышение уровня жизни здесь и сейчас, чем достаточно абстрактные проблемы еще не родившихся поколений.

Постоянно внушаемое средствами массовой информации убеждение, что возобновляемые источники способны решить глобальную проблему обеспечения человечества энергией, уже настолько вошло в сознание масс, что даже некоторые ученые и политические деятели начинают в это верить, хотя еще полвека назад ведущими специалистами в области мировой динамики и глобальных процессов^{2–5} была убедительно показана несопоставимость масштабов реальных возможностей возобновляемой энергетики и глобальных потребностей в энергии современного индустриального, а тем более будущего постиндустриального общества.

Несомненно, интерес к альтернативным источникам энергии «подогревают» проблемы с поставками традиционных энергоносителей и значительные колебания цен на них на мировом рынке. Этот интерес то ажиотажно повышается, то несколько снижается, синхронно с колебаниями мировых цен на нефть. Его поддерживают различные «зеленые» движения и организации, а также элементы технологического шантажа со стороны государств потребителей нефти, пытающихся убедить нефтедобывающие страны в своей способности обойтись и без их ресурсов. Немалую роль в спекуляциях на эту тему играет заинтересованность в дотациях и грантах со стороны сельскохозяйственного и научного лобби развитых стран, а также прессы во всевозможных «научных» сенсациях, генерируемых «неофициальной наукой» и энтузиастами-любителями. Все это способствовало тому, что альтернативная энергетика прочно заняла одно из ведущих мест не только в популярных, но и в научных изданиях.⁶ Во всяком случае число посвященных ей научных публикаций и специализированных журналов в разы превышает соответствующие числа для реальной энергетики, дающей в ~40 раз больший вклад в обеспечение мира энергией. То же относится и к финансированию научных исследований в области энергетики. Несопоставимость объемов финансирования и реальной отдачи научных исследований в области традиционной и альтернативной энергетики наглядно иллюстрируют соот-



Рис. 1. Распределение затрат на финансирование исследований в области различных источников энергии из Федерального бюджета США в 2005 г. (см.¹).

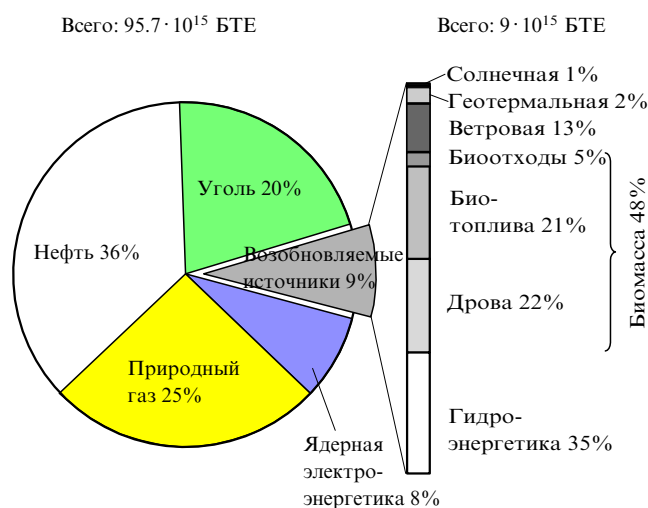


Рис. 2. Диаграмма энергобаланса США в 2011 г. (см.¹). Вклад источников округлен до целых значений; БТЕ — Британские тепловые единицы.

ветствующие данные для крупнейшей и наиболее передовой в этой области мировой державы — США, представленные на рис. 1 и 2. Безусловно, новые научно-технические направления всегда более привлекательны для специалистов. Но ведь большинство средств идет не на фундаментальные исследования, открывающие новые горизонты науки, а на сугубо прикладные работы, потенциал практического применения которых ограничен, если вообще реализуем.

Конечно то, что человечество не может вечно рассчитывать на ископаемое углеводородное топливо, создавшее нашу техногенную цивилизацию и до сих пор остающееся основой ее существования, очевидно. Но как долго это продлится, когда закончится «углеводородная цивилизация» и что придет ей на смену — по этим вопросам мнения различных групп специалистов сильно расходятся.⁷ К сожалению, при анализе тенденций развития энергетики, этой сугубо материальной сферы человеческой деятельности, эмоции, житейский опыт и даже фантастические представления всегда играли и продолжают играть не меньшую роль, чем в других областях, вызывающих массовый интерес. Иногда эти эмо-

ции и представления, порой противоречащие здравому смыслу и даже законам природы, серьезно влияют на развитие отдельных отраслей энергетики, а также связанных с ней областей науки и технологии.

Являясь одним из главных потребителей современных достижений мировой науки и постоянно аккумулируя все передовые и перспективные технологические решения, энергетика, в силу своих масштабов, остается одной из наиболее консервативных технологических отраслей. Массовая смена базовых технологий в энергетике, как правило, требует десятилетий. Поэтому в отличие, например, от информационных технологий, в которых новые идеи и технические решения способны изменить рынок буквально за один–два года, в энергетике даже последствия крупнейших технологических революций в массовом масштабе реализуются десятилетия спустя. Такой консерватизм делает достаточно надежными прогнозы состояния энергетики по крайней мере на ближайшие 20–30 лет, пока не будет исчерпан технический ресурс уже построенных и строящихся крупных энергетических объектов. Именно это позволило нам проследить в данном обзоре среднесрочные тенденции развития мировой энергетики и использования базовых и перспективных энергетических ресурсов исходя прежде всего из реальных ограничений, накладываемых фундаментальными законами природы на чрезмерно оптимистические прогнозы энтузиастов.

Несмотря на наличие определенной дистанции между химией как областью естествознания и энергетикой как областью техники, мы надеемся, что для читателей журнала «Успехи химии» настоящий обзор будет интересен, поскольку постановка многих химических, химико-технологических и материаловедческих задач инициирована проблемами энергетики.

При работе над обзором авторы использовали крупнейшие мировые базы данных и обновляемые источники информации в области энергетики, такие как *The Outlook for Energy: A View to 2040*, *International Energy Outlook*, *Statistical Review of World Energy*, *The ITER Organization Homepage* и др., в которых публикуются материалы авторитетных международных организаций — Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA), Департамента энергетики США (United States Department of Energy, DOE), независимого Агентства в составе статистической системы США (Energy Information Administration, EIA), компании «Бритиш Петролеум» (British Petroleum Company, BP), европейской ассоциации солнечной энергетики (European Photovoltaic Industry, EPIA) и др. Приведенные в обзоре расчеты и

численные значения показателей, не содержащие ссылок на первоисточники, получены авторами на основании анализа литературных данных и собственных оценок. Они являются оригинальной информацией, за которую авторы несут полную ответственность.

II. Современное состояние энергетики

Прежде чем делать какие-либо прогнозы, кратко рассмотрим состояние энергетики и ее масштабы. Основу современной энергетики составляют пять главных первичных источников: нефть, уголь, природный газ, гидроэнергетика и атомная энергетика, к которым в последнее время добавились и возобновляемые источники энергии (ВИЭ) (табл. 1, рис. 3). Под возобновляемыми обычно понимают большую группу природных и биосферных источников энергии, не связанных с необратимым использованием минерального энергетического сырья. Производство подавляющей части потребляемой энергии обеспечивают ископаемые энергоресурсы, доля которых в мировом энергобалансе превышает 85% (см. табл. 1).

Как видно из рис. 3, в течение ближайших десятилетий в энергетике не ожидается каких-либо драматических изменений. Производство энергии на базе всех существующих источников будет увеличиваться, при этом объемы потребления нефти, угля и природного газа будут больше, чем в настоящее время, хотя произойдет определенное перераспределение их относительного вклада в мировую энергетику. В основном это будет связано с постепенным снижением доли нефти за счет повышения доли природного газа.

Таблица 1. Доля основных источников в мировом производстве первичной энергии в 2014 г. (<http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>) (см.^a).

Источник энергии	Доля в мировом энергобалансе, %
Нефть	32.6
Уголь	30.0
Природный газ	23.7
Гидроэнергетика	6.8
Атомная энергетика	4.4
Прочие ^b	2.5

^a Обсуждаемые в обзоре данные, представленные в таблицах и на рисунках, могут быть перемещены правообладателями сайтов в архив сайтов. ^b В том числе ВИЭ.

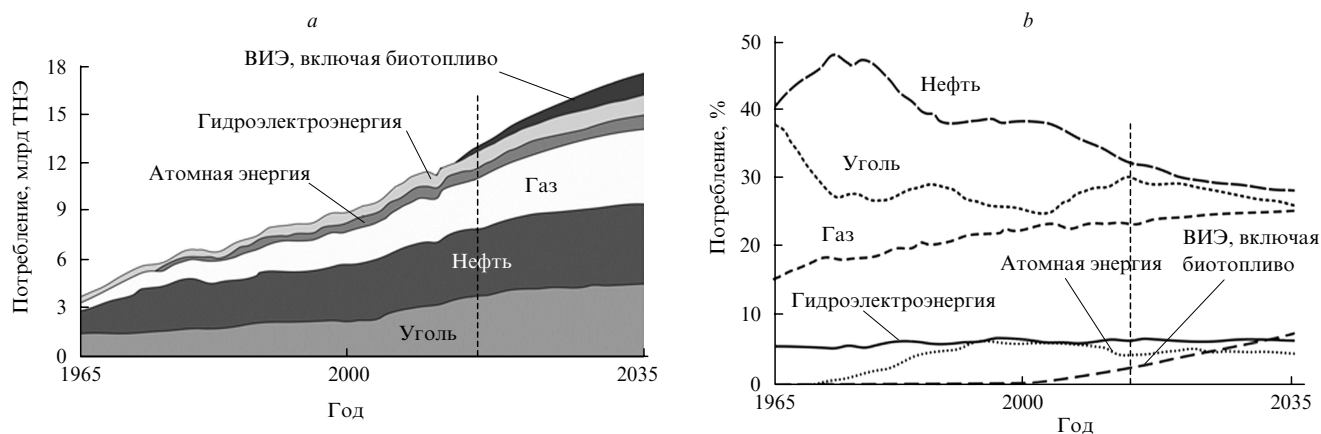


Рис. 3. Текущее и прогнозируемое потребление различных видов первичных энергоресурсов в мировой энергетике (ТНЭ — тонны нефтяного эквивалента) (см. сайт <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>).

В настоящее время главной энергетической проблемой является снижение доступности и, соответственно, доли в мировом энергобалансе важнейшего и наиболее удобного ископаемого энергоресурса — жидких углеводородов. Производимые из них продукты, в первую очередь моторные топлива и полимерные материалы, составляют основу современной цивилизации. Однако ресурсы нефти в земной коре ограничены, и, видимо, уже не так далеко время, когда она станет дефицитом. Фактически закат нефтяной эпохи уже наступил, и даже можно четко указать время начала этого процесса. В 1985 г. впервые объем мировой добычи нефти превысил объем ее вновь открываемых ресурсов, т.е. началось безусловное сокращение доступных запасов нефти.⁸ К сожалению, политики осознали последствия этого важнейшего для мировой экономики события лишь двадцать лет спустя, уже в ходе энергетического кризиса 2008 г.

Оценивая масштабы современной энергетики, целесообразно указывать не абсолютные величины, которые мало что говорят неспециалистам, а сравнивать их с природными энергетическими потоками и ожидаемыми изменениями в мировом энергопотреблении. Так, энергия, производимая человечеством в настоящее время, достигла $\sim 0.02\%$ от потока солнечной энергии, достигающей земной поверхности.⁴ Однако население мира обеспечено этой энергией крайне неравномерно. Подавляющая часть потребляемой энергии приходится на развитые страны. Только в США, где проживает всего 4% населения планеты, используют 20% мировых сырьевых и энергетических ресурсов. В то же время, согласно данным IEA, в современном мире 1.2 млрд человек все еще не имеют доступа к электроэнергии, а 2.7 млрд человек используют в основном биомассу (дрова) для отопления и приготовления пищи (см. сайт <http://www.iea.org/topics/energy-poverty/>). И в течение ближайших 30 лет эти числа практически не изменятся.

В зависимости от уровня экономического развития страны ежегодное потребление энергии (в пересчете на нефть) различается в десятки раз (табл. 2). Видно, что потребление в наиболее бедных странах в ~ 100 раз меньше, чем в наиболее богатых.⁹ По прогнозам, к концу текущего столетия население планеты удвоится, достигнув уровня 12–13 млрд человек,¹⁰ затем, возможно, стабилизируется. Поскольку потребление энергии (а следовательно, и уровень жизни) подавляющей части жителей Земли отстает от современного уровня потребления в развитых странах, то даже после стабилизации численности населения экономическая и политическая стабилизация в мире невозможна без хотя бы частичного сокращения разрыва в энергопотреблении между богатыми и бедными странами.

В связи с необходимостью ускоренного развития слабо-развитых стран в течение первой половины текущего столетия

Таблица 2. Ежегодное потребление энергии различными странами.⁹

Страна	Потребление (в пересчете на баррели нефти на одного человека)
США	65
Страны Западной Европы	50
Япония	33
Мексика	10 ^a
Бангладеш	0.8
Нигерия	0.7

^a Среднемировой уровень.

тия прогнозируется быстрый рост мирового потребления энергии на уровне 1.7% в год, а до конца века глобальное потребление энергии, видимо, вплотную приблизится к 0.1% от падающего на Землю потока солнечной энергии. Чтобы обеспечить всему человечеству современный уровень жизни, мировое производство энергии должно увеличиться почти в 100 раз, т.е. превысить 1% от потока падающей на Землю энергии Солнца. Но если это произойдет, то нарушится тепловой баланс планеты, и для его восстановления, согласно закону Стефана – Больцмана, средняя температура поверхности (~ 300 K) с учетом альбедо Земли должна повыситься также на $\sim 1\%$, т.е. на 2–3°C, что неизбежно вызовет климатическую катастрофу глобального масштаба. Причем повышение температуры произойдет независимо от способа получения энергии и значения концентрации парниковых газов в атмосфере, борьбу с увеличением которого считают главной задачей энтузиасты Киотского протокола. Именно в этом заключаются глобальная проблема будущей энергетики и истоки ожидаемого энергетического кризиса. Но эти вопросы уже выходят за рамки рассматриваемого нами среднесрочного прогноза.

Пока же мировая энергетика продолжает развиваться очень высокими темпами. Согласно данным ЕИА, ожидается, что за два десятилетия текущего века мировое потребление энергии возрастет на 59%. Увеличение произойдет, несмотря на ожидаемое значительное повышение эффективности использования энергии в расчете на единицу производимого внутреннего валового продукта (ВВП). Половина ожидаемого к 2020 г. прироста придется на развивающиеся страны, а основным источником энергии по-прежнему останется ископаемое топливо.

В этой связи нельзя не отметить, что в настоящее время именно повышение эффективности использования энергоресурсов и снижение удельных затрат энергии на единицу производимой продукции — наиболее эффективный способ среднесрочного решения энергетических проблем и снижения климатических последствий развития энергетики. Например, в последние годы в США при постоянном росте ВВП сумели практически стабилизировать потребление энергии. Это достигнуто в основном за счет того, что за последние 40 лет было почти вдвое уменьшено удельное потребление энергии на единицу производимого в стране ВВП (рис. 4).

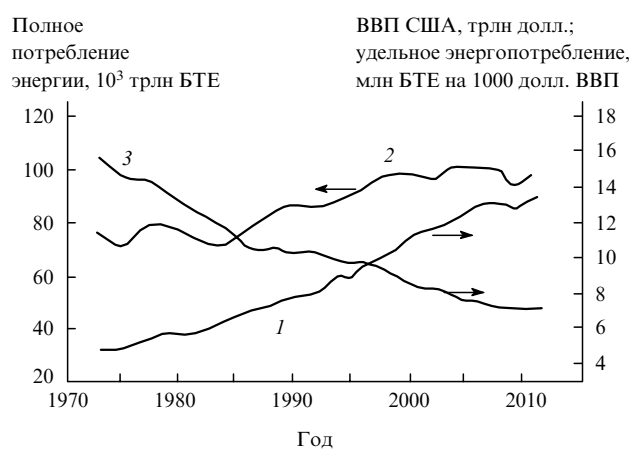


Рис. 4. Показатели эффективности использования энергоресурсов в США (по данным работы¹¹). 1 — ВВП, 2 — полное потребление энергии, 3 — удельное потребление энергии.

В настоящее время для всех ведущих стран мира характерна тенденция к заметному снижению темпов роста энергопотребления на единицу прироста ВВП, что позволяет ослабить зависимость мировой экономики от поставок ископаемых энергоресурсов и снизить воздействие энергетики на климатические процессы. Но в целом это лишь отодвигает неизбежное наступление периода истощения ископаемых ресурсов и дает нам дополнительное время для поиска глобального решения энергетических проблем.

Парадоксальность современной ситуации в энергетике заключается в том, что прогнозировать ее отдаленное будущее легче, чем более близкие перспективы. Большинство специалистов полагают, что, несмотря на огромные научно-технические проблемы, к концу текущего века (возможно, немного позднее) основным источником энергии станет термоядерный синтез. В распоряжении человечества даже в перспективе нет других альтернативных источников энергии такого же масштаба. Данный первичный источник в принципе уже технически освоен, правда, пока еще в неуправляемом режиме, на уровне термоядерной бомбы. Понятны основные закономерности этого процесса, и хотя проблема оказалась гораздо сложнее, чем представлялось на начальном этапе, вряд ли можно сомневаться в том, что со временем она будет решена.

Освоив управляемый термоядерный синтез, человечество на тысячелетия получит практически неисчерпаемый источник энергии (правда, при этом останется проблема нарушения теплового баланса планеты). По своей сложности проблема управляемого термоядерного синтеза превзошла все научно-технические задачи, с которыми столкнулось человечество в XX в. Только в 2025 г. во Франции планируется запуск международного экспериментального термоядерного реактора, а к экспериментам с дейтериево-тритиевой плазмой на нем приступят еще через 10 лет (см. сайт <http://www.iter.org/>). Оптимисты надеются, что демонстрационная термоядерная электростанция будет создана к середине текущего века. Это означает, что для массового потребителя термоядерная энергия станет доступной не ранее конца столетия. Поэтому предстоит решить серьезнейшую задачу — найти энергоресурсы, способные «заполнить» промежутки длиной почти в столетие до практического освоения термоядерной энергии. Цена неудачи в решении этой глобальной энергетической проблемы очень высока — неизбежное снижение уровня жизни населения Земли, а возможно, и сокращение его численности.

Так могут ли альтернативные источники заменить истощающиеся ископаемые энергоресурсы и обеспечить мировую экономику необходимым количеством энергии?

III. Критерии оценки источников энергии

Прежде чем сравнивать перспективы использования различных источников энергии и их способность удовлетворять потребности мировой экономики, необходимо определить наиболее важные для этого критерии.

III.1. Потребительские качества

Важнейшим критерием, определяющим мировой спрос на те или иные энергоресурсы, являются их потребительские свойства. Влияние потребительских качеств на перспективы использования энергоресурсов хорошо иллюстрирует изменение роли угля в мировой энергетике. Если в начале прошлого века его доля в мировом энергобалансе превышала 50%, то в настоящее время, несмотря на наличие практически во всех регионах мира огромных ресурсов угля, она сократи-

лась более чем в два раза. Причина этого — именно низкие потребительские качества угля, прежде всего неудобство использования твердого топлива на транспорте, в быту и в промышленности. Немалую роль играют низкие экологические качества угля, сложность и высокая стоимость транспортировки, а также низкая рентабельность его конверсии в более удобные виды топлива.

Среди известных видов энергоресурсов вне конкуренции в отношении потребительских качеств находятся жидкие углеводороды — нефть. Уникальность нефти как энергетического и нефтехимического ресурса заключается в том, что благодаря жидкому агрегатному состоянию и высокому удельному энергосодержанию она обеспечивает наиболее высокую рентабельность при добыче, транспортировке и использовании по сравнению со всеми остальными ископаемыми источниками энергии. Кроме того, нефть относительно легко перерабатывать, а перечень получаемых из нее продуктов огромен. И в этом отношении с ней не могут сравниться ни газ, ни уголь, ни какие-либо другие источники энергии. Поэтому неудивительно, что как только были освоены технологии промышленной добычи и переработки нефти, она очень быстро заняла доминирующие позиции в мировой энергетике, а в 70–80-е годы прошлого века доля нефти в мировом энергобалансе доходила до ~50%. Нефть имеет вполне приемлемые экологические характеристики, и если бы не ожидаемый дефицит этого энергоресурса, проблема энергообеспечения вряд ли бы имела такую остроту.

Природный газ по своим потребительским свойствам занимает промежуточное положение между нефтью и углем. Это связано со сложностью его транспортировки и использования на транспорте, а также с высокими затратами на конверсию в более удобные жидкие энергоносители и многие химические продукты. К безусловным потребительским достоинствам природного газа относятся его наиболее высокие среди ископаемых топлив экологические характеристики, а также удобство использования в быту, промышленности и базовой тепло- и электроэнергетике.

За исключением биотоплив, практически все остальные возобновляемые источники энергии, в том числе гидроэнергетика, ветровая и солнечная, а также атомная энергетика вырабатывают исключительно электроэнергию, что не позволяет им по потребительским качествам на равных конкурировать с нефтью. Проблемы передачи электроэнергии на большие расстояния, ее трансформации в другие виды, использования на транспорте и во многих отраслях промышленности, необходимые для этого огромные капитальные вложения и неизбежные потери существенно снижают привлекательность таких источников для многих потребителей.

III.2. Ресурсная база

Учитывая огромные и быстро растущие потребности человечества в энергии, потенциальный объем запасов или ежегодно поставляемого объема энергии становится ключевым фактором оценки потенциальной значимости энергоресурса. Нет смысла анализировать глобальный потенциал источников, вклад которых в мировую энергетику принципиально не сможет превысить 1%, хотя, конечно, они могут играть существенную роль в локальной энергетике, и их техническое развитие, безусловно, необходимо.

III.2.a. Нефть

В настоящее время нефть является важнейшим природным ресурсом, определяющим состояние не только всей мировой энергетики, но и в значительной степени мировой геополити-

ческой ситуации. Цена нефти — важнейший индикатор, отражающий текущее состояние мировой экономики.

Ограниченность ресурсной базы — главный недостаток нефти, не позволяющий рассматривать ее как ведущий мировой источник энергии за пределами двух–трех ближайших десятилетий. Хотя до сих пор продолжаются споры между сторонниками органической и неорганической теорий происхождения нефти, большая часть ее разрабатываемых ресурсов, видимо, имеет все-таки биогенное происхождение. Поэтому можно считать, что современная мировая энергетика существует за счет своеобразных «энергетических консервов», приготовленных нам биосферой за ~300 млн лет ее эволюции, начиная с каменно-угольного периода. Запасы нефти громадны, но скорость ее потребления в миллион раз превышает скорость процессов ее естественного формирования в земной коре. За один год человечество расходует запасы, на образование которых природе потребовался примерно миллион лет. Поэтому со временем они неизбежно будут исчерпаны. Пик открытий нефтяных ресурсов был пройден еще в 70-х годах прошлого века (рис. 5). Основным объемом добываемой в настоящее время нефти получают из месторождений, которые были открыты десятки лет тому назад (рис. 6), и мы уже не можем рассчитывать на появление большого числа новых крупных месторождений.

Для поддержания уже практически не растущего вследствие сокращения ресурсов мирового объема добычи нефти требуются все более высокие затраты, т.е. каждый следующий баррель добытой нефти обходится мировой экономике дороже предыдущего. С 1973 по 2003 г. при росте мирового объема добычи нефти на ~60% затраты на ее добычу в фиксированных ценах выросли почти в 17 раз.¹³ В 2013 г. мировой объем затрат на добычу нефти достиг 700 млрд долл. Это объективная причина постоянного и неизбежного удорожания нефти и нефтепродуктов на мировом рынке. Эпоха легкодоступной и дешевой нефти уже завершилась.

Широко обсуждаемый в последние годы вопрос об общем объеме остающихся мировых ресурсов нефти является скорее технологическим, чем геологическим. Безусловно, в земной коре еще остались неоткрытые месторождения жидких углеводородов, но вряд ли их объем велик. Гораздо больший интерес представляет разработка уже известных ресурсов, расположенных в глубоководных морских акваториях или представленных различными видами трудноизвлекаемой либо тяжелой нефти. Помимо расширения объема ресурсов за счет геологоразведки, на количество потенциально извлекаемой из недр нефти влияют такие важнейшие факторы, как ее рыночная стоимость и прогресс в технологиях добычи. Даже с применением современных технологий из пласта

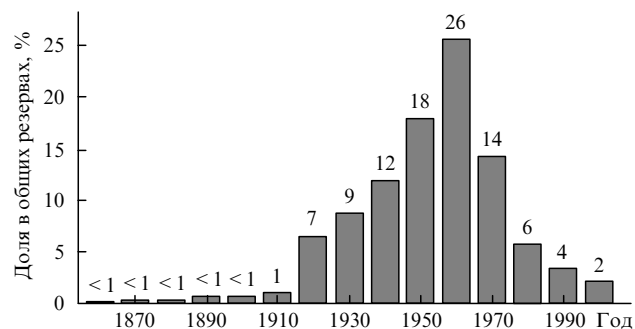


Рис. 5. Доля открытых в соответствующие периоды гигантских месторождений нефти в известных к настоящему времени резервах.¹²

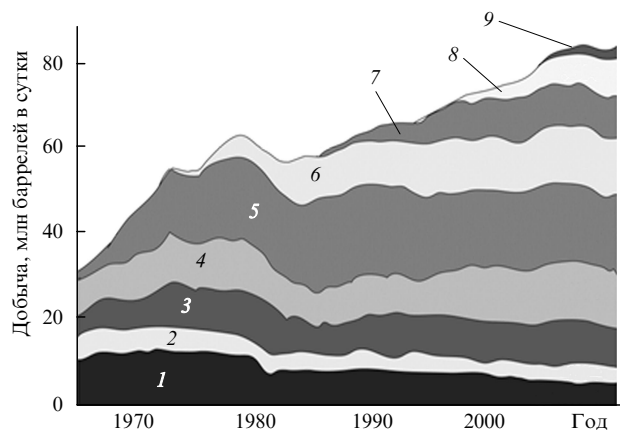


Рис. 6. Мировая добыча нефти из месторождений, открытых до 1930 г. (1), в 30-х (2), 40-х (3), 50-х (4), 60-х (5), 70-х (6), 80-х (7), 90-х (8) годах прошлого столетия, а также в начале XXI в. (9) (<http://www.slideshare.net/skurbatov/2012-the-outlook-for-energy-a-view-to-2040>).

извлекается менее половины содержащейся в нем нефти. Поэтому рост инвестиций в технологии добычи и применение новейших технологических достижений могут значительно повысить общую отдачу месторождений и тем самым увеличить ресурсы нефти, доступные мировой экономике.^{8, 14}

Что касается конкретного периода истощения нефтяных ресурсов, то прогнозы специалистов сильно различаются (рис. 7). Наиболее реалистичные прогнозы предсказывают достижение пика добычи (с учетом использования нетрадиционных и трудноизвлекаемых разновидностей нефти) в течение одного–двух ближайших десятилетий с последующим плавным снижением добычи, замедляющимся по мере появления новых технологий, которые повысят отдачу пластов. На явное приближение мировой добычи нефти к своему пику свидетельствуют и крайне низкие, несмотря на острую потребность в ней и постоянное увеличение затрат на добычу, темпы роста добычи — всего ~0.5% в год.

Многие нефтедобывающие страны уже прошли пик своей добычи, а в большинстве остальных период его достижения оценивается всего в несколько лет. По данным IEA, только в

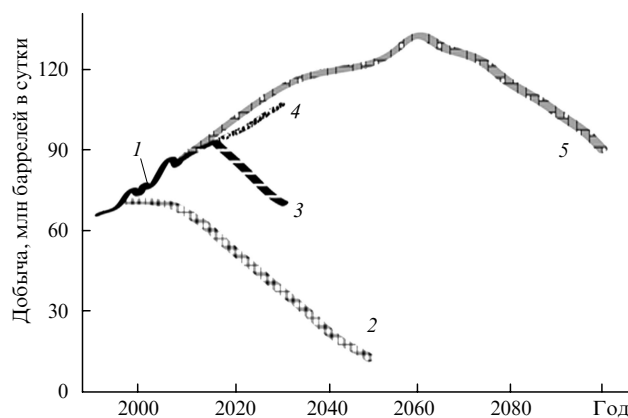


Рис. 7. Фактическая добыча (1) и прогнозы (2–5) мировой добычи нефти, сделанные в разные годы.¹⁵ Прогноз: 2 — С. J. Campbell, J. H. Laherrere, 1998 (США); 3 — S. Al-Husseini, 2015 (Саудовская Аравия); 4 — Министерство энергетики США, 2009; 5 — P. R. Odell, 2004 (Нидерланды).

двадцати ведущих нефтедобывающих странах прогнозируемое время полного истощения ресурсов (отношение общего объема ресурсов к годовому объему добычи) превышает 20 лет. Конечно, еще существуют огромные «нетрадиционные» ресурсы нефти, представленные в основном трудноизвлекаемыми и тяжелыми углеводородами, а также глубоководные и арктические ресурсы. Однако стоимость их извлечения и необходимые для этого затраты энергии столь велики, что далеко не всегда их добыча может быть экономически оправдана. Прогнозируемая оценка технически извлекаемых запасов сланцевой нефти и других ее нетрадиционных видов показала, что эти запасы велики, но явно не отвечают огромным потребностям человечества, которые возникнут уже в ближайшем будущем. Поэтому нефть, оставаясь самым удобным и привлекательным источником энергии, тем не менее постепенно вынуждена сдавать свои позиции.

III.2.6. Уголь

Запасы угля огромны и, по некоторым прогнозам, могут обеспечивать мировые потребности в энергии в течение нескольких столетий. В отношении ресурсной базы уголь по сравнению с нефтью имеет несравненное преимущество, которое, однако, в значительной степени нивелируется из-за его низких потребительских и экологических характеристик. Попытка создания экологически чистой угольной энергетики, предпринятая ~20 лет тому назад в США, на которую были затрачены огромные средства (см. рис. 1), оказалась экономически несостоятельной. В настоящее время доля угля в мировом энергобалансе постоянно снижается и, видимо, в течение текущего века будет оставаться на уровне 20% (или чуть выше). Основные причины, обусловившие снижение доли угля в мировой экономике, связаны с неудобством использования твердого топлива, трудностью автоматизации процессов его переработки, опасностью шахтной добычи, относительно низкой калорийностью, что делает нерентабельным перевозку угля на большие расстояния, и экологическими проблемами, возникающими при его использовании. До сих пор также не удалось решить проблему рентабельной конверсии угля в жидкое топливо, несмотря на почти столетнюю историю этих попыток. Практически все недостатки, свойственные углю как энергоресурсу, присущи и другим твердым горючим ископаемым, например горючим сланцам и торфу, использование которых в энергетике имеет только местное значение.

III.2.в. Природный газ

В настоящее время природный газ рассматривается как наиболее обильный и динамично развивающийся энергетический ресурс. В то время как мировое потребление нефти практически достигло своего пика, потребление природного газа продолжает быстро расти (рис. 8).

Основные геологически доказанные запасы традиционного природного газа сосредоточены в двух регионах мира — странах СНГ и на Ближнем Востоке. В качестве традиционных ресурсов природного газа рассматривают залежи с минимальными запасами 0.1 млрд м³ и начальным дебитом скважин > 30 тыс. м³ в сутки. Общее число месторождений с залежами свободного газа в мире превышает 17 000, и в более чем 30 000 чисто нефтяных месторождений газ присутствует в виде второстепенного компонента (нефтяной или попутный газ). Из 4500 крупных месторождений природного газа лишь несколько десятков, составляющих ~2% от их общего числа, относятся к категории крупных, дающих основной вклад в

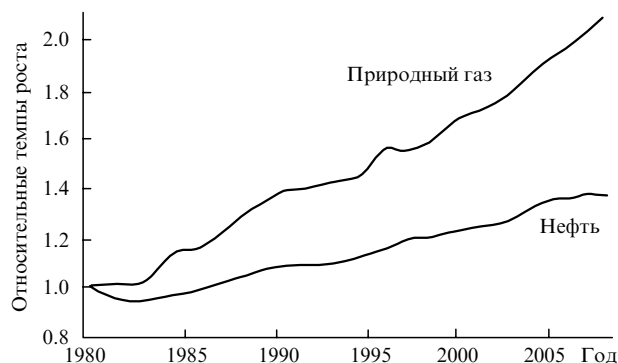


Рис. 8. Относительные темпы роста мирового потребления нефти и газа (за единицу принято мировое потребление в 1980 г.).¹⁶

поставки товарного природного газа для энергетики и химической переработки.¹⁷ Большая часть известных месторождений при существующих технологиях транспортировки и переработки природного газа может использоваться лишь для удовлетворения местных потребностей.

Мировой газовый потенциал (начальные потенциальные ресурсы традиционного природного газа) оценивается величинами от 350–420 трлн м³ (осторожные оценки) до 500–550 и даже до 1000 трлн м³ (см.¹⁸). Согласно статистическим данным, более 90% выявленных в мире залежей нефти и газа сосредоточены на глубинах до 3 км. Разведанность этого слоя очень высока, поэтому в будущем в нем будут открываться преимущественно мелкие залежи. К сожалению, это практически не учитывалось при создании современных технологий добычи, транспортировки и использования углеводородных ресурсов, ориентированных в основном на ресурсы крупнейших месторождений.

Максимальные темпы прироста традиционных ресурсов природного газа, как в свое время и ресурсов нефти, были достигнуты в 70-х годах прошлого века. А в начале текущего столетия, с задержкой в ~15 лет по сравнению с нефтяной отраслью, темпы мировой добычи традиционного природного газа сравнялись с темпом открытия новых крупных месторождений. Следовательно, добыча традиционного газа также приближается к своему пику. Но в последние годы большое внимание стали привлекать гигантские ресурсы нетрадиционных видов природного газа. В первую очередь это связано с тем, что были разработаны новые технологии их извлечения. Это позволяет рассматривать огромные ресурсы нетрадиционного природного газа как реально доступный резерв для развития мировой энергетики.

Известные механизмы образования в земной коре метана и других газообразных углеводородов^{19–23} обеспечивают их широкое распространение в природе не только в виде крупных залежей традиционного природного газа в пористых и трещиноватых осадочных породах или в растворенном виде в нефти. Огромное количество метана рассеяно в осадочных и изверженных горных породах, а также в илах озер, морей и океанов. Метан содержится в кристаллических сланцах, мраморах, гнейсах, гранитах и других горных породах, причем на каждый кубический метр породы приходится до 0.1 м³ метана. В небольших концентрациях метан находится в пресной и морской воде. Он входит в состав почвенного воздуха и земной атмосферы. Много метана растворено в пластовых водах, находящихся на глубинах 1.5–5 км. Такие источники природного газа, как метан угленосных толщ, водорастворенные газы подземной гидросферы, природные

газовые гидраты и ряд других относят к нетрадиционным ресурсам.

Важным источником практически чистого метана могут служить залежи каменного угля. Большие объемы метана выделяются в угольных пластах при метаморфизме угля, который сопровождается низкотемпературным термохимическим распадом органического вещества. Количество выделяющегося метана на одну тонну угольного вещества увеличивается от 161 м³ при образовании бурого угля до 192 м³ при образовании каменного угля.²⁴ Метан скапливается благодаря адсорбции в угле в вертикальных разломах и трещинах угольных пластов. При добыче из одной тонны угля выделяется 6–8 м³ газа. Так как мировые ресурсы угля составляют ~10⁴ млрд т, содержание газа в угольных залежах сопоставимо с его содержанием в традиционных газовых месторождениях. По разным источникам, в угленосных толщах угольных бассейнов мира содержится от 85 до 262 трлн м³ метана. Поэтому даже умеренная его добыча из угольных пластов может внести существенный вклад в обеспечение человечества природным газом.

Нетрадиционный угольный метан уже сейчас занимает заметное место в объеме газодобычи ряда стран. В США активная добыча угольного метана началась в 50-х годах прошлого столетия, ее годовой объем в настоящее время превышает 55 млрд м³, что составляет > 7% от общей добычи природного газа. Добыча угольного метана ведется также в Канаде, Австралии, Китае, Индии, Индонезии и в других странах. Предварительная дегазация угольных пластов — необходимое условие безопасной работы шахтеров и источник получения сопутствующего метана. Отечественными шахтами ежегодно выбрасывается в атмосферу > 7.5 млрд м³ метана, однако в промышленных масштабах его утилизация до сих пор практически не осуществляется.

К нетрадиционным источникам относится также биогаз (содержащий преимущественно метан), образующийся в результате бактериального брожения органического вещества. Однако в качестве основных нетрадиционных источников газообразных углеводородов в настоящее время рассматривают сланцевый газ и газовые гидраты. Создание в США в начале XXI в. промышленной технологии добычи сланцевого газа стало крупнейшим событием в мировой энергетике. До этого сланцевый газ даже не рассматривали как реально извлекаемый ресурс. Превращение огромных запасов сланцевого газа в доступное энергетическое сырье можно рассматривать как крупнейшую за последние полвека научно-техническую революцию. Это многократно увеличило мировые энергетические ресурсы и сняло, по крайней мере на несколько ближайших десятилетий, острейшую проблему глобального дефицита энергии.

Главное отличие месторождений сланцевого газа от месторождений традиционного газа в том, что они расположены на глубинах 1.5–2 км в слабопроницаемых осадочных породах, где собственно и протекает генезис (образование) газа. Из-за большой глубины залегания сланцевых пород и их слабой газопроницаемости разработка этих ресурсов потребовала решения нескольких сложнейших технических задач. Помимо освоения экономически эффективных технологий бурения глубоких скважин, потребовалось создание методов повышения притока газа к скважине и поддержания ее достаточно высокого дебита в течение продолжительного времени, необходимого для окупаемости затрат на глубинное бурение. Эти методы включают создание эффективных технологий горизонтального бурения на больших глубинах и гидравлического разрыва пласта, что в совокупности значительно увеличивает эффективную площадь газосбора и скорость диффузии газа к скважине. При гидравлическом

разрыве в пласт под большим давлением закачивают смесь воды, песка и различных химикатов. В ходе разрыва породы под действием давления в горизонтальной части скважины, длина которой достигает 1.5–2 км, образуется большое количество трещин, увеличивающих общую площадь газосбора. Песчинки закрепляют образовавшиеся трещины, не давая им «схлопываться» под действием пластового давления, а химические соединения, в основном поверхностно-активные вещества, увеличивают отдачу.

После гидроразрыва и выхода закачанной воды эффективная эксплуатация скважины может продолжаться нескольких лет, хотя уже в течение первого года дебит скважины уменьшается почти вдвое. В целом экономически эффективная эксплуатация скважины сланцевого газа продолжается всего несколько лет, что в разы меньше, чем в случае традиционного газа, добыча которого обычно ведется из ловушек, заполненных хорошо проницаемыми для газа пластами, перекрытыми сверху газонепроницаемыми породами, и может продолжаться несколько десятилетий. Однако если обнаружение больших ловушек с традиционным газом, куда он диффундировал в течение миллионов лет из слабопроницаемых материнских пород, — большая геологическая удача, то добыча сланцевого газа ведется по площадям путем последовательного бурения скважин через определенное расстояние,²⁵ т.е. добыча сланцевого газа может планомерно проводиться на огромных территориях, расположенных над зонами с газосодержащими сланцевыми породами.

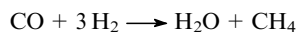
Тем не менее технология добычи сланцевого газа, на разработку которой американские компании затратили ~20 лет и миллиарды долларов, остается крайне сложной и дорогостоящей. Стоимость подготовки одной скважины к эксплуатации постепенно снижается и в настоящее время оценивается в ~5 млн долл., что позволяет американским добывающим компаниям поставлять газ на внутренний рынок по беспрецедентно низкой цене — порядка 120 долл. за 1000 м³. Это примерно в два–три раза ниже, чем цена газа в Европе и Японии.

Наибольший оптимизм в отношении будущего ископаемых источников внушают огромные залежи в земной коре газовых гидратов. Это твердые кристаллические нестехиометрические соединения с общей формулой $C_nH_{2n+2} \cdot mH_2O$, которые при повышенном давлении существуют и при положительных температурах. По структуре газовые гидраты — соединения включения (клатраты), образующиеся при внедрении молекул газа в полости кристаллических структур, составленных из молекул воды. Углеводороды с размерами молекул, большими, чем у изобутана, гидратов не образуют, так как не помещаются в полость, формируемую молекулами воды. При образовании гидрата метана один объем воды связывает 207 объемов метана, а при разложении 1 м³ гидрата метана при нормальных условиях выделяется 164.6 м³ газа.²⁶

Внешне гидраты метана выглядят как лед или плотный снег. Они широко распространены в природных условиях и образуют крупные залежи. На океанском дне даже при температуре 10°C уже на глубине 700 м давления достаточно для образования газовых гидратов. Мировые ресурсы газа в газогидратных залежах, сосредоточенных на материках, составляют ~10¹⁴ м³. А ресурсы газа в гидратном состоянии в акватории Мирового океана в пределах шельфа и материкового склона — ~1.5 · 10¹⁶ м³ (см.²⁶), хотя имеются и более высокие оценки. Энергия, выделяемая при разложении газовых гидратов, столь велика, что может инициировать тектономагматические процессы в литосфере Земли.

Закономерности распространения скоплений газовых гидратов, а также изотопно-геохимический состав газогид-

ратных газов и вод свидетельствуют о глубинном генезисе углеводородных газов, вошедших в состав газогидратов. Водород и углерод являются основными химическими элементами, поднимающимися из земных глубин к поверхности в процессе постоянной дегазации планеты. Водород диффундирует сквозь толщу земных пород в атомарном и молекулярном виде, а углерод — в химически связанном виде, в составе оксидов CO и CO₂. При температуре < 600 °C эти газы вступают в реакцию с образованием воды и метана



Вода входит в кристаллическую решетку гидросиликатов, а метан накапливается в виде газовых включений, в том числе газовых гидратов.

По некоторым оценкам, залегающий в плейстоцен-современных осадках газогидратный слой содержит не менее $11.3 \cdot 10^{18}$ м³ или $8.5 \cdot 10^{15}$ т метанового углерода; другие источники не дают столь высоких значений гидратоносности, оценивая их ресурсы в $2 \cdot 10^{16}$ м³. Тем не менее, в соответствии с приведенными оценками, более половины органического углерода в земной коре, видимо, содержится в составе газовых гидратов. Такой ресурс вдвое превышает все разведанные и неразведанные запасы нефти, угля и газа вместе взятые.²⁷ Особенно важно, что гигантские скопления метана содержатся в отложениях, сформировавшихся за последние пять миллионов лет, т.е. метан, который находится в этих скоплениях, выделился за время, составляющее примерно одну тысячную долю от времени существования планеты.

Имеются сведения более чем о 100 газогидратных залежах, а потенциальные мировые запасы газа в гидратном состоянии, по оценкам специалистов, превышают $16 \cdot 10^{12}$ ТНЭ. Около 98% газогидратов сосредоточено в акваториях Мирового океана на глубинах 200–700 м, в придонных осадках толщиной ~400–800 м, и только 2% — в приполярных частях материков. Однако и этот ресурс заслуживает внимания, поскольку соответствует 300 трлн м³ газа, что в полтора раза превышает его мировые разведанные запасы. При современном уровне потребления выявленные запасы газа в гидратном состоянии в США могут обеспечивать потребности страны в течение 104 лет. Все большее число стран, включая США, Канаду, Индию, Китай, Японию, принимают национальные программы по исследованию газогидратов и поискам их залежей. В результате были открыты гигантские скопления газогидратов и газогидратные провинции, однако остаются сложности с созданием технологий, делающих извлечение метана из газогидратов не просто возможным, но и рентабельным.

Таким образом, в земной коре имеются огромные ресурсы природного газа, к тому же постоянно пополняемые за счет продолжающихся процессов дегазации нашей планеты. Основные проблемы использования этого огромного потенциала связаны с созданием технологий, позволяющих извлекать такой газ при приемлемых финансовых и энергетических затратах и технологических усилиях. Наличие различных видов природного газа в земной коре иллюстрирует рис. 9. По мере нарастания «нетрадиционности» природного газа, с одной стороны, увеличивается его объем в земной коре, но с другой — усложняются технологии извлечения и возрастают необходимые для этого затраты.

Как видно, человечество располагает огромными ресурсами природного газа (табл. 3). Некоторые виды этих ресурсов еще плохо изучены, но независимо от конкретных оценок очевидно, что они очень велики, и при всех разумных сценариях развития нашей цивилизации их хватит еще на десятки, а то и на сотни лет.

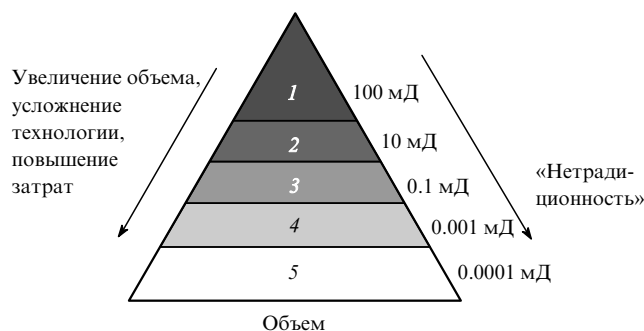


Рис. 9. Различные виды природного газа в земной коре. Вид: 1 — традиционный газ, 2 — газ плотных пород, 3 — угольный метан, 4 — газовые гидраты, 5 — сланцевый газ. Числа — проницаемость пород, вмещающих соответствующий вид газа, в миллиардах.

Таблица 3. Годовая добыча, ресурсы природного газа и дегазация планеты по состоянию на 2014 г. (см.¹).

Ресурсы	Значение, трлн м ³
Годовая добыча	3.5
Ресурсы	
доказанные	209
прогнозируемые	280
Угольный метан	260
Сланцевый газ	400 — 700
Газовые гидраты	20 000
Дегазация планеты	~ 1

Конечно, добыча нетрадиционных видов газа сложнее и дороже добычи традиционного газа. Но по мере выработки наиболее удобных месторождений увеличивается и себестоимость добычи традиционного газа. Как и при добыче нефти, возникает необходимость освоения все более сложных для извлечения и потому более дорогостоящих ресурсов. Однако это не драматическое скачкообразное удорожание, а плавный и, увы, неизбежный переход к освоению все более дорогостоящего сырья.

Себестоимость добычи сланцевого газа в США уже ниже себестоимости добычи традиционного газа в Европе, что позволяет прогнозировать прибыльность его экспорта в этот регион. А сравнивая его с ресурсами традиционного природного газа в России, необходимо понимать, что они в значительной степени представлены арктическими ресурсами, себестоимость добычи которых может быть существенно выше себестоимости добычи сланцевого газа на территории США или других стран, а их транспортировка на рынки Европы или Азии дороже транспортировки в эти же регионы газа из США.

Доля нетрадиционного газа (газа плотных коллекторов и угольных пластов) уже превышает 15% от общемировой газодобычи и имеет явную тенденцию к росту, возможно, до 40%. В настоящее время его общая ресурсная база оценивается в ~100 лет текущего мирового потребления газа. По оценкам, к 2030-м годам природный газ станет крупнейшим первичным источником энергии, что будет означать окончание почти столетней эры доминирования нефти.

По сути запасы сланцевых углеводородов являются первичными по отношению к традиционным запасам. Они распределены по территории Земли достаточно равномерно,

поэтому общедоступны. А совокупные ресурсы нетрадиционного газа превосходят даже перспективные потребности человечества, по крайней мере, в том временном диапазоне, в котором их можно прогнозировать. До последнего времени единственным препятствием для их использования было отсутствие соответствующих технологий добычи. Однако в отношении сланцевого газа этого препятствия уже не существует, и, видимо, в ближайшее время оно будет преодолено и в отношении других нетрадиционных ресурсов. Возникает закономерный вопрос: сможет ли природный газ заменить в мировой энергетике и, что более важно, мировой экономике в целом, безусловно, более удобную нефть, особенно в таких ключевых областях, как транспорт и нефтехимия?

Что касается транспорта, то уже несколько десятилетий существуют промышленные технологии конверсии природного газа в жидкие углеводороды, т.е. синтетическую нефть и жидкие моторные топлива. Проблема обеспечения сырьем современной нефтехимии не столь остра. Если исключить производство моторных топлив, то остальная нефтехимия потребляет всего лишь ~5% добываемой нефти, так что удовлетворять ее потребности будет проще. Кроме того, в последние годы бурно развивается новая отрасль — газохимия, способная производить все то огромное разнообразие продуктов, которое дает современная нефтехимия.

III.2.г. Атомная энергетика

Атомная энергетика также относится к источникам, использующим ископаемые природные энергоресурсы — изотоп ^{235}U . Его содержание в природном уране составляет всего 0.6–0.7%. При современном уровне развития атомной энергетике и экономически приемлемой стоимости производства до 80 долл. за 1 кг U_3O_8 время истощения запасов ^{235}U оценивается всего в ~50 лет. Даже переход на крайне дорогостоящие и сложные реакторы-размножители (бридеры), повышающие степень использования природного урана в 60–80 раз за счет превращения в ядерное топливо и основного изотопа урана ^{238}U , не позволяет рассчитывать на атомную энергетiku как на долговременный источник энергии для человечества. Не используемый пока значительный резерв урана составляет морская вода, в которой средняя концентрация карбонатного комплекса уранила $3.3 \cdot 10^{-6} \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$.

В настоящее время на долю атомной энергетике приходится ~4.4% вырабатываемой в мире первичной энергии, т.е. немногим меньше, чем на гидроэнергетику. В производстве электроэнергии их доля значительно выше: примерно шестая часть мирового и третья часть европейского производства электроэнергии приходится на атомную энергетiku. А в ряде стран (во Франции, Словакии, Бельгии, Швеции, Швейцарии) атомная энергетика доминирует в производстве электроэнергии. По состоянию на 2014 г. в мире насчитывалось 439 энергетических реакторов общей мощностью 376.8 ГВт; еще 67 реакторов находилось в стадии сооружения. Больше всего атомных электростанций (104 энергоблока) эксплуатируется в США, на втором месте Франция (58 энергоблоков), на третьем — Япония (50 энергоблоков). В России работают 10 атомных электростанций (33 энергоблока). Мировым лидером по доле атомной энергетике в общей выработке электроэнергии (~77%) является Франция.

Итак, имеющихся на Земле ресурсов ископаемых источников вполне достаточно, чтобы удовлетворять потребности мировой энергетике по крайней мере в течение XXI в., но за этот период им должна быть подготовлена реальная замена.

III.2.д. Гидроэнергетика

Ресурсная база гидроэнергии рек, к сожалению, ограничена. На основе данных о средней высоте земной поверхности над уровнем моря и среднегодовом количестве выпадающих осадков легко оценить полное количество энергии, которое можно получить за счет этого источника. По оценкам IEA, общий технически реализуемый потенциал мировой гидроэнергетики составляет 14 000 ТВт·ч в год. Из них ~8000 ТВт·ч в год рассматриваются как экономически обоснованные. В настоящее время гидроэнергетические мощности величиной ~808 ГВт либо эксплуатируются, либо находятся на стадии строительства с предполагаемым ежегодным совокупным объемом генерируемой энергии ~7080 ТВт·ч. Таким образом, с учетом географических факторов и неизбежных потерь в процессе преобразования энергии на Земле уже задействована основная часть реально доступного потенциала гидроэнергетики. Большая часть ее оставшегося потенциала приходится на страны Африки, Азии и Латинской Америки. За счет этого потенциала развитие гидроэнергетики будет продолжаться, однако его доля в мировом энергобалансе существенно не увеличится.

III.3. Себестоимость производства энергии

Важнейшим параметром, влияющим на решение о строительстве того или иного энергетического объекта, является стоимость производимой им энергии, которая в свою очередь зависит от стоимости сырья, применяемого энергетического оборудования и сроков его эксплуатации. При расчете себестоимости необходимо учитывать затраты на приобретение сырья, строительство всех необходимых объектов для получения энергии и на ее транспортировку потребителю, эксплуатационные расходы в течение всего срока работы оборудования, расходы на его демонтаж и утилизацию после завершения эксплуатации — т.е. все затраты на получение энергии в течение полного жизненного цикла данного энергетического объекта.

Для сравнения экономической эффективности различных источников электроэнергии используют величину нормализ-

LCOE, евро за 1 кВт·ч

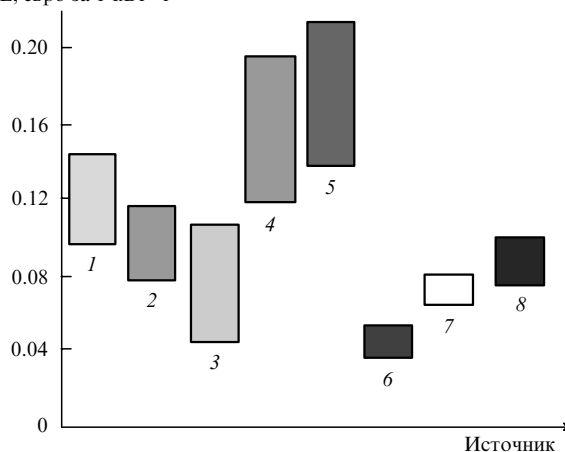


Рис. 10. Нормализованная стоимость производства электроэнергии на основе различных источников (https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source#Cost_factors).

1 — солнечные панели, 2 — солнечные батареи, 3 — ветроэнергетика, 4 — ветроэнергетика на море, 5 — биогаз, 6 — уголь (лигнит), 7 — твердый уголь, 8 — природный газ, парогазовый цикл.

зованной стоимости получаемой электроэнергии (Levelized Cost of Electricity, LCOE), которая определяется как стоимость капитальных и операционных расходов на получение электроэнергии в течение всего жизненного цикла оборудования, деленная на полный объем энергии, полученный за этот период. Фактически величину LCOE можно рассматривать как ценовую границу безубыточности поставки данного вида энергии. Именно этой величиной определяются экономическая эффективность использования различных источников электроэнергии, их реальная привлекательность для потребителя. Значения этой величины для разных источников электроэнергии приведены на рис. 10.

III.4. Энергетическая эффективность. Показатель EROEI‡

Реальная энергетическая отдача источника — еще один важный аспект, который, к сожалению, редко обсуждают энтузиасты альтернативных видов энергетики. Чтобы получить энергию из любого источника, всегда требуются определенные затраты на обеспечение самого процесса выработки энергии. Очевидно, что энергия, затраченная на добычу, транспортировку и переработку сырья, получение и преобразование энергии, изготовление и обслуживание оборудования должна быть меньше энергии, поступающей к потребителю. Поэтому отношение полезной энергии к затраченной на ее получение можно рассматривать как некий аналог КПД, но не для отдельного процесса, а для всей энергетической цепочки. В такой цепочке должны быть учтены все процессы, например, для нефтяной отрасли — «от нефтяной скважины до автомобильного колеса». Это отношение показывает энергетическую эффективность данного источника энергии. Показатель EROEI должен учитывать все затраты — на производство, обслуживание в течение всего времени эксплуатации и утилизацию отработавшего свой срок оборудования, которое использовалось для получения, преобразования и транспортировки энергии, на восстановление и рекультивацию нарушенных природных объектов, на ликвидацию последствий аварий и компенсацию экологического ущерба окружающей среде. Если для некоторого источника энергии $EROEI < 1$, то такой ресурс превращается в потребителя энергии, поэтому не может рассматриваться как ее первичный источник.

Экономика всегда стремится в первую очередь использовать энергетические ресурсы с наиболее высоким значением EROEI, поскольку они дают больше энергии при меньших затратах. Но по мере истощения высококачественных невозобновляемых ресурсов приходится переходить на ресурсы с меньшими значениями EROEI. Например, когда была начата промышленная добыча нефти, то энергии, содержащейся в одном барреле, в среднем было достаточно, чтобы найти, извлечь и переработать 100 баррелей. За прошедшее столетие произошло постепенное снижение до 20–30 баррелей при добыче традиционной нефти и до 3–5 баррелей при добыче тяжелой нефти (рис. 11), т.е. при добыче тяжелой нефти уже ~20–30% содержащейся в ней энергии идет на обеспечение самого процесса добычи и ее первичной подготовки.²⁸

Постоянное увеличение затрат энергии на добычу и переработку традиционных энергоресурсов приводит к доста-

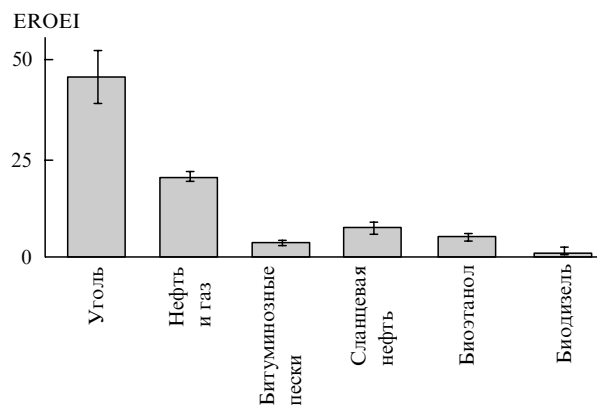


Рис. 11. Средние значения параметра EROEI для различных видов топлива.²⁸

точно быстрому снижению показателя EROEI в мировой энергетике (рис. 12).

Разумеется, при сопоставлении различных источников энергии помимо EROEI необходимо учитывать и многие другие параметры: надежность, доступность, удобство использования, энергонасыщенность и др. Например, нефть энергонасыщенна и легко транспортируется, а энергия ветра непостоянна и производится локально. Но в любом случае при понижении коэффициента EROEI основных источников становится труднее получать энергию, и ее относительная стоимость повышается. Таким образом, EROEI является крайне (если не наиболее) важным показателем при сравнении энергетических альтернатив. Анализ значений показателя EROEI различных источников энергии и его изменений со временем (рис. 13) позволяет понять, почему непрерывно увеличивается себестоимость энергоресурсов и поставляемой энергии и почему базисом мировой энергетики являются ископаемые топлива, а не солнечная энергетика, имеющая EROEI лишь немного больше единицы.

Для выработки энергии требуются значительные производственные усилия и энергетические затраты. Со снижением EROEI получение одного и того же количества чистой энергии занимает все большую долю экономики, поэтому непрерывное снижение данного показателя вследствие истощения наиболее эффективных невоспроизводимых ресурсов — одна из серьезнейших экономических проблем. По оценкам, пороговое значение EROEI, при котором человечество еще может продолжать свое развитие, находится в

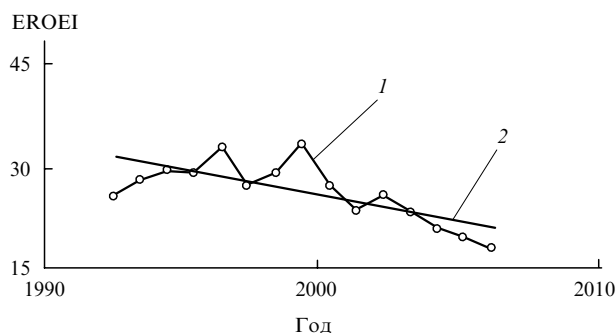


Рис. 12. Тенденция изменения EROEI для мировой добычи нефти и газа.²⁸
 1 — мировые значения для нефти и газа, 2 — общий тренд для нефти и газа.

‡ Аббревиатура EROEI от Energy Return On Energy Invested (отношение энергии полученной к энергии затраченной), часто сокращаемая до EROI — Energy Return On Invested, пока не имеет устоявшегося русскоязычного аналога.

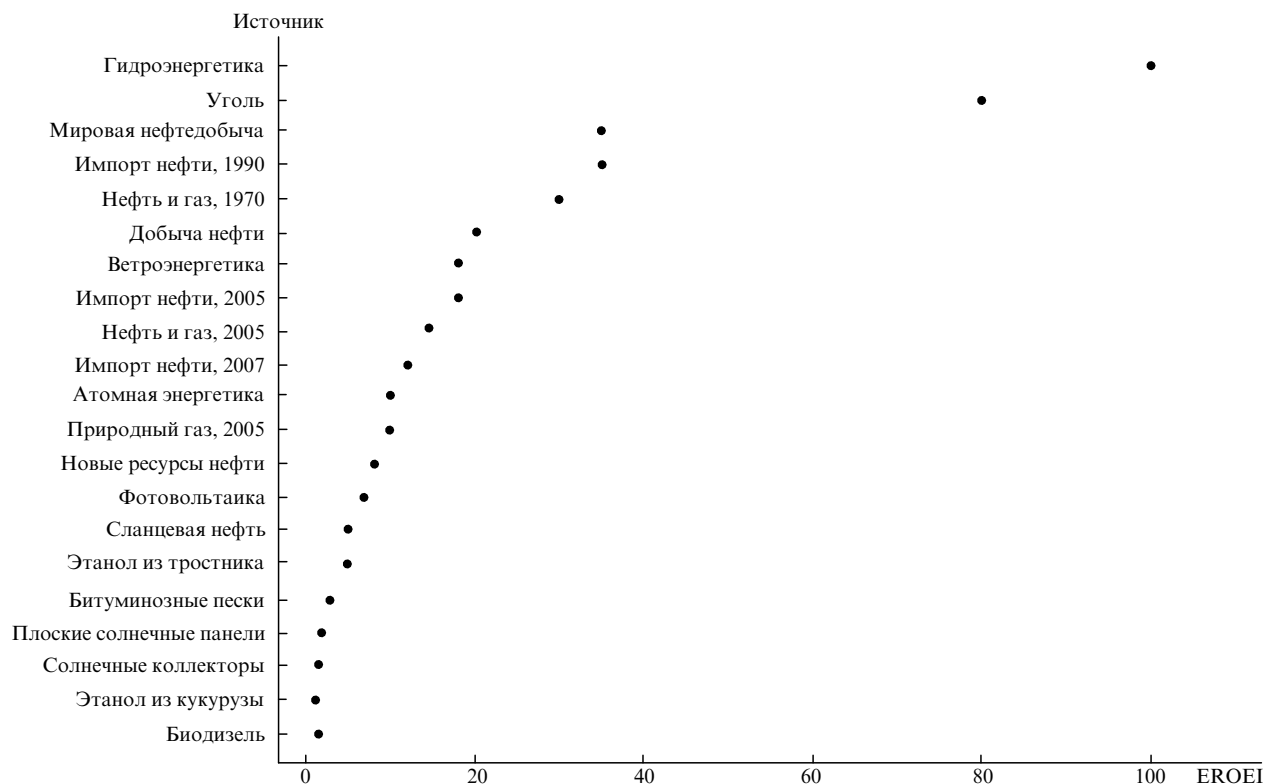


Рис. 13. Изменение показателя EROEI для различных источников энергии в США по мере истощения наиболее эффективных ресурсов (<https://ru.wikipedia.org/wiki/EROEI#CITEREFMurphyHall2010>).

районе 3 (чистый выигрыш энергии всего 200%), что однозначно исключает биотопливо, да и солнечную энергетику для которых EROEI лишь немного выше единицы (см. рис. 13), из числа перспективных источников энергии.

III.5. Плотность потока энергии

Когда энтузиасты начинают сравнивать поток падающего на Землю солнечного излучения, энергию, переносимую в атмосфере нашей планеты воздушными массами (ветром), энергию приливов или объем биомассы, производимый ежегодно биосферой, с современным потреблением энергии мировой экономикой, то создается впечатление о доступности колоссальных ресурсов. Однако далеко не всякую и далеко не всю энергию можно использовать. И одним из наиболее важных параметров, определяющих практическую применимость различных источников, является плотность потока переносимой энергии.

Количество энергии, рассеянной в окружающем нас пространстве, действительно огромно. Но как ее извлечь? История физики хранит множество хитроумных проектов получения энергии «из ничего», разбившихся о «гранит» второго закона термодинамики. Альтернативные источники энергии не нарушают этот закон. Но, как правило, используемая ими энергия относится к категории низкопотенциальной, т.е. с низкой удельной плотностью энергии в единице используемого энергоносителя (источника энергии). Чтобы представить себе, как отличаются низкопотенциальная (в изобилии рассеянная в окружающем нас пространстве) и высокопотенциальная энергия (используемая в традиционной энергетике) достаточно сравнить, например, поток энергии при дуновении ветерка, или тепла, переносимого ласковыми солнечными лучами, с потоком концентрированной энергии в камере сгорания газовой турбины либо в атомном реакторе.

Именно проблема концентрирования рассеянной низкопотенциальной энергии, которой оперируют все альтернативные источники, является главным препятствием на пути их промышленного использования.

III.6. Стабильность поставки энергии

С точки зрения потребительских свойств различных источников немаловажное значение имеют предсказуемость и стабильность поставки энергии. Без этого невозможно современное энергоемкое промышленное производство. В противном случае необходимо создание крайне дорогих систем аккумулирования энергии, стоимость которых в некоторых случаях может значительно превышать стоимость самих источников энергии. Нестабильность и непредсказуемость поставки энергии — принципиальный недостаток, присущий всем альтернативным источникам, включая гидроэнергетику. Зависимость от природных, погодных и климатических факторов не позволяет прогнозировать объем производства энергии, вынуждая потребителей резервировать мощности на основе традиционных источников или создавать аккумулирующие системы, а часто то и другое одновременно.

III.7. Экологические характеристики источников энергии

Наряду с себестоимостью производимой энергии важнейшим фактором, влияющим на развитие различных первичных источников, является экологическая безопасность. Этот фактор в значительной мере определяет тенденции развития энергетики и вклад различных источников в мировой энергобаланс. Экологические последствия применения традиционной энергетики на основе ископаемых источников — одни из главных объектов ее критики. Если локальное негативное

влияние современной теплоэнергетики на окружающую среду в значительной мере удастся преодолеть благодаря постепенному переходу с угля на природный газ, а также к более совершенным технологиям сжигания топлива и очистки дымовых газов, то глобальное влияние углеводородной энергетики на климат остается предметом жарких дискуссий. Борьба с эмиссией парниковых газов и связанным с ней антропогенным влиянием на климатические процессы во многих странах возведена в ранг национального приоритета.

Безусловно, климат планеты в последние годы меняется, однако до сих пор, несмотря на огромный объем проведенных в этой области исследований и затраченных средств, так и не было предоставлено убедительных доказательств того, что именно антропогенное воздействие (в частности, углеводородная энергетика) является причиной этих изменений.^{29, 30} Более того, существует вполне обоснованное мнение крупнейших отечественных специалистов в области климатических процессов,^{31, 32} что именно растущий выброс мировой энергетикой диоксида углерода в атмосферу позволил предотвратить глобальную экологическую катастрофу, связанную с естественной для текущего геологического периода тенденцией снижения концентрации CO₂ в атмосфере и обусловленной этим угрозы глобального понижения температуры земной поверхности вплоть до полного оледенения планеты. С этой точки зрения можно только сожалеть о непродолжительности «углеродной эпохи» в истории цивилизации. Во всяком случае оценки показали, что даже полное использование всех углеводородных ресурсов планеты не повысит температуру ее поверхности сверх температуры в те теплые геологические периоды, которые уже были в ее истории и отличались особенно благоприятными условиями для развития биосферы.

Что касается атомной энергетики, то в настоящее время в некоторых странах ведется дискуссия (активно поддерживаемая различными «зелеными» движениями) о возможности и даже необходимости ее замены различными альтернативными источниками. Однако атомная энергетика — надежный, технологически зрелый и дешевый источник, обеспечивающий значительную долю базового потребления электроэнергии, — практически не дает прямых выбросов вредных веществ, в том числе парниковых газов, и идеально подходит для крупных электростанций, работающих в базовом режиме внутри больших энергосетей. Поэтому подавляющее большинство экспертов не сомневаются в необходимости дальнейшего развития атомной энергетики и сохранения за ней значительной доли в мировом производстве энергии.

По своим экологическим и экономическим показателям современная атомная энергетика опережает практически все остальные источники энергии. Себестоимость производства электроэнергии на атомных электростанциях (АЭС) ~ 1 цент за кВт·ч, что в 3–4 раза дешевле, чем на теплоэлектростанциях с углеродным топливом. Даже современные газовые электростанции с комбинированным циклом производят в три раза более дорогую энергию. Уменьшение стоимости единицы установленной мощности на АЭС до 1.1 долл. за кВт позволит снизить стоимость стандартного блока мощностью 1000 МВт до 1.1 млрд долл. Уровень радиоактивного загрязнения от обычной тепловой электростанции на угле в 1000 раз выше, чем от АЭС аналогичной мощности.^{33, 34} Однако очевидная необходимость развития отрасли и ее явные экономические преимущества не снимают негативного отношения к ней в ряде стран. Например, в Швеции, где доля атомной энергетики в производстве электроэнергии превышает 40%, продолжают настойчивые призывы к ее полному запрету.

Тем не менее не существует каких-либо документальных свидетельств об отмеченном где-либо в мире ущербе здоровью населения от штатной работы атомных станций. Типовой атомный энергоблок мощностью 1000 МВт производит в год ~ 30 т высокорadioактивных отходов и 800 т низко- и среднеактивных отходов, объем которых может быть значительно сокращен за счет концентрирования. Для сравнения, угольная электростанция мощностью 1000 МВт производит ежегодно 320 000 т золы, содержащей 400 т тяжелых металлов и радиоактивных материалов, не считая отходов, образующихся при добыче и транспортировке угля. С учетом всей производственной цепочки — от добычи сырья до производства электроэнергии — атомная энергетика производит в 100 раз меньше CO₂ и практически не наносит экологического ущерба окружающей среде. Таким образом, она уже сейчас позволяет сократить глобальную эмиссию CO₂ на 8% (~ 0.6 Гт углерода в год). Конечно, существуют определенные экологические проблемы при добыче урановой руды: отработанная порода сохраняет до 85% радиационного фона урана, территория загрязняется ядовитыми солями тяжелых металлов, покрывается пылью с высоким содержанием радиоактивных элементов. Значительно снизить ущерб, наносимый окружающей среде при добыче урана, позволяет метод подземного выщелачивания.

Несмотря на неоднозначное отношение к атомной энергетике общественности некоторых стран, требующей абсолютной гарантии своей безопасности, развитие атомной энергетики продолжается и, несомненно, будет продолжаться. По некоторым прогнозам, за период с 2000 по 2050 г. ожидается увеличение производства энергии этой отраслью в 14 раз. Переход к реакторам третьего поколения, а со временем и к разрабатываемым в настоящее время реакторам четвертого поколения позволит повысить их надежность, увеличить срок эксплуатации и снизить удельный расход топлива. Наиболее амбициозные планы в области атомной энергетики у Китая, России и Индии.

При оценке крупномасштабной генерации энергии необходимо учитывать воздействие на окружающую среду не только материальных видов загрязнения (парниковых газов, дыма, аэрозолей, золоотвалов, отработанных водных растворов, радиоактивных отходов), но и электромагнитных и звуковых полей, а также теплового загрязнения. Кроме того, для строительства энергетических сооружений требуется отчуждение значительных территорий, размер которых сильно колеблется в зависимости от типа источника энергии. Естественно, при анализе воздействия энергетики на природу необходимо учитывать ее влияние на биоценозы.

Для оценки последствий использования любого источника энергии недостаточно учитывать экологические характеристики только самого процесса получения энергии. Необходимо рассматривать и воздействие на окружающую среду сооружений, машин, устройств для производства энергоносителя и передачи энергии, а также технологий промышленного производства необходимых материалов и аппаратуры.^{35–37} Промышленное использование любого вида энергии требует создания соответствующих промышленных отраслей — добычи сырья, его переработки, изготовления, а затем и утилизации морально или физически устаревшего оборудования. Такая производственная деятельность не может быть полностью безотходной. Для полного устранения загрязнений и отходов любого промышленного процесса любой отрасли хозяйства требуются бесконечно большие расходы (рис. 14).

Для специалистов утверждение о нереальности полностью безотходных производств тривиально, однако регулярно появляются публикации, авторы которых призывают

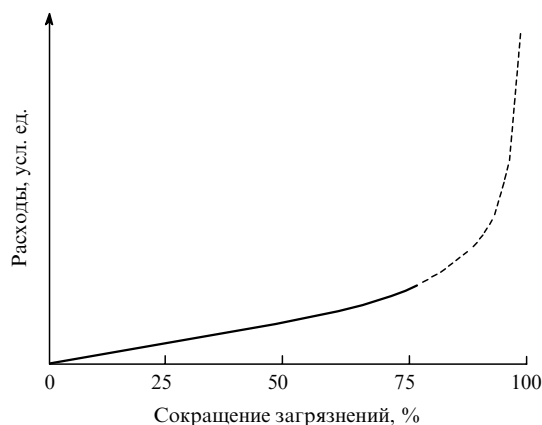


Рис. 14. Зависимость относительного уровня расходов от достигнутого уровня сокращения загрязнений.³⁷

выпускать, подобно природе, полностью безотходную продукцию. На самом деле в природе тоже нет абсолютного равновесия, и в ней также постепенно накапливаются отходы, способные приводить к грандиозным катастрофам планетарного масштаба. Наиболее известная глобальная катастрофа была связана с постепенным накоплением в атмосфере планеты кислорода — отхода жизнедеятельности первичной абиогенной биосферы, — что привело ~2 млрд лет тому назад к гибели большинства ее представителей. Но благодаря множеству видов в биоценозах и, соответственно, множеству устанавливаемых между ними обратных связей, формирующихся в течение миллионов лет, природе удается достаточно долго поддерживать почти равновесное состояние.

Современная цивилизация, несмотря на то что масштабы техногенной деятельности человека в последние десятилетия стали сравнимыми с масштабами геологических процессов, не способна обеспечить даже близкое подобие существующего в природе разнообразия и богатства связей между ее структурами. Для реализации принципа безотходности мировой промышленности необходимо, подобно природе, связать воедино все производственные процессы на Земле, замкнуть все материальные потоки в одну гигантскую материально-энергетическую систему. Фактически для этого потребуются замена биосферы искусственной «техносферой». Но все оценки показывают, что из-за несопоставимости количества технически возможных связей между элементами «техносферы» с количеством связей между элементами биосферы при любом серьезном сбое искусственная система выйдет из равновесия и погибнет.^{3,4}

Таким образом, производство любого энергетического оборудования является неизбежным дополнительным источником загрязнения окружающей среды, и использование даже очень чистого энергоресурса влечет за собой шлейф экологически проблемных технологий. Любой источник энергии в той или иной степени загрязняет окружающую среду, а широко распространенные представления об экологической безопасности возобновляемых источников и их способности предотвратить наблюдаемые климатические процессы не соответствуют действительности.

IV. Виды и принципиальные особенности возобновляемых источников

Понимание необходимости постепенной замены ископаемых углеводородных источников, а также опасения глобальных

климатических изменений, связанных с традиционной углеводородной энергетикой, стимулируют современный интерес к альтернативным возобновляемым источникам энергии. Возможность их более широкого использования в энергетике активно обсуждается уже свыше полувека. Наиболее важные из них — гидроэнергетика, энергетика на основе солнечного излучения, энергия ветра, морских приливов, геотермальная энергия, энергия биомассы (сельскохозяйственных продуктов, бытовых отходов, дров) и некоторые менее значимые источники. Использование возобновляемых источников энергии часто отождествляют с «новой эпохой», однако на самом деле большинство из них — это старые и достаточно хорошо отработанные методы получения энергии.

Если исключить из приведенного выше списка гидроэнергетику, которую, безусловно, следует рассматривать отдельно как один из старейших и наиболее развитых промышленных источников энергии, то в последние годы наблюдается бурный прогресс в использовании возобновляемых источников. Темпы роста производства энергии за счет ВИЭ значительно превышали темпы роста производства энергии на базе традиционных источников, что неудивительно, учитывая небольшой объем производимой ими до сих пор энергии и низкую мощность отдельных установок. Это позволяет на начальном этапе внедрения новой техники относительно легко и быстро наращивать объем производства. В настоящее время возобновляемые источники уже прочно заняли свою нишу — в секторе источников энергии небольшой мощности, локальных источников и как основа крупных распределенных энергосетей.

Тем не менее даже по самым оптимистичным оценкам их вклад (без гидроэнергетики) в глобальное производство первичной энергии не превышает 3% (см. рис. 3,б). Появляющиеся в последние годы в средствах массовой информации утверждения о том, что альтернативные и возобновляемые источники энергии в ближайшем будущем заменят истощающиеся ископаемые ресурсы и позволят решить экологические проблемы энергетики, к сожалению, основаны на недостаточно глубоком понимании реальных климатических и геосферных процессов. Велика и доля публикаций, связанных с лоббированием интересов определенных промышленных, сельскохозяйственных и научных групп, а также различных экологических движений. Учитывая определяющую роль энергетики в мировой экономике, огромный объем затрат, необходимых для создания новых технологий, и колоссальную стоимость энергетической инфраструктуры, очень важно представлять реальные возможности различных источников энергии, их технологические ниши и практические перспективы.

IV.1. Гидроэнергетика

Гидроэнергетика относится к старейшим источникам энергии (достаточно вспомнить о водяных мельницах и водяных приводах на первых промышленных мануфактурах), на долю которой приходится ~6% (см. рис. 3,б) мирового производства энергии. Современная гидроэнергетика обеспечивает производство 73.5% энергии от возобновляемых источников и ~20% всей электроэнергии в мире, что эквивалентно использованию почти 900 млн т нефти в год. Абсолютным лидером по выработке гидроэнергии на душу населения является Исландия. Высок также вклад гидроэнергетики в Норвегии, где доля гидроэлектростанций (ГЭС) в выработке электроэнергии достигает 98%, Канаде и Швеции. В Парагвае на гидроэлектростанциях вырабатывается 100% производимой в стране электроэнергии.

Наиболее активное гидростроительство с 2000-х годов ведет Китай, для которого гидроэнергетика — один из важнейших источников электроэнергии. В этой стране размещены до половины малых гидроэлектростанций мира, а также крупнейшая ГЭС «Три ущелья» на реке Янцзы с проектной мощностью 22.5 ГВт и строящийся крупнейший по мощности каскад ГЭС. Еще более крупная ГЭС «Гранд Инга» мощностью 39 ГВт планируется к сооружению международным консорциумом на реке Конго в Демократической Республике Конго (бывший Заир). В России гидроэнергетика, как и атомная энергетика, обеспечивает выработку ~16% всей электроэнергии в стране. В настоящее время мировая гидроэнергетика развивается быстрыми темпами, увеличивая свои мощности на ~2% в год.

Крупные ГЭС относятся к самым низкочастотным источникам электроэнергии. Причина этого заключается в том, что большинство гидроэлектростанций построены много лет тому назад, и их стоимость полностью амортизирована. Для новых крупных станций затраты на генерацию лежат в пределах 0.03–0.04 долл. за 1 кВт·ч. Примерно 5% мирового потенциала гидроэнергетики реализуется на ГЭС малой мощности. Технический потенциал малой гидроэнергетики в мире оценивается в 150–200 ГВт. Затраты на генерацию на малых гидроэлектростанциях (<10 МВт) оцениваются на уровне 0.02–0.10 долл. за 1 кВт·ч, причем минимальные затраты приходятся на регионы с высоким качеством гидроресурсов. После окупаемости высоких первоначальных затрат ГЭС могут генерировать энергию с еще меньшими затратами, так как обычно не требуется замены оборудования в течение 50 и более лет.

Озабоченность состоянием окружающей среды и социальные проблемы — основные препятствия на пути использования оставшегося мирового потенциала гидроэнергетики. Увеличение потребности в воде для различных нужд может ограничить развитие гидроэнергетики и сократить объем воды, доступной для существующих электростанций. При постройке плотин неизбежно образуются водохранилища, и вода, заливая огромные площади (особенно в случае равнинных рек), необратимо изменяет окружающую среду. Затопливаются поля, леса, выселяются с насиженных мест люди. Например, водохранилищем Красноярской ГЭС мощностью 6 ГВт (входит в десятку крупнейших ГЭС в мире, максимальный объем водохранилища 73.3 км³) было затоплено 120 000 га сельскохозяйственных земель, в ходе строительства было перенесено 13 750 строений.³⁸

Водоохранилища, необходимые для обеспечения равномерной работы ГЭС, вызывают изменение климата на прилегающих территориях на расстояниях до сотен километров и являются естественными накопителями загрязнений. В них развиваются сине-зеленые водоросли, ускоряются процессы эвтрофикации, что приводит к ухудшению качества воды. При сооружении водохранилищ нарушаются экосистемы и естественные нерестилища рыб. Подъем уровня воды перед плотинами ГЭС вызывает заболоченность местности, засоленность почв, изменения прибрежной растительности и микроклимата. Наглядной иллюстрацией неблагоприятных экологических последствий строительства ГЭС может служить Волга, превратившаяся в цепь слабопроточных мелководных озер. Ее энергетический потенциал практически исчерпан, а популяция русского осетра, который 100 лет назад нерестился в тысячах километрах вверх от устья, почти исчезла.

IV.2. Приливные электростанции

Приливные электростанции (ПЭС) можно рассматривать как специфическую разновидность гидроэлектростанций. Эксплуатация приливных электростанций считается экономически целесообразной в районах с приливными колебаниями уровня моря не менее 4 м. К сожалению, таких районов мало. Проектная мощность приливной электростанции зависит от характера прилива в районе строительства и от объема и площади приливного бассейна. Главный недостаток приливных электростанций заключается в том, что их строят только на берегах морей и океанов; к тому же ПЭС развивают не очень большую мощность, да и приливы бывают всего два раза в сутки.

Единственная в России экспериментальная Кислогубская ПЭС на Кольском полуострове, сооруженная в 1968 г., после десятилетнего простоя вновь введена в эксплуатацию. Мощность этой станции (высота прилива достигает 5 м) всего 400 кВт. Новые ПЭС планируется построить на берегах Белого и Охотского морей. На Мезенской ПЭС (Белое море) планируется создать первый в России полупромышленный энергоблок мощностью 10 МВт, а полностью введенная в эксплуатацию ПЭС может достигнуть мощности 20 ГВт. Рассматривается возможность строительства ПЭС в Пенжинской губе Охотского моря, где высота приливов доходит до 13 м, что является максимальным показателем для тихоокеанского побережья. Это позволяет проектировать электростанцию мощностью до 90 ГВт, которая в случае реализации проекта будет крупнейшей в мире. Однако таких уникальных мест на Земле немного.

С приливными станциями, как и с ГЭС, связаны серьезные экологические проблемы. Сооружение плотины приводит к увеличению амплитуды прилива. Даже при небольшом повышении амплитуды прилива произойдут значительные изменения в распределении грунтовых вод в береговой зоне, увеличится площадь затопления, нарушится циркуляция водных масс, изменится ледовый режим в части бассейна за плотинами и т.д. Влияют ПЭС и на климат, поскольку меняют энергетический потенциал морских вод, их скорость и территорию перемещения.

Сооружение плотины ПЭС способно вызвать и серьезные биологические последствия — вероятно нарушение нормального обмена соленой и пресной воды, а следовательно, изменение условий жизни морской флоры и фауны. В бассейне за плотинами работа станции будет оказывать воздействие на литораль — зону между высшей точкой затопления во время прилива и нижней, обнажающейся при отливе. Плотина может оказать вредное воздействие не только на местные сообщества рыб, животных и птиц, но и на мигрирующие виды. Например, по оценкам биологов, строительство плотины в Пенжинской губе нанесет непоправимый вред популяции охотоморской сельди.

При строительстве плотин в регионе с умеренным климатом возможно образование зон сероводородного заражения, подобных тем, что наблюдаются в заливах и бухтах с естественными порогами. Фиорды Скандинавского полуострова, имеющие естественный порог, служат классическим примером сероводородного заражения.

Следует отметить, что при эксплуатации крупной (несколько десятков гигаватт) приливной станции возможно торможение вращения Земли. Величина торможения будет очень мала, однако его экологические последствия непредсказуемы.

IV.3. Солнечная энергетика

Солнечная энергетика рассматривается как один из наиболее перспективных (если не самый перспективный) альтернативных источников энергии. Это единственный первичный источник возобновляемой энергии, поступающей на Землю, который обеспечивает энергией все вторичные источники, за исключением геотермальной энергии, не имеющей существенного глобального потенциала. Ресурс его огромен — верхней границы атмосферы Земли за год достигает колоссальный поток солнечной энергии — около $5.6 \cdot 10^{24}$ Дж. Эта величина в ~ 5000 раз превышает ежегодную потребность человечества в энергии. Правда, $\sim 35\%$ этой энергии атмосфера Земли отражает обратно в космос. Остальная энергия расходуется на нагрев земной поверхности, испарительно-осадочный цикл в атмосфере, формирование волн в морях и океанах, воздушных и океанских течений и ветра, а также на процессы фотосинтеза. В ходе всех этих процессов высокопотенциальная энергия солнечной радиации ультрафиолетового и видимого диапазонов превращается в низкопотенциальную энергию нагретой поверхности Земли (средняя температура земной поверхности $\sim 20^\circ\text{C}$), испускаемую нашей планетой в виде инфракрасного излучения обратно в космическое пространство.

Заметные успехи, достигнутые за последние годы в развитии солнечной энергетике, вызывают большой оптимизм у ее поклонников. Действительно, наряду с ветроэнергетикой солнечная энергетика — быстроразвивающаяся отрасль мировой индустрии (рис. 15) с ежегодным объемом капитальных затрат > 15 млрд долл. Технологическое развитие солнечной энергетике достигло такого уровня, что уже позволяет получать в год до $200\text{--}600$ кВт·ч энергии с 1 м^2 установленных солнечных коллекторов. В 2014 г. только в Европе (в основном южной) солнечными коллекторами выработано почти 100 млн МВт·ч, а общемировое производство энергии на основе солнечного излучения достигло 186 млн МВт·ч. По данным крупнейшего международного отраслевого объединения EPIA, общая мощность фотоэлектрических установок в 2014 г. достигла 179 ГВт.³⁹

Существуют два основных направления использования солнечного излучения в энергетике:

— фотовольтаика (фотоэлектрические преобразователи, фотовольтаические ячейки), основанная на преобразовании солнечного излучения непосредственно в электроэнергию за счет фотоэффекта;

— гелиотермальная энергетика, использующая солнечное излучение для нагрева рабочего тела, например воды, которое затем служит источником тепла или применяется для генерирования пара для привода паровых турбин.

За последние годы в области солнечной энергетике достигнуты впечатляющие успехи. Если в конце 60-х годов прошлого столетия стоимость фотоэлектрических панелей составляла $\sim 100\,000$ долл. за 1 кВт пиковой (максимально возможной) мощности, то в настоящее время их стоимость < 2000 долл. за 1 кВт. Однако при подсоединении панели к энергосети примерно такую же сумму необходимо затратить на дополнительное оборудование — арматуру, конвертеры и соединительные схемы. Стоимость получаемой электроэнергии зависит от интенсивности солнечного света. Так, в Средиземноморье стоимость фотоэлектрической электроэнергии составляет от 0.35 до 0.45 долл. за 1 кВт·ч. В наиболее благоприятных для этого регионах при использовании современных технологий и концентрировании солнечных лучей стоимость электроэнергии находится в диапазоне 0.10–0.15 долл. за 1 кВт·ч. Актуальной задачей является снижение в долгосрочной перспективе стоимости электроэнергии в системах с концентрированием солнечного излучения до уровня < 0.05 долл. за 1 кВт·ч.

В 80-х годах прошлого столетия был создан первый тонкопленочный фотоэлемент на основе недорогого аморфного кремния, что послужило толчком к резкому росту исследований в области солнечной энергетике. Кремниевые тонкопленочные элементы стали лидерами на мировом рынке: их доля составила 80% от объема продаж солнечных элементов. Благодаря удешевлению солнечных панелей за 50 лет стоимость выработки электроэнергии на основе фотоэлектрических элементов снизилась более чем в 30 раз. С каждым годом открываются все новые пути уменьшения финансовых расходов в данной области. В период с 2006 по 2008 г. новые энергоэффективные технологии позволили сократить расход кремния на 1 Вт установленной мощности с 10 до 8.7 г.

Переход к использованию гетеросоединений (гетероструктур) типа арсенида галлия и алюминия и применение концентраторов солнечной радиации с кратностью концентрации 50–100 позволяют повысить КПД с современных 20 до 35%. В 1989 г. был создан двухслойный элемент на основе двух полупроводников — арсенида и антимонида галлия. В этом элементе в первом прозрачном слое (арсенида галлия) поглощается и преобразуется в электричество видимый свет, а инфракрасная часть спектра, проходящая через этот слой, поглощается и преобразуется в электричество во втором слое (антимонида галлия). В итоге КПД составил 37%, что вполне сопоставимо с КПД современных тепловых и атомных электростанций.

Технологические инновации последних лет значительно расширили перспективы солнечной энергетике и позволили перейти к сооружению достаточно крупных энергоустановок, соответствующих промышленным электростанциям средней мощности. В настоящее время в основном строят солнечные термоэлектростанции (гелиотермоэлектростанции) одного из двух типов — башенного (рис. 16) и распределенного (модульного).

В башенных солнечных гелиотермоэлектростанциях используется приемник с полем зеркал (гелиостатов), обеспечивающих степень концентрации энергии в несколько тысяч раз. Солнечные лучи, отражаясь от множества зеркал, концентрируются в приемнике, размещенном на центральной башне. При этом применяется сложная система слежения отдельных гелиостатов за Солнцем, основанная на вращении зеркал вокруг двух осей и управляемая ЭВМ. Главными

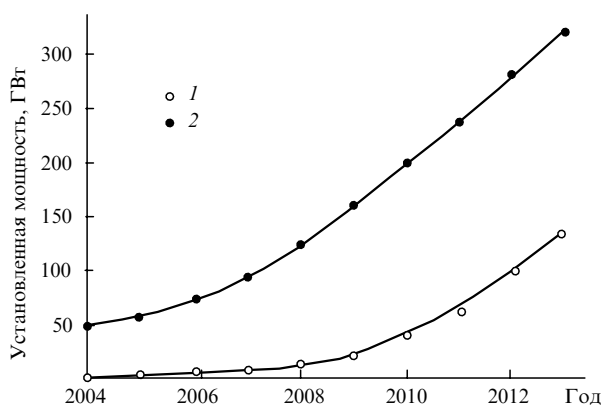


Рис. 15. Изменение установленных мощностей солнечных (1) и ветровых (2) энергоустановок в мировой энергетике в период с 2004 по 2013 г.⁴⁰

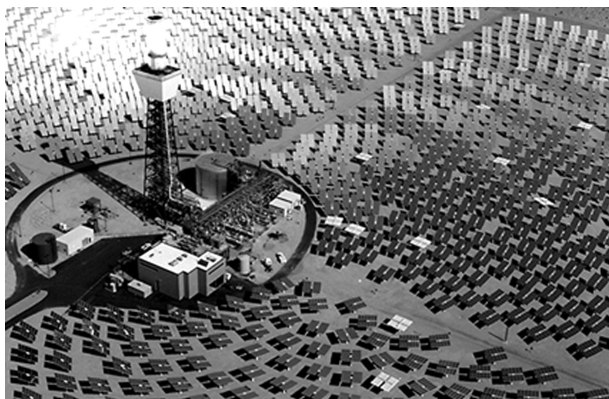


Рис. 16. Солнечная электростанция башенного типа (<https://yandex.ru/images/search?text=солнечные%20электростанции%20картинки>).

недостатками башенных солнечных электростанций являются их высокая стоимость и большая занимаемая площадь. Так, для размещения солнечной электростанции мощностью 100 МВт требуется площадь в 200 га, в то время как для АЭС мощностью 1000 МВт — всего 50 га.

Солнечные электростанции распределенного типа включают большое число отдельных модулей. Каждый модуль состоит из опоры, на нее крепятся параболический концентратор солнечного излучения и приемник, располагаемый в фокусе концентратора, который используется для нагрева рабочей жидкости. Нагретую рабочую жидкость подают в тепловой двигатель, соединенный с электрогенератором. При небольшой мощности солнечные электростанции модульного типа более экономичны, чем башенные. В солнечных электростанциях модульного типа обычно используют линейные концентраторы солнечной энергии с максимальной степенью концентрации ~ 100 .

К достоинствам гелиотермоэлектростанций можно отнести их способность к интеграции в традиционные тепловые электростанции. В качестве «солнечной топки» их можно интегрировать в традиционные тепловые циклы параллельно с камерами сгорания ископаемых видов топлива. Однако при стоимости энергии на современных солнечных электростанциях даже в наиболее благоприятных условиях 0.10–0.15 долл. за 1 кВт·ч солнечная энергетика остается слишком дорогостоящей, чтобы без субсидий быть конкурентоспособной на внутренних рынках. Поэтому цель ведущихся в настоящее время научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ заключается в снижении стоимости энергии до 0.05–0.08 долл. за 1 кВт·ч, а в долгосрочной перспективе и до уровня < 0.05 долл. за 1 кВт·ч.

Энергия солнечного излучения может быть преобразована в постоянный электрический ток и посредством солнечных батарей — устройств, состоящих из тонких пленок кремния или других полупроводниковых материалов. Преимущество фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) обусловлено отсутствием подвижных частей, их высокими надежностью и стабильностью. При этом срок службы ФЭП достаточно велик. Они имеют малую массу, отличаются простотой обслуживания, эффективностью использования как прямой, так и рассеянной солнечной радиации. Модульный тип конструкций позволяет создавать установки практически любой мощности, что очень удобно для потребителя. Недостатки ФЭП — высокая стоимость и низкий КПД.

Солнечные батареи являются основным источником энергопитания в космосе, а на Земле их используют в основ-

ном для энергоснабжения автономных потребителей мощностью до 1 кВт, питания радионавигационной и маломощной радиоэлектронной аппаратуры.

В США, занимающих ведущие позиции в области солнечной энергетики, реализуются несколько крупных проектов как на основе фотовольтаического преобразования излучения, так и на основе его теплового действия. Крупнейший проект — электростанция Ivanpah в пустыне Мохаве, после долгих лет строительства, тестирования и развития в 2014 г. была официально введена в строй. Она включает систему из 300 000 управляемых плоских зеркал, занимающих площадь ~ 16 км², которые концентрируют солнечное излучение на три одинаковые башни высотой по 140 м. В солнечных коллекторах, расположенных в верхней части башен, за счет тепла солнечного излучения вода превращается в водяной пар, который направляется на лопатки турбин, производящих электроэнергию, как в обычных ТЭЦ. По оценкам, этой энергии должно быть достаточно для обеспечения нужд 140 000 домохозяйств Калифорнии. У каждой башни свой центр управления, имеется также общий центр управления, который контролирует работу всей системы. Каждое из зеркал может изменять угол и направление наклона по команде из центра. Раз в две недели зеркала омываются. Вся система состоит из 22 млн отдельных деталей. Максимальная мощность станции составляет 392 МВт, а ее стоимость 2.2 млрд долл., что в несколько раз превышает стоимость тепловых электростанций аналогичной мощности.

С солнечной энергетикой связаны серьезные экологические проблемы. В случае гелиотермоэлектростанций сильно повышается температура окружающего воздуха. Так, более 300 000 зеркал упомянутой выше станции Ivanpah очень сильно нагревают воздух (температура коллекторов достигает 540°C), что приводит к гибели пролетающих птиц. При эксплуатации крупных фотовольтаических станций возможно существенное понижение температуры окружающего воздуха, вызывающее конденсацию водяного пара с образованием тумана и, как следствие, уменьшение прозрачности атмосферы и снижение КПД фотопреобразователей. Как было сказано выше, для сооружения крупных солнечных станций требуется отчуждение территорий, измеряемых десятками квадратных километров, что вынуждает проектировать такие предприятия исключительно в пустынях. Еще одной существенной проблемой солнечной энергетики является неблагоприятное экологическое воздействие промышленного производства зеркал и особенно материалов для фотовольтаических элементов. Получение кремния и арсенидов — опасные химические производства, и в обозримом будущем предстоит решить проблему безопасной утилизации этих материалов.

С учетом сказанного выше не исключено, что Ivanpah может стать последней электростанцией данного типа. Но главные проблемы солнечной энергетики — огромные удельные капитальные вложения и сложность используемого оборудования, многократно превышающие данные показатели для других источников, а также непостоянство и непредсказуемость количества производимой энергии.

IV.4. Ветровая электроэнергетика

Ветровая электроэнергетика, появившаяся еще в конце XIX в., в течение последних шести лет была наиболее быстро развивающимся видом возобновляемой энергетики, годовые темпы роста которой достигали почти 30% (см. рис. 15). К началу 2015 г. общая установленная мощность всех ветрогенераторов составила 369 ГВт, а количество произведенной ими электроэнергии достигло 3% от всей произведенной

электроэнергии. Более 30% установленных мощностей приходится на Китай, ~18% — на США и >10% — на Германию. За счет этого источника, в основном установок, размещенных в море вблизи побережья, Дания покрывает ~40% своих потребностей в электроэнергии, Германия — 8.6%, а Китай — 1.3%. Согласно планам дальнейшего развития ветроэнергетики, к 2020 г. мощность ветроэнергоустановок только в странах ЕЭС достигнет 180 ГВт. Однако столь высокие темпы, характерные для начального этапа освоения этого источника энергии, вряд ли удастся удержать. Наиболее продуктивные с географической и потребительской точек зрения районы расположения ветроэнергоустановок уже освоены, что ведет к закономерному падению темпов развития этого вида энергетики (рис. 17).

В ближайшие годы ожидается заметный технологический прогресс, в частности разработка турбин мощностью > 5 МВт (80% мировой ветроэнергетики приходится на турбины мощностью 1.5–2.5 МВт). Мощность ветрогенератора зависит от площади, ометаемой лопастями, и его высоты над поверхностью. Например, для турбины мощностью 3 МВт общая высота ветрогенератора составляет 115 м: высота башни 70 м и диаметр лопастей 90 м. Ветрогенератор начинает вырабатывать электроэнергию при скорости ветра $3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и отключается при скорости ветра $> 25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Вырабатываемая энергия пропорциональна скорости ветра в третьей степени; максимальная мощность достигается при скорости ветра $\sim 15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Наиболее перспективными районами для размещения ветрогенераторов считаются прибрежные зоны морских акваторий. Однако стоимость их сооружения по сравнению с сооружением на суше возрастает в 1.5–2 раза. Оффшорные ветровые электростанции обычно строят в море на расстоянии 10–12 км от берега. Их башни устанавливают на фундаменты из свай, забитых на глубину до 30 м. Энергия ветра, в отличие от энергии ископаемого топлива, практически неисчерпаема, доступна и более экологически чистая, однако сооружение ветровых электростанций сопряжено с определенными трудностями технического и экономического характера, замедляющими распространение ветроэнергетики. В частности, непостоянство ветровых потоков создает проблемы ненадежности производства электроэнергии. Но главное, ветроэнергетика остается одним из наиболее дорогих источников энергии: средняя удельная стоимость 1 кВт установленной (пиковой) мощности, вырабатываемой крупной современной ветровой наземной станцией, составляет

~1000 долл.; для морской станции этот показатель может быть на 35–100% выше. В стоимость не включены потенциальные затраты на интеграцию с энергосистемами и на создание мощностей по аккумулярованию энергии. Себестоимость производимой электроэнергии на лучших береговых электростанциях к настоящему времени снизилась до 0.03–0.04 долл. за 1 кВт·ч. При уменьшении средней скорости ветра резко увеличивается себестоимость электроэнергии. Существенные колебания себестоимости электроэнергии, получаемой от ветровой энергетики в разных странах и регионах (от 0.03 до 0.20 долл. за 1 кВт·ч), обусловлены различием электростанций, разбросом показателей капитальных затрат и средних скоростей ветра. Пока на большинстве рынков ветровая энергетика неконкурентоспособна, и лишь льготные тарифы для этого вида энергии позволяют смягчить ситуацию.

Необходимо отметить, что широко распространенное представление об экологической чистоте ветроэнергетики — заблуждение.^{41,42} Действительно, одна отдельно взятая ветроэлектростанция безобидна. Но при переходе к крупномасштабной генерации электроэнергии для строительства ветроэлектростанций требуются весьма значительные площади земли; для изготовления десятков тысяч ветряков необходимо создать новую отрасль промышленности (а любое промышленное производство сопряжено с экологическими проблемами). Возникает необходимость резко увеличить выпуск алюминия и(или) стеклопластика, а это весьма грязные производства. В недалеком будущем придется решать проблему утилизации физически и(или) морально устаревших агрегатов.

Еще одна важная проблема, связанная с использованием ветрогенераторов, — сильные вибрации их несущих частей, которые передаются в грунт. Значительная часть звуковой энергии (ветряк мощностью 250 кВт создает шум силой 50–80 дБ) приходится на инфразвуковой диапазон, а такая энергия негативно действует на людей и многих животных. Как показал опыт эксплуатации большого числа ветровых установок в США, этот шум не выдерживают животные и птицы, которые покидают район размещения станции, т.е. территории самой ветровой станции и примыкающие к ней становятся непригодными для жизни.

Вследствие работы ветровых генераторов в ряде стран нарушается прием телепередач в радиусе 1–2 км от генератора, так как частота вращения лопастей близка к частоте синхронизации сигналов телевидения. Ветровые генераторы являются также источниками радиопомех. Установки, построенные в районах сильных ветров (на горных хребтах, морском побережье), могут приводить к нарушению миграции птиц и перелету насекомых: модуляция ветрового потока лопастями создает некоторое подобие регулярных структур в воздухе, которые мешают ориентации. В Бельгии установили, что это приводит к нарушению устойчивости экосистем полей, расположенных в зоне ветровых установок, в частности, наблюдается падение урожайности.⁴³ Возможны и неустраняемые последствия крупномасштабного использования ветроэнергетики: воздушные потоки будут рассеиваться и ослабевать, изменится роза ветров, а следовательно, нарушатся климатическое равновесие, перенос тепла и влаги.

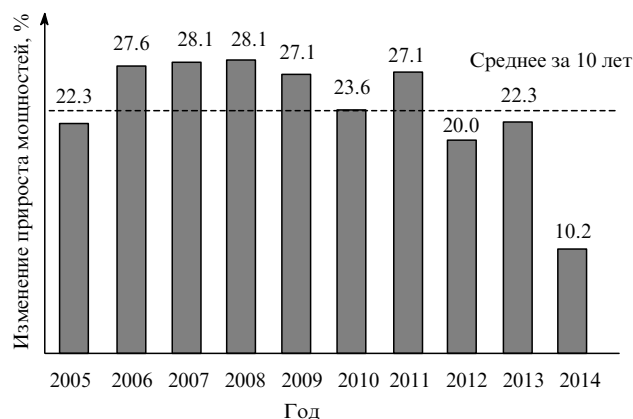


Рис. 17. Изменение прироста мощностей в мировой ветроэнергетике. (<http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>).

IV.5. Геотермальная энергетика

Геотермальная энергетика использует для производства электричества энергию, содержащуюся в недрах Земли. В вулканических районах вода, циркулирующая в подземных горизонтах, на относительно небольших глубинах перегревается выше температуры кипения, по трещинам подни-

мается к поверхности и иногда выходит в виде гейзеров. Доступ к подземным теплым водам возможен при помощи бурения скважин.

Более распространены сухие высокотемпературные породы, из которых энергия может быть получена при помощи закачки и последующего отбора из них перегретой воды. Высокие горизонты пород с температурой $< 100^{\circ}\text{C}$ располагаются и во многих геологически малоактивных районах, поэтому геотермальные источники широко используются в энергетике многих стран.

Геотермальная энергетика подразделяется на два направления — петротермальная и гидротермальная.

Петротермальная энергетика связана с глубинными температурами Земли. Средняя скорость повышения температуры с глубиной составляет $\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ на каждые 100 м. На глубине 5 км температура равна $\sim 125^{\circ}\text{C}$, а на глубине 10 км — $\sim 250^{\circ}\text{C}$. Чтобы получить энергию, бурят две скважины, в одну закачивают воду, которая, нагреваясь, попадает в смежную скважину и выходит в виде пара. Главная проблема данного вида энергетике — низкая рентабельность.

Гидротермальная энергетика основана на использовании перегретых подземных вод природных источников, расположенных во многих вулканических зонах планеты, в том числе на Камчатке, Курильских, Японских и Филиппинских островах, на обширных территориях Кордильер и Анд. Главным достоинством геотермальной энергии является ее практическая неиссякаемость и полная независимость от условий окружающей среды, времени суток и года. Воду или смесь воды и пара в зависимости от их температуры можно направлять для горячего водо- и теплоснабжения, для выработки электроэнергии либо одновременно для этих целей. Высокотемпературное тепло вулканических районов и сухих горных пород предпочтительно использовать для выработки электроэнергии, а устройство станции зависит от применяемого источника геотермальной энергии.

Большие объемы подземных термальных вод имеются на Северном Кавказе и в Закавказье, на Камчатке и в ряде других районов России. На 2006 г. в нашей стране было разведано 56 месторождений термальных вод с дебитом $> 300\,000\text{ м}^3$ в сутки. Ведется промышленная эксплуатация двадцати месторождений, среди них Паратунское (Камчатка), Черкесское и Казьминское (Карачаево-Черкесия и Ставропольский край), Кизлярское и Махачкалинское (Дагестан), Мостовское и Вознесенское (Краснодарский край). В настоящее время геотермальная энергетика обеспечивает 30% выработки электроэнергии на Камчатке (Мутновская, Паужетская и Верхне-Мутновская геотермальные электростанции).

Одна из экологических проблем, возникающих при использовании подземных термальных вод, заключается в необходимости закачивать отработанную воду обратно в подземный водоносный горизонт. В термальных водах содержится значительное количество солей различных элементов (бора, свинца, цинка, кадмия, мышьяка). Водяной пар содержит сероводород, аммиак, фенолы и радон, который вызывает радиоактивное загрязнение окружающей среды. Сброс отработанной воды в реки приводит к тепловому загрязнению и значительной опасности для гидробионтов. Из-за повышенной температуры уменьшается концентрация растворенного в воде кислорода — его уже недостаточно для многих рыб (например, форель живет только в холодной воде), а минеральные примеси угнетают водные организмы. Поэтому отработанную воду закачивают через специально пробуренные скважины обратно в земные недра. Но послед-

ствия этого приема при крупномасштабном производстве энергии прогнозировать трудно.

Отбор из скважин пароводяной смеси сопровождается выбросом в атмосферу пара и токсичных газов; расширяющийся при выходе на поверхность пар вызывает сильный шум. Влияние геотермальной тепловой электростанции на природу легко проследить на примере эксплуатации Паужетской станции: в радиусе двух–трех километров от станции торчат голые (без коры и листьев) стволы камчатской каменной березы, далеко слышен неумолкаемый рев выходящего на поверхность пара, а мощность станции всего 12 МВт, что почти в 5 раз меньше мощности главных турбин атомного ледокола «Арктика».

Потенциальная суммарная мощность геотермальных электростанций мира уступает суммарной мощности большинства станций на иных возобновляемых источниках энергии. Однако в силу достаточно высокой энергетической плотности геотермальная энергетика развивается в отдельных районах, где отсутствуют или относительно дороги горючие полезные ископаемые. В отличие от энергии, получаемой от нефти и угля, геотермальная энергия не нуждается в переработке или транспортировке на большие расстояния и обходится намного дешевле. В настоящее время геотермальное электричество производится в 24 странах, а суммарная установленная мощность геотермальных электростанций в мире в 2010 г. достигла 10.7 ГВт.

Геотермальная энергетика продолжает достаточно устойчиво развиваться, хотя и не такими быстрыми темпами, как солнечная и ветроэнергетика. Лидерами в этой области являются страны азиатско-тихоокеанского региона, на долю которых уже приходится 47.6% производимой в мире геотермальной энергии. На Северную Америку приходится 42.3%, а на Европу — 10%. Однако, несмотря на быстрые и устойчивые темпы развития геотермальной энергетике, существующей уже более ста лет, ее реальный потенциал слишком мал, чтобы внести существенный вклад в мировую энергетику.

IV.6. Энергия биомассы

Использование энергии биомассы наряду с солнечной энергетикой является основной надеждой тех, кто рассчитывает удовлетворять энергетические потребности человечества за счет возобновляемых источников. Во многих развивающихся странах значительную долю энергопотребления в бытовом секторе удовлетворяют, сжигая биомассу, в основном дрова и сельскохозяйственные отходы. Но в условиях глобального дефицита продуктов питания и постоянной деградации сельскохозяйственных земель рассчитывать на удовлетворение быстро растущих энергетических потребностей человечества за счет «зеленой энергетики» (по сути, за счет сельского хозяйства) нереально.⁴⁴ Конечно, это не исключает более широкого использования отходов биомассы и бытовых отходов для выработки энергии. Например, на территории современного городского района с населением 100 000 человек ежегодно образуется $\sim 40\,000$ т твердых горючих бытовых отходов, тепловая утилизация которых позволяет обеспечить половину жителей района горячей водой и снизить на 10–15% расход природного топлива.

Технологии получения энергии из биосырья достаточно разнообразны. Если оставить в стороне чисто бытовое применение древесного топлива (дров, древесных пеллет — прессованных мелких остатков деревообработки и т.п.), то все растительное сырье, реально или потенциально пригодное для использования в промышленной энергетике, принято делить на несколько поколений. Первыми начали использо-

вать традиционные сельскохозяйственные культуры с высоким содержанием жиров, крахмала, сахаров. Растительные жиры хорошо перерабатываются в биодизель — топливо для дизельных двигателей. Растительные крахмалы и сахара перерабатываются в этанол, который можно использовать как топливо для карбюраторных двигателей либо самостоятельно, либо как добавку к бензину, повышающую его октановое число. Однако помимо проблем, связанных с ведением интенсивного сельскохозяйственного производства (истощением почв, высокими затратами на их обработку, полив, удобрения и пестициды), изъятие даже части продовольственных культур с рынка пищевых продуктов непосредственно влияет на цену продовольствия для населения.

Непищевые остатки культивируемых растений, траву и отходы древесины относят ко второму поколению биосырья. Его получение связано с гораздо меньшими затратами, чем затраты на получение сырья первого поколения. Но при этом резко возрастают расходы на его сбор, подготовку и переработку. Такое сырье содержит в основном целлюлозу и лигнин. Его можно непосредственно сжигать (как это традиционно делают с дровами), газифицировать (получая горючие газы), подвергать пиролизу с образованием жидких и газообразных продуктов. Основные недостатки использования биосырья второго поколения — большие земельные ресурсы, занимаемые для его получения и относительно невысокая отдача с единицы площади.

В качестве биосырья третьего поколения рассматривают водоросли, при производстве которых не требуются земельные ресурсы, возможны большая концентрация биомассы и высокая скорость ее воспроизводства. Однако при использовании для этого природных водоемов могут возникнуть серьезные экологические проблемы из-за проникновения искусственно полученных организмов в окружающую среду. Наряду с выращиванием водорослей в открытых прудах возможно их выращивание в небольших биореакторах, расположенных, например, вблизи электростанций. Сбросное тепло тепловых электростанций способно покрыть > 70% потребности в тепле, необходимом для выращивания водорослей.

В настоящее время в ряде европейских стран рассматривается как перспективное направление (четвертое поколение биотоплив) производство биомассы путем культивирования фитопланктона в искусственных водоемах, создаваемых на морском побережье. В результате последующего метанового брожения биомассы и гидроксирования образующегося метана получают биотопливо — метанол. Основным доводом в пользу использования микроскопических водорослей является высокая продуктивность фитопланктона — до $100 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ в год. Кроме того, нет необходимости в использовании плодородных почв и пресной воды и нет конкуренции с сельскохозяйственным производством.

С точки зрения получения энергии применение данной биосистемы имеет существенные экономические преимущества по сравнению с другими способами преобразования солнечной энергии. Однако осуществлению подобных проектов пока не способствуют низкие цены на нефть.

Биотоплива могут быть твердыми, жидкими и газообразными. К твердым относятся древесина — традиционные дрова (часто в виде отходов деревообработки), топливные гранулы и пеллеты; к жидким — спирты (метанол, этанол, бутанол), эфиры, биодизель и биомазут, получаемые из растительного сырья; к газообразным — различные газовые смеси, которые состоят из метана, оксидов углерода, водорода и других газов, образующихся при термическом разложении биосырья в присутствии (газификация) и в отсутствие

(пиролиз) кислорода или при сбраживании биосырья под воздействием бактерий.

Помимо сельскохозяйственных продуктов, источниками сырья для получения биотоплива могут быть лигно-целлюлозные соединения, остающиеся после того, как использованы пригодные для пищевой промышленности части биологического сырья. Наряду с биологическими процессами брожения для получения биотоплив применяют пиролиз, позволяющий превратить биомассу в жидкость, которую легче и дешевле транспортировать, хранить и использовать. По некоторым оценкам, при существующих технологиях пиролиз отходов и бросовой биомассы может покрыть до 20% потребности Германии в автомобильном топливе, а к 2030 г., по мере технологического развития, ожидается, что этот показатель увеличится до 35% при себестоимости производства < 0.80 евро $\cdot \text{л}^{-1}$. Возможно также использование жидких продуктов пиролиза таких отходов, как сучья, пни, кора деревьев хвойных пород. При этом выход топливных фракций с тонны древесных отходов достигает 100 кг.

К наиболее широко используемым видам биотоплива относится биогаз — продукт сбраживания органических отходов (биомассы), представляющий собой в основном смесь метана и углекислого газа. Биомасса разлагается под воздействием бактерий класса метаногенов. При сбраживании куриного помета, отходов скотоводческих хозяйств, а также бытового мусора возможно получение биогаза, который на 70–80% состоит из метана, и может служить полноценной заменой природному газу.

В ряде стран, бедных энергоресурсами, например в Индии, биогаз активно используют в быту. Швеция, Германия и другие европейские страны реализуют проекты переработки отходов сельскохозяйственной продукции и деревообработки в биогаз с последующим получением электроэнергии и синтетических моторных топлив. Биогаз может стать существенным дополнительным источником углеводородного сырья, так как ежегодные воспроизводимые ресурсы биомассы в мире оцениваются в 200 млрд т.

Мировым лидером по использованию этого вида топлива является Китай. В 2008 г. в стране функционировало ~30 млн индивидуальных установок по производству биогаза, обеспечивающих топливом ~22% сельских жителей страны. Объем получаемого таким образом газа, по данным на 2005 г., составил ~6.5 млрд м^3 . Ценность подобной переработки отходов для развивающихся стран заключается в первую очередь в возможности обеспечить сельских жителей газом, необходимым для обогрева жилища и приготовления пищи. В развитых странах (например, в Германии) подавляющая часть биогаза поступает на электростанции. В последние годы подобное применение биогаза характерно и для Китая. Для утилизации своих отходов агрохолдинги строят небольшие тепловые электростанции, способные обеспечивать электроэнергией до 10 000 квартир.

Наконец, ряд микроорганизмов, например *Botryococcus braunii*, способны накапливать в процессе своей жизнедеятельности углеводороды (в основном изопrenoидные), составляющие до 40% от их общей сухой массы.

Большой интерес к биотопливу инициировал план бывшего президента США Дж. Буша, предложившего в 2007 г. сократить за 10 лет потребление бензина в стране на 20% за счет его замены биотопливом. Это позволило бы на 10% сократить потребление нефти в США. В соответствии с подписанным им законом об «Энергетической независимости и безопасности» (EISA, 2007), к 2022 г. предусматривалось производство 36 млрд галлонов (~100 млн т) этанола в год. При этом 16 млрд галлонов (~45 млн т) этанола должны получать из непищевого сырья — целлюлозы. В ходе

реализации этого закона уже построены более 200 заводов, которые производят ~45 млн т биоэтанола в год.

Использование биоэтанола в составе автомобильных бензинов действительно способствует снижению загрязнения воздуха транспортными средствами. Благодаря наличию атома кислорода в молекуле этанола бензин обогащается кислородом, что обеспечивает более полное сгорание топлива, снижение токсичности выхлопных газов и содержания в них твердых частиц. Кроме того, 10%-ная добавка этанола, имеющего октановое число 108, поднимает на 2–3 пункта октановое число топлива. Однако этанол является менее «энергосплотным» энергоносителем, чем бензин; пробег машин, работающих на топливе E85 (смесь 85% этанола и 15% бензина), на единицу объема топлива составляет ~75% от пробега машин на стандартном топливе. Для автомобилей с обычными двигателями можно использовать топлива, содержащие до 15% добавки этанола к бензину; на смеси E85 и чистом этаноле могут работать только специально адаптированные «гибкотопливные» автомобили.

В течение многих лет мировым лидером по производству и использованию биоэтанола в качестве автомобильного топлива была Бразилия, где его производят из сахарного тростника. Автозаправки в Бразилии предлагают E20 или E25 как обычный бензин, в котором число показывает содержание азеотропной смеси этанола и воды (96% EtOH + 4% H₂O).

Помимо биометанола и биоэтанола, в качестве перспективного биотоплива рассматривают биобутанол. Его стали производить в начале XX в. с использованием бактерии *Clostridia acetobutylicum*, но затем перешли на производство из нефтепродуктов. Бутанол не проявляет коррозионных свойств и может передаваться с использованием существующей топливной инфраструктуры. Он хорошо смешивается с традиционными нефтяными топливами, а теплотворная способность бутанола близка к теплотворной способности бензина. Сырьем для производства биобутанола могут быть сахарный тростник, свекла, кукуруза, пшеница, маниока, а в будущем и целлюлоза.

В европейских странах наиболее популярным видом биотоплива является биодизель на основе жиров животного, растительного и микробного происхождения. Сырьем могут быть рапсовое, соевое, пальмовое, кокосовое масло или любое другое масло-сырец, а также отходы пищевой промышленности и кулинарного производства. Разрабатываются технологии производства биодизеля из водорослей.

В 2010 г. мировое производство жидких биотоплив достигло 105 млрд л (~100 млн т), что составило 2.7% от мирового потребления топлива на дорожном транспорте. Было произведено 86 млрд л этанола и 19 млрд л биодизеля. По данным за 2013 г., несмотря на то что на производство биоэтанола в США потребовалось 42% всего урожая кукурузы, наблюдалось снижение объема его производства.⁴⁵ Доля США и Бразилии в мировом производстве этанола составляет ~90%. Пятерка ведущих стран-производителей биотоплива представлена на рис. 18.

В настоящее время интенсивность исследований в области технологий использования биомассы крайне высока.^{46–51} Наиболее активно совершенствуются процессы производства биоэтанола из сельхозотходов^{47–50} и различных типов водорослей.⁵¹ Важной и сложной проблемой остается более широкое применение лигнина.⁵² Внимание по-прежнему привлекают возможности смягчения антропогенного воздействия на атмосферные процессы за счет увеличения использования энергии биомассы,^{53–56} а также расширения спектра химических продуктов, производимых из биосырья.⁵⁷



Рис. 18. Доли в мировом производстве биотоплива пяти ведущих стран (по данным IEA, 2013).

О динамике производства биотоплива мировыми лидерами в этой области можно судить по данным, представленным на рис. 19. Как и для других видов альтернативных источников энергии, после периода бурного начального развития прослеживается явная тенденция к снижению темпов роста и даже к спаду, вызванная насыщением рынка, а главное, исчерпанием физических возможностей для экономически обоснованного увеличения объема продукции. Мировой рынок биотоплива уже достиг вполне солидного уровня, превысив рубеж в 100 млрд долл. По данным Федеральной службы государственной статистики РФ (Росстата), в 2010 г. российский экспорт топлива растительного происхождения (в том числе из соломы, жмыха, щепы и древесины) превысил 2.7 млн т. Россия входит в ведущую тройку стран экспортеров топливных пеллет на европейский рынок, но непосредственно в России потребляется всего ~20% произведенного биотоплива. Потенциальный объем производства биогаза в нашей стране оценивается в 72 млрд м³ в год, а возможное производство электроэнергии из него — в 151 200 ГВт·ч, тепла — 169 344 ГВт·ч. В 2012–2013 гг. в двадцати семи регионах России планировалось ввести в эксплуатацию более 50 небольших биогазовых электростанций с установленной мощностью от 350 кВт до 10 МВт, суммарная мощность которых > 120 МВт.

Использование в промышленных масштабах биомассы, как и любого другого источника энергии, влечет за собой негативные экологические последствия. Так, стремление увеличить посевные площади под плантации технических куль-

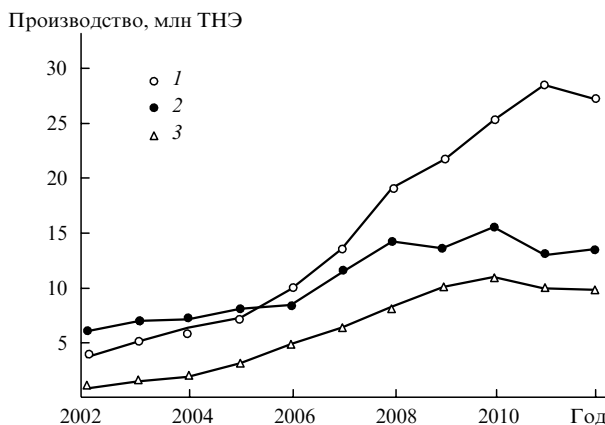


Рис. 19. Мировое производство биотоплива мировыми лидерами (по данным IEA).
 1 — США, 2 — Бразилия, 3 — страны Евросоюза.

тур повлекло за собой уничтожение влажных тропических лесов. В Индонезии и Малайзии расширение плантаций масличных пальм для увеличения производства пальмового масла привело к тому, что подавляющее большинство лесов в 80-х–90-х годах прошлого столетия было вырублено. Аналогичная ситуация в Бразилии, где для плантаций сахарного тростника вырубали амазонские тропические леса, которые часто называют легкими нашей планеты.

Для интенсификации выращивания технических культур необходимо широко применять удобрения и средства защиты растений, а это приводит к биодеградации почв. Разрушаются среда обитания животных и микрорекосистемы. Практика выжигания кустарников и торфяников для подготовки сельхозугодий и высокое потребление топлива автотранспортом для перемещения пальмового масла сделали страны Юго-Восточной Азии одним из крупнейших мировых источников выбросов парниковых газов.

В литературе отмечена еще одна опасность использования биомассы технических культур: тополь, ива, эвкалипт и некоторые другие быстрорастущие растения, в отличие от злаков, синтезируют заметные количества изопrenoидов, окисление которых кислородом воздуха приводит к образованию вредного для здоровья тропосферного озона.

IV.7. Водородная энергетика

Среди различных направлений альтернативной энергетики, пожалуй, наибольший энтузиазм вызывает так называемая водородная энергетика. Ей посвящены тысячи публикаций как в средствах массовой информации, так и в специализированных научных изданиях. В ряде стран приняты щедро финансируемые государственные программы, призванные реализовать крупномасштабное промышленное производство водорода и создать инфраструктуру для его потребления (в этой связи появился термин «водородная экономика»). Причины такого внимания обусловлены распространенным представлением о водороде как об эффективном и экологически чистом топливе, так как при его сгорании образуется только вода, а удельная теплота сгорания водорода $140 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ существенно превышает теплоту сгорания углеводородных топлив (для метана она составляет $\sim 50 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1}$).

Однако в действительности все не так просто. Прежде всего необходимо напомнить, что водород — вторичный энергоноситель, он практически отсутствует на Земле как ископаемый ресурс,[§] и его необходимо получать из более распространенного и дешевого сырья. В настоящее время в промышленных масштабах водород получают конверсией все тех же ископаемых углеводородов, т.е. природного газа, угля и нефти. Стоимость его получения из остальных источников, в том числе электролизом воды, в несколько раз больше, что исключает их промышленное применение.⁵⁸ Но развивать водородную энергетику на основе природного газа (и других углеводородов) как источника получения водорода для решения глобальных экологических проблем вряд ли разумно, поскольку сами процессы его получения сопровождаются выделением огромного количества диоксида углерода. И если в настоящее время вклад антропогенной эмиссии CO_2 в увеличение парникового эффекта уже вызывает беспокойство, то массовый переход на водородное топливо, получаемое риформингом природного газа или электролизом воды, энергетический КПД которых значительно ниже

100%, приведет к существенному увеличению выбросов углекислого газа.⁵⁹ С учетом этого говорить о глобальном экологическом эффекте водородной энергетики бессмысленно. Речь может идти только о локальном положительном эффекте в специфических условиях густо населенных городских агломераций, да и то только при условии достижения приемлемой экономической эффективности технологий получения водорода.

Поскольку электролиз воды с использованием традиционных источников энергии приходится отвергнуть, так как в результате будет затронуто значительно больше энергии, чем получено при сжигании водорода, в качестве потенциальной возможности рассматривается применение для электролиза энергии атомных станций в периоды провала нагрузки. Но реально электролиз как глобальный промышленный источник водорода станет возможным только после создания термоядерной энергетики.

Среди путей решения задачи экономически оправданного получения водорода из воды, не связанных с термоядерной энергетикой, пока только три кажутся обнадёживающими. Достижения биотехнологии и микробиологии показали принципиальную возможность создания штаммов микроорганизмов, способных генерировать водород.^{60,61} Однако данные научные разработки находятся на начальной стадии, и трудно прогнозировать их результат. Но фактически это всего лишь одна из разновидностей биоэнергетики, перспективы и ограничения которой мы обсуждали выше.

Еще один путь — использование для электролиза воды «чистой» солнечной электроэнергии. Это направление интересно, но оно сопряжено со значительными трудностями, а также в принципе не способно удовлетворять заметную часть мирового потребления энергии (см. разд. IV.3).

Наконец, разработка фотокатализаторов, расщепляющих воду под действием солнечного света. Можно ожидать, что такое направление окажется достаточно эффективным, хотя для крупномасштабного промышленного использования фотокатализа еще потребуются детальный технико-экономический анализ. Но опять-таки это разновидность солнечной энергетики, которая может оказаться интересной для локальной, но отнюдь не для глобальной энергетики.

Пока далека от решения и проблема транспортировки водорода от мест его производства (скорее всего, это экваториальные пустыни) до мест потребления (умеренные широты). Обычные газопроводы для этой цели не годятся, так как проницаемость водорода через микроскопические неплотности существенно выше, чем метана; известно, что водород может диффундировать даже через неповрежденные металлические конструкции. По-видимому, придется использовать трубы из композиционных материалов, для создания которых потребуются существенные капитальные вложения, а также организация заведомо экологически вредного производства. Кроме того, плотность газообразного водорода в 8 раз ниже плотности метана, поэтому расходы на его транспортировку по трубопроводам будут почти на порядок больше, а сами трубы должны иметь в три раза больший диаметр. Необходимо учесть и проблему охрупчивания металла, из которого будут изготовлены компрессоры и запорная аппаратура (даже при полимерных трубах).

Трубопроводная транспортировка водорода на большие расстояния в виде криогенной жидкости пока экономически абсолютно бесперспективна. Наиболее реальный жидкий источник водорода для применения на транспорте, например для питания топливных элементов (ТЭ), это метанол или диметиловый эфир, конвертируемый в водород непосредственно на борту транспортного средства. Большим энтузиазмом использования метанола в качестве «жидкого источ-

[§] Водород входит в состав вулканических газов и флюидов, связанных с дегазацией Земли.

ника водорода» является лауреат Нобелевской премии по химии за 1994 г. Дж. Ола,⁶² полагающий, что нас ожидает эра не «водородной», а «метанольной экономики». Главная трудность на этом пути — создание катализаторов синтеза метанола с близкой к 100% селективностью и высокой стабильностью работы.

Огромные проблемы связаны с хранением водорода. Срок его хранения даже в виде криогенной жидкости из-за больших потерь не должен превышать 5 сут. Более реально хранить водород в составе соединений. Департамент энергетики США сформулировал следующие основные требования к материалу, аккумулирующему водород:

- при комнатной температуре он должен содержать не менее 6.0 мас.% водорода;

- процесс сорбции–десорбции водорода должен быть обратимым при температурах не выше 120°C;

- система должна быть безопасной и сохранять рабочее состояние не менее чем в течение 5000 разряд-зарядных циклов.

В настоящее время нет ни одного решения, даже приближенного отвечающего этим требованиям.^{58, 63}

Сорбенты, поглощение водорода которыми основано на физической адсорбции, в силу природы явления не могут соответствовать этим требованиям, так как для них относительно высокое содержание адсорбата достижимо только при криогенных температурах (77 К). Для гидридов металлов и интерметаллидов, наоборот, при высоком содержании водорода требуются высокие температуры для его выделения и связывания.[†]

Это не только усложняет техническую реализацию задачи, но и резко повышает опасность использования системы в целом. Необходимо найти материалы, энергия связи которых с водородом имела бы промежуточный характер между химической связью в гидридах и ван-дер-ваальсовой в адсорбентах. В этом отношении представляют интерес координационные каркасные соединения, допированные металлами,^{64, 65} и композитные материалы на основе ковалентных гидридов легких металлов.^{66, 67}

Наконец, еще одна ключевая проблема водородной энергетики — утилизация водорода. Практически все специалисты едины во мнении, что электроэнергию следует получать с помощью топливных элементов, принцип работы которых открыт У.Гровом еще в 1839 г. За последние 50 лет ТЭ были существенно усовершенствованы; их используют на таких объектах, как искусственные спутники Земли и подводные лодки. Изготовление демонстрационных образцов ТЭ серьезных трудностей не вызывает. Однако создание экономически доступного ТЭ, который бы выдержал испытания в рабочем режиме в течение по крайней мере 1000 ч, остается проблемой. Уже в течение нескольких десятилетий не удается найти дешевый и легко утилизируемый материал для биполярных пластин. При массовом производстве этот материал должен быть химически стойким, обладать высокими электро- и теплопроводностью, прочностью и т.д. При создании такого материала должны быть получены ответы на следующие основные вопросы:

[†] Это утверждение не относится к некоторым интерметаллическим соединениям, легко поглощающим и выделяющим водород при температурах, близких к комнатной (например, к хорошо известному LaNi₅). К сожалению, их емкость по водороду мала — около 1.5 мас.%. Кроме того, требуются дополнительные затраты энергии на эндотермический процесс выделения водорода из гидридов.

- как закрепить на поверхности пластины платину или другой металл-катализатор, чтобы он не дезактивировался в течение всего гарантийного срока работы и не смывался с поверхности в процессе эксплуатации?

- как обеспечить стабильность действия катализатора в присутствии следовых количеств ядов (СО, H₂S и др.)?

- из какого материала должна быть изготовлена протонпроводящая мембрана, основное требование к которой — устойчивость в условиях, когда в системе наряду с водой образуется пероксид водорода (напомним, что современная технология производства H₂O₂ — окисление водорода кислородом в присутствии платины, нанесенной на уголь)?

В твердооксидных топливных элементах в качестве источника водорода можно использовать содержащие его соединения (метанол, метан), но работают такие ТЭ при очень высокой температуре. Однако не исключено, что в итоге именно они могут оказаться востребованными для применения даже на транспорте.

Интенсивное финансирование работ по ТЭ во всем мире (несколько миллиардов долларов ежегодно) и привлечение к ним высококвалифицированных специалистов позволяют надеяться, что проблема создания эффективных и недорогих ТЭ для автотранспорта будет решена в течение ближайшего десятилетия, во всяком случае успех здесь ближе, чем решение проблем получения и хранения водорода. В настоящее время уже коммерчески доступны переносные источники питания на ТЭ и стационарные установки для гибридных систем генерации электроэнергии, тепла и холода (компания ENCE GmbH, Швейцария).

Одно из современных направлений водородной энергетики — перевод автомобильного транспорта на электрическую тягу и(или) на водород как топливо для двигателей внутреннего сгорания, что может позволить минимизировать загрязнение атмосферного воздуха в крупных городах.

Для реализации широкомасштабного производства электромобилей, оснащенных ТЭ и электромоторами, необходимо решить комплекс описанных выше проблем, главные из которых — научиться получать, транспортировать водород и хранить его на борту автомобиля, а также создать взрывобезопасную инфраструктуру для заправки машин топливом. И хотя все это принципиально возможно, для практической реализации водородного автотранспорта, видимо, потребуется еще значительное время.

Использование водорода как горючего для двигателей внутреннего сгорания, для которых, в отличие от ТЭ, не требуется его глубокой очистки, осложнено отсутствием развитой инфраструктуры и трудностями хранения этого газа на борту автомобиля. Кроме того, следует учесть, что при использовании водорода в качестве горючего в цилиндрах двигателя развивается очень высокая температура, вследствие этого в выхлопных газах повышается концентрация оксидов азота.

Что касается аккумуляторных автомобилей, уже выпускаемых некоторыми фирмами, то в этом случае просто происходит перенос выброса диоксида углерода и других загрязнителей из мест эксплуатации автомобиля в район расположения электростанции. Напомним, что 85% электроэнергии вырабатывается за счет сжигания органического топлива. К тому же массовое производство автомобильных аккумуляторов и их последующая утилизация также связаны с серьезными экологическими последствиями.

Резюмируя, можно заключить, что получившие широкое распространение представления о том, что водородная энергетика — дело ближайшего будущего, слишком оптимистичны. Естественно, научно-технические, экономические и организационные проблемы со временем могут быть пре-

одолены, однако на это может потребоваться не одно десятилетие. А надежда решить глобальные экологические проблемы с помощью водородной энергетики, к сожалению, не обоснована.

V. Принципиальные проблемы, возникающие при использовании возобновляемых источников энергии

Как отмечалось выше, важнейшим и единственным первичным источником возобновляемой энергии, поступающей на Землю, является энергия солнечного излучения. Все остальные возобновляемые ресурсы по отношению к ней вторичны, они являются результатом преобразования лишь небольшой доли солнечной энергии, и поэтому на порядки уступают ей по своему потенциалу. Может ли хотя бы этот крупнейший источник решить проблемы мировой энергетики? К сожалению, нет. И вот почему.

Общая мощность потока энергии солнечного излучения, падающего на Землю, составляет $\sim 1.74 \cdot 10^{17}$ Вт, а через площадку 1 м^2 , расположенную перпендикулярно потоку излучения на входе в атмосферу Земли, проходит поток энергии, равный $1367 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Эта величина называется солнечной постоянной. Из-за поглощения атмосферой Земли максимальный поток солнечного излучения на уровне моря на экваторе составляет всего $\sim 1000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Среднесуточное же значение потока солнечного излучения через единичную горизонтальную площадку из-за смены дня и ночи и изменения угла Солнца над горизонтом как минимум в три раза меньше.⁴ В умеренных широтах зимой это значение еще в два раза меньше. Таким образом, даже на экваторе с площади в 1 км^2 с использованием крайне сложного и дорогостоящего оборудования при практически предельном для современных условий КПД преобразования солнечной энергии в 30% можно получить мощность всего 90 МВт. Это соответствует небольшой районной электростанции и в 20 раз меньше мощности типовой промышленной ТЭЦ, не говоря уже о суточном и годовом непостоянстве производимой энергии, а следовательно, необходимости иметь дорогостоящие системы для ее аккумуляции.

Энергетика на основе биотоплива фактически является разновидностью солнечной энергетики, использующей для преобразования энергии солнечного излучения в более удобные нам виды не технические устройства, а процесс фотосинтеза в зеленых растениях, поэтому стоит прежде всего оценить ее потенциал. Даже по самым скромным оценкам, ежегодно на Земле образуется ~ 200 млрд т сухой зеленой массы растений (ежегодная первичная продукция биосферы), что в 20 раз превышает общую массу потребляемых человечеством ископаемых топлив. При сжигании этой биомассы можно получить до $500 \cdot 10^{21}$ Дж энергии. А полное количество биомассы на нашей планете на порядок больше — до $2 \cdot 10^{12}$ т в пересчете на сухое вещество.

Однако гигантский объем зеленой массы, производимой биосферой, не означает реальной возможности ее использования в производственной деятельности человека. Основные параметры, характеризующие условия в биосфере нашей планеты на протяжении свыше 2 млрд лет после образования кислородной атмосферы, практически постоянны. Такая стабильность обусловлена высокой интенсивностью биосферных процессов, в которых потоки вещества и энергии внутри системы на несколько порядков превышают потоки на входе и выходе из нее. Согласно оценкам,⁴ человечество не нарушает равновесие биосферы до тех пор, пока оно поглощает < 1% первичной продукции биоты. Однако уже сейчас потребление чистой первичной продукции биосферы, про-

изведенной на суше, в виде пищи, корма для животных и топлива, превысило 10% и продолжает увеличиваться. С учетом реальных потерь даже использование практически всей доступной продукции биосферы не сможет покрыть ближайших энергетических потребностей человечества. А попытка реализовать такой проект приведет к гибели естественных экосистем и нарушению равновесия глобальных биосферных процессов.

Таким образом, низкая плотность потока первичной энергии (солнечной радиации на земной поверхности) и низкий КПД преобразования этой энергии зелеными растениями (в среднем немного превышающий 1%) перечеркивают все надежды на глобальную роль возобновляемой «зеленой» энергетики. Как показали результаты моделирования глобальных процессов развития цивилизации, при современном уровне энергопотребления в развитых странах за счет возобновляемых источников энергии на Земле может существовать не более 500 млн человек,³ что более чем в 10 раз ниже уже достигнутой численности населения нашей планеты.

Главным препятствием, ограничивающим возможный вклад энергии биотоплива в мировую экономику, является крайне низкая плотность потока энергии, получаемой при сельскохозяйственном производстве биотоплива (табл. 4). На самом деле даже приведенные значения завышены, а оптимистичной средней оценкой является всего $0.073 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, что в $\sim 10\,000$ раз меньше энергии падающего на эту же площадь потока солнечного излучения.⁶⁸ Для сравнения, преобразование солнечной энергии фотовольтаическими солнечными электростанциями в Испании соответствует получению энергии с плотностью потока $\sim 4.8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, что в ~ 40 раз больше приведенного оценочного значения. Однако и создание искусственных фотопреобразующих систем мощностью, необходимой для промышленной энергетики, столь же нереально. И дело не только в необходимости изъятия из хозяйственной деятельности и естественных экосистем огромных площадей (сотен тысяч квадратных километров, что соответствует площади крупнейшего западноевропейского государства). Для этого потребуются фантастические объемы капитальных затрат на оснащение сложным инженерным оборудованием и огромное количество конструкционных материалов, необходимый объем производства которых превышает возможности мировой экономики.

Если же сравнивать энергетику на основе биотоплива и солнечную энергетику с точки зрения плотности потока преобразуемого солнечного излучения, то КПД реальных фотовольтаических преобразователей ($\sim 25\%$) принципиально не отличается от КПД преобразования солнечной энергии некоторыми сельскохозяйственными культурами, достигающего 5–7% (например, кукурузой). Но при этом сельскохозяйственное производство значительно менее затратно, хотя именно из-за низкой плотности усваиваемого растениями

Таблица 4. Плотности потоков тепловой энергии, получаемые в среднем за год с единицы площади для различных источников биотоплива.⁶⁸

Сырье	Формальный поток, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	Оценка авторов, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$
Сахарный тростник	0.37–0.47	0.30–0.36
Этанол из кукурузы	0.141–0.264	—
Пальмовое масло	0.29–0.627	—
Соя	0.043–0.073	—
Биотопливо в среднем	0.155	< 0.15

потока первичной энергии оно в большинстве районов мира остается дотационной сферой экономики. Реальная солнечная энергетика остается одним из наиболее дорогих источников энергии и, несмотря на многолетние декларативные усилия в этой области, занимает незначительное место в энергобалансе даже развитых стран. Достаточно отметить, что упомянутая выше крупнейшая в мире солнечная электростанция Ivanpah по мощности в два раза уступает всего одной типовой газовой турбине которых только в США устанавливается ~ 100 в год.

Таким образом, низкая плотность потока энергии — главный фактор, ограничивающий возможности всех альтернативных источников энергии.[†] Поэтому неудивительно, что, несмотря на многолетние усилия и многомиллиардные затраты, вклад всех альтернативных источников энергии, включая солнечную, ветровую и энергию биотоплива, в энергетiku даже наиболее технологически развитых стран не превышает 2–3%. Низкая плотность потока первичной (солнечной) энергии и низкий КПД ее преобразования растениями перечеркивают надежды на глобальную роль возобновляемой «зеленой» энергетики. Именно по указанным причинам сельскохозяйственное производство относится к наименее рентабельной (а часто просто убыточной) области человеческой деятельности, поддерживаемой за счет дотаций из других источников.

Теперь рассмотрим другую важнейшую характеристику альтернативных источников — их энергетическую эффективность (EROEI). В 2006 г. в Северной Америке и Европе EROEI ветровой энергетики составлял ~ 20 , что способствовало ее быстрому развитию. Однако удобных мест для установки ветрогенераторов становится все меньше, и это является одним из факторов снижения темпов роста мощностей ветровой энергетики. Для биотоплива картина значительно хуже. Даже при получении этанола из сахарного тростника (наиболее эффективного сырья для производства биотоплива) EROEI не превышает 5. В остальных случаях этот показатель близок к единице (табл. 5, рис. 11 и 13), т.е. фактически производство биотоплива даже нельзя рассматривать как получение энергии — это лишь ее перераспределение из одного вида в другой.

Данные, представленные в табл. 5 и на рис. 11, 13 ясно показывают, почему основой мировой энергетики являются ископаемые топлива, а не солнечная энергетика, имеющая EROEI лишь немного выше единицы, и почему биотоплива — биоэтанол и биодизель, при производстве которых в большинстве стран EROEI составляет всего 1.2–1.5 (табл. 5), никогда не смогут стать основным первичным источником энергии для мирового автотранспорта. Пороговое значение EROEI, при котором человечество еще может развиваться, составляет ~ 3 , поэтому биотопливо, да и солнечная энергетика в целом, однозначно исключаются из числа перспективных глобальных источников энергии.

Мы рассмотрели принципиальные физические ограничения для создания глобальной альтернативной энергетики, которые невозможно преодолеть за счет технологического развития. Но еще есть и экономические показатели, непосредственно определяющие привлекательность и, соответственно, темпы развития различных направлений, которые также не в пользу альтернативной энергетики. Рассмотрим это на примере солнечной энергетики. В качестве одного из аргументов в пользу ее грядущей глобальной роли часто

Таблица 5. Значения EROEI для различных источников этанола и биодизеля.⁶⁸

Сырье	Наиболее достоверное значение EROEI
<i>Этанол</i>	
Сахарный тростник (Бразилия)	5
Кукуруза (США)	1.25
Кукуруза (другие страны)	0.18–1.48
<i>Биодизель</i>	
Пальмовое масло	3
Рапсовое масло	1.5
Соя	1.43–3.54
Пшеница (Китай)	1.09

приводят такой расчет: площадь больших пустынь на Земле ~ 20 млн км² (только площадь Сахары ~ 7 млн км²). На эту площадь за год поступает $\sim 5 \cdot 10^{16}$ кВт·ч солнечной энергии. При эффективности преобразования последней в электричество, равной 10%, достаточно использовать всего 1% территории пустынных зон для размещения солнечных электростанций, чтобы обеспечить современный мировой уровень энергопотребления. На первый взгляд это выглядит очень убедительно. Но оценим стоимость такого проекта. У нас есть вполне реальный пример упомянутой выше лучшей и крупнейшей в мире солнечной электростанции Ivanpah с пиковой мощностью 392 МВт, стоимость строительства которой составила 2.2 млрд долл., или 5612 долл. за 1 кВт установленной мощности. Поскольку станция генерирует энергию только днем, реальная средняя мощность будет примерно в три раза меньше — всего 123 МВт. Соответственно, удельные капитальные затраты составят 17 870 долл. за 1 кВт установленной мощности. Это не просто дорого, это фантастически дорого! Например, 1 кВт установленной мощности на АЭС стоит 2000–4000 долл., а на тепловых электростанциях, работающих на газе, такой показатель составляет 500–1000 долл., т.е. в ~ 18 –36 раз меньше, причем выработка электроэнергии осуществляется постоянно и не зависит от погодных условий. Кроме того, не учтена стоимость систем аккумулирования энергии и передачи ее на тысячи километров из пустынных районов в промышленные центры потребления. Но и этим недостатки солнечной энергетики не исчерпываются. Принято считать, что лучшее место для размещения гелиостанций — пустыни. Но при этом возникают очень серьезные проблемы их эксплуатации, связанные с неизбежным запылением и абразивным повреждением солнечных элементов, особенно во время песчаных бурь, для решения которых потребуются огромные затраты, в том числе на поставку в эти безводные регионы пресной воды, необходимой для отмывания панелей от пыли.

Теперь вспомним, что установленная мощность всех источников энергии на Земле уже превысила 3.65 ТВт. Если эти источники заменить на расположенные в пустынях солнечные электростанции типа Ivanpah, то их сооружение обойдется мировой экономике в 66 трлн долл., что превышает ВВП мировой экономики в 2010 г. Но есть еще более серьезное чисто физическое ограничение: 1% от площади пустынь — это 200 тыс. км² (треть территории Франции), и всю эту территорию необходимо будет покрыть сложными инженерными сооружениями. У мировой экономики нет ни производственных мощностей для изготовления такого объема сложного инженерного оборудования, ни сырья для

[†] На это еще 40 лет тому назад обратил внимание академик П.Л.Капица.⁵ К сожалению, даже многие специалисты до сих пор его так и не услышали.

производства соответствующего количества конструкционных материалов. Мы уже не говорим о перспективах удвоения потребления энергии к середине века.

Приведенные выше аргументы, демонстрируя несостоятельность надежд на глобальную роль солнечной энергетики в мировом энергобалансе, никоим образом не перечеркивают ее роль в качестве важного источника локального энергоснабжения.

Аналогичные аргументы можно привести и в отношении ветровой энергетики, основные недостатки которой — непостоянство вырабатываемой энергии и высокая стоимость ветрогенераторов. Оффшорная ветроэнергетика остается одним из наиболее дорогих источников электроэнергии. Стоимость производства электроэнергии на оффшорных ветроэлектростанциях колеблется от 0.125 до 0.20 долл. за 1 кВт·ч, хотя компании производители оборудования надеются к 2020 г. снизить данный показатель до уровня < 120 долл. за 1 МВт·ч.

Другой проблемой остается низкая единичная мощность ветрогенераторов. Для обеспечения установленной мощности в 1000 МВт, соответствующей типовой тепловой электростанции, необходимо 660 больших ветряков, занимающих площадь 970 км². Как отмечают специалисты, если даже довести высоту ветряка до высоты небоскреба, для полного обеспечения потребностей Нью-Йорка будет достаточно «всего» 13 000 таких гигантов. Но номинальная мощность ветровой электростанции — это максимальный показатель ее генерации, достижимый в том случае, если сильный ветер вращает лопасти постоянно, а поскольку бывает и безветренная погода, фактическая мощность составляет не более 26% от проектной. Таким образом, приведенные числа следует умножить на четыре. Сооружение ветроэлектростанций окупается в среднем лишь через 10 лет после введения в эксплуатацию, которая экономически оправдана только при среднегодовой скорости ветра > 5 м·с⁻¹.

VI. Прогноз развития возобновляемых источников энергии

В настоящее время работы в области возобновляемых источников энергии развиваются быстрыми темпами. Установленная мощность ветровых генераторов достигла ~370 ГВт, суммарная установленная мощность солнечной энергетики — ~200 ГВт, геотермальной энергетики — ~20 ГВт. Общий вклад возобновляемых источников в мировую энергетику равен ~2.5%, а вместе с гидроэнергетикой, доля которой в мировое производство энергии ~7%, он возрастает до ~9.5%.

Однако если оставить в стороне гидроэнергетику, имеющую ограниченные возможности для дальнейшего развития и которую скорее следует отнести к традиционным источникам энергии, даже в развитых странах установленные мощности возобновляемых источников пока несопоставимы с мощностями традиционной энергетики. Несмотря на огромные инвестиции в возобновляемые источники энергии, их доля в энергобалансе остается крайне низкой. Например, в энергобалансе США, где инвестиции в возобновляемые источники энергии достигали почти половины всех бюджетных ассигнований на исследование и разработки в области энергетики, доля возобновляемых источников составляет всего несколько процентов (см. рис. 2).

Наряду с наблюдаемым в последние годы замедлением темпов развития практически всех видов альтернативной энергетики,⁶⁹ несмотря на ее активное лоббирование руководством некоторых европейских стран и США, отмечается явное сокращение финансирования этой области (рис. 20).

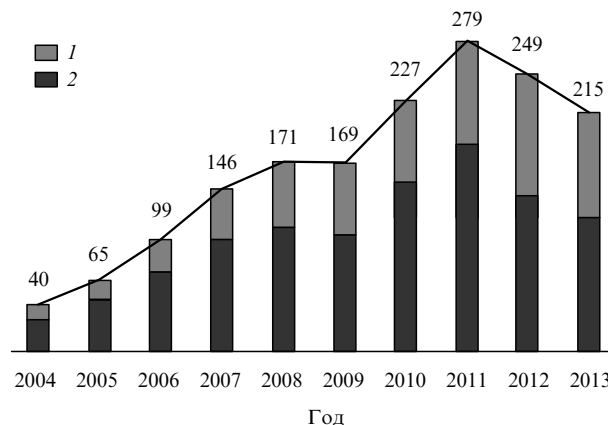


Рис. 20. Мировые инвестиции в возобновляемые источники энергии в развивающихся (1) и развитых (2) странах в период с 2004 по 2013 гг. (в млрд долл.).⁴⁰

Причем в первую очередь финансирование сокращается именно в развитых странах, которые еще несколько лет назад выступали локомотивом научного и технологического развития возобновляемой энергетики. По-видимому, это свидетельствует о постепенном насыщении экономически обоснованного рынка данных технологий, дальнейшее расширение которого уже не могут обеспечить ни существенные государственные субсидии, ни преференции, предоставляемые этой отрасли.

Особенно резко финансирование разработок в области альтернативных источников энергии в США начало сокращаться после 2008 г., когда стали очевидны успехи в добыче сланцевого газа и сланцевой нефти и перспективы удовлетворения энергетических потребностей национальной экономики за счет собственных нетрадиционных видов ископаемого топлива. Понимание ограниченной роли возобновляемых ресурсов и определяющего значения ископаемых источников для мировой энергетики уже давно стало очевидным для ведущих зарубежных специалистов. Поэтому резкое сокращение федерального финансирования «экологически

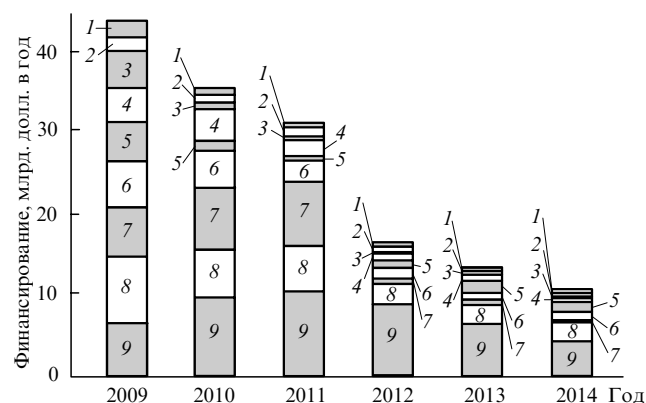


Рис. 21. Изменение финансирования работ отдельных направлений энергетики в США после начала массовой добычи сланцевого газа.⁷⁰

1 — передовые технологии для ископаемого топлива, 2 — ядерная энергетика, 3 — электрические сети и транспорт, 4 — скоростные железные дороги, 5 — электротранспорт и аккумуляторы, 6 — энергоэффективность, 7 — биотоплива, 8 — многотопливные системы, 9 — возобновляемая энергетика.

чистых» технологий (рис. 21) началось в США практически сразу после начала масштабной промышленной разработки сланцевого газа.⁷⁰

Прогнозируется, что в ближайшем будущем доля возобновляемых источников энергии в балансе США будет либо стабильной, либо снизится. Даже в странах Евросоюза в условиях низкого экономического роста и дефицита бюджета на первое место вышел очевидный факт: возобновляемые источники энергии не выдерживают конкуренции с традиционными энергоносителями.⁶⁹

VII. Заключение

Согласно прогнозам специалистов наиболее авторитетных организаций в области энергетики (см. Введение), в среднесрочной перспективе (25–30 лет) производство энергии на базе всех существующих источников будет увеличиваться. Больше, чем в настоящее время, будут объемы потребления нефти, угля и природного газа, хотя произойдет некоторое перераспределение их относительного вклада в мировую энергетику (см. рис. 3). В основном это будет связано с постепенным снижением доли нефти за счет повышения доли природного газа.

Общий объем потребления энергии, по прогнозам IEA, будет увеличиваться в среднем на 1.6% в год: с 10 579 млн ТНЭ в 2003 г. до 22 112 млн ТНЭ в 2050 г. Это заметно ниже темпов роста мировой энергетики в 1971–2003 гг., составлявших в среднем 2.1% в год. Тем не менее по сравнению с началом текущего века к его середине мировое потребление энергии удвоится.

Прогнозируется, что к 2035 г. вклад трех основных источников ископаемых энергоресурсов практически сравняется, достигнув ~25% для каждого из них (см. рис. 3), т.е. и через ~20 лет на долю традиционных ископаемых источников будет приходиться не менее 3/4 производимой на Земле энергии. А по базовому сценарию IEA доля ископаемых видов топлива и в 2050 г., несмотря на развитие атомной энергетики и использование возобновляемых источников, будет составлять не менее 85%.

В отличие от прогнозов начала текущего столетия о грядущем переходе мировой энергетики на альтернативные источники, в настоящее время их роль оценивается гораздо реалистичнее. Даже в наиболее смелых прогнозах развития

мировой энергетики возобновляемым источникам отводят достаточно скромную роль — на уровне всего нескольких процентов к 2035 г. По прогнозу DOE, их доля составит ~6% (табл. 6). Прогноз компании BP от 2015 г. более оптимистичен и отводит возобновляемым источникам долю в 8%. А по последним оценкам, учитывающим тенденции изменения внутриэкономической политики США, предполагается, что в ближайшие годы эта доля вряд ли превысит 3%.⁶⁹

Таким образом, при любом сценарии развития мировой энергетики до конца текущего столетия роль альтернативных источников будет оставаться достаточно скромной, хотя, конечно, их технический прогресс будет продолжаться, открывая для них новые возможности и области применения. С пониманием этого связана наблюдаемая быстрая смена приоритетов в области энергетики в США и других развитых странах.

Никоим образом не отрицая важность и необходимость развития всех имеющихся в нашем распоряжении источников энергии, мы вынуждены отметить несопоставимость даже масштабов глобальных энергетических проблем и предлагаемых для этого решений на основе альтернативных источников энергии. Представления о том, что за счет возобновляемых источников возможно долговременное решение глобальных проблем человечества и обеспечение его стабильного развития, вредны в первую очередь тем, что отвлекают значительные ресурсы и силы на нереальные цели. Но главное, это невосполнимая потеря времени для решения стратегически важных задач.

Литература

1. В.С.Арутюнов. *Нефть XXI. Мифы и реальность альтернативной энергетики*. Эксмо, Москва, 2016
2. Дж.Форрестер. *Мировая динамика*. Наука, Москва, 1978
3. Н.Н.Моисеев. В кн. *Сочинения. Т. 3*. МНЭПУ, Москва, 1997. С. 92
4. В.Г.Горшков. *Физические и биологические основы устойчивой жизни*. ВИНТИ, Москва, 1995
5. П.Л.Капица. *Успехи физ. наук*, **118**, 307 (1976)
6. G.Mao, X.Liu, H.Du, J.Zuo, L.Wang. *Renew. Sust. Energy Rev.*, **48**, 276 (2015)
7. N.Abas, A.Kalair, N.Khan. *Futures*, **69**, 31 (2015)
8. P.R.A.Wells. *Oil Gas J.*, **103** (7), 20 (2005)
9. Н.А.Добрецов, А.Э.Конторович, В.В.Кулешов. *Вестн. РАН*, **71**, 867 (2001)
10. С.П.Капица. *Общая теория роста человечества*. Наука, Москва, 1999
11. M.Radler, L.Bell. *Oil Gas J.*, **109** (1), 37 (2011)
12. W.L.Kelley, D.R.Harrell, R.S.Bishop, K.Wells. *Oil Gas J.*, **107** (22), 20 (2009)
13. R.Sandrea. *Oil Gas J.*, **102** (26), 34 (2004)
14. В.С.Арутюнов, Л.Н.Стрекова, А.Л.Лапидус, Ф.Г.Жафаров. *Газохимия на современном этапе развития*. Изд-во РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, Москва, 2015
15. Л.Мауджери. *В мире науки*, (12), 52 (2009)
16. G.Cohen, F.Joutz, P.Loungani. *Energy Policy*, **39**, 4860 (2011)
17. М.А.Агее. In *Natural Gas Conversion. V. Studies in Surface Sciences and Catalysis. Vol. 119*. Elsevier, Amsterdam, 1998. P. 931
18. В.А.Скоробогатов, В.И.Старосельский, В.С.Якушев. *Газ. пром-сть*, (7), 17 (2000)
19. A.Melvin. *Natural Gas: Basic Science and Technology*. Adam Hilger, Bristol; Philadelphia, 1988
20. Л.М.Зорькин, М.И.Суббота, Е.В.Стадник. *Метан в нашей жизни*. Недра, Москва, 1986
21. Т.Голд. *Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И.Менделеева*, **31**, 547 (1986)
22. Б.Валеев. *Газ. пром-сть*, (7), 6 (1997)

Таблица 6. Прогноз динамики вклада возобновляемых источников и угля в мировую энергетику, а также энергетику США и Китая (ГВт) (по данным DOE, 2010).

Источник	2007 г.	2015 г.	2020 г.	2035 г.
<i>Прогноз для США</i>				
Вся энергетика	995	1069	1082	1216
Уголь	313	325	326	337
Ветер	16	64	64	69
Солнце	1	1	1	1
<i>Прогноз для Китая</i>				
Вся энергетика	716	1021	1242	1924
Уголь	496	625	750	1233
Ветер	6	39	63	130
Солнце	0	4	6	6
<i>Прогноз для мировой энергетики</i>				
Вся энергетика	4428	5005	5740	7009
Уголь	1425	1545	1671	2366
Ветер	93	277	347	486
Солнце	8	45	53	64

23. К.Г.Ионе, В.М.Мысов, В.Г.Степанов, В.Н.Пармон. *Нефтехимия*, **41**, 178 (2001)
24. В.С.Арутюнов, А.Л.Лапидус. *Введение в газохимию*. Изд-во РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, Москва, 2005
25. J.Yuan, D.Luo, L.Feng. *Appl. Energy*, **148**, 49 (2015)
26. Ю.Ф.Макогон. *Газ. пром-сть*, (5), 10 (2001)
27. K.A.Kvenvolden. *Chem. Geol.*, **71**, 41, (1988)
28. C.A.S.Hall, J.G.Lambert, S.B.Balogh. *Energy Policy*, **64**, 141 (2014)
29. В.С.Арутюнов. *Рос. хим. журн.*, **45** (1), 55 (2001)
30. В.С.Арутюнов. *Рос. хим. журн.*, **49** (4), 102 (2005)
31. М.И.Будыко. *Изменения окружающей среды и смены последовательных фаун*. Гидрометеоздат, Ленинград, 1982
32. М.И.Будыко, А.Б.Ронов, А.Л.Яншин. *История атмосферы*. Гидрометеоздат, Ленинград, 1985
33. Д.А.Крылов, В.А.Овсейчук, Г.П.Сидорова. *Энергия: экономика, техника, экология*, (5), 2 (2015)
34. Д.А.Крылов, Г.П.Сидорова. *Энергия: экономика, техника, экология*, (12), 2 (2015)
35. Г.В.Лисичкин. В кн. *Охрана среды обитания: мифы и реальность*. V Всероссийская конференция «Химия под знаком сигма». Омск, 2016. С.3
36. Е.Н.Соснина, О.В.Маслеева, Е.В.Крюков. *Теплоэнергетика*, (8), 3 (2015)
37. Г.В.Лисичкин. *Рос. хим. журн.*, **41** (1), 78 (1997)
38. Ю.И.Винокуров, А.Т.Зиновьев, К.М.Епишев. *Ползуновский вестник*, (4/2), 47 (2011)
39. А.М.Усачев. *Науковедение*, **7** (4) (2015). DOI: 10.15862/10EVN415
40. *Renewable Energy Trends in 2013*. *Chem Views Magazine*. 02.09.2014. DOI:10.1002/chemv.201400087
41. J.G.McGowan, A.L.Rogers, J.F.Manwell. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Wiley, London, 2009
42. Б.В.Ермоленко, Г.В.Ермоленко, М.А.Рыженков. *Теплоэнергетика*, (11), 72 (2011)
43. Е.Н.Соснина, О.В.Маслеева, Г.В.Пачурин. *Экология и пром-сть России*, (9), 8 (2013)
44. В.С.Арутюнов. *Рос. хим. журн.*, **51** (6), 94 (2007)
45. И.Медведкова, Т.Трудаева. *МОСТЫ. Аналитика и новости о торговле и устойчивом развитии*, **6** (3) (2013)
46. N.Sarkar, S.K.Ghosh, S.Bannerjee, K.Aikat. *Renew. Energy*, **37**, 19 (2012)
47. A.Gupta, J.P.Verma. *Renew. Sust. Energy Rev.*, **41**, 550 (2015)
48. R.Parajuli, T.Dalgaard, U.Jorgensen, A.P.S.Adamsen, M.T.Knudsen, M.Birkved, M.Gylling, J.K.Schjorring. *Renew. Sust. Energy Rev.*, **43**, 244 (2015)
49. S.K.Maity. *Renew. Sust. Energy Rev.*, **43**, 1427 (2015)
50. S.K.Maity. *Renew. Sust. Energy Rev.*, **43**, 1446 (2015)
51. T.Suganya, M.Varman, H.H.Masjuki, S.Renganathan. *Renew. Sust. Energy Rev.*, **55**, 909 (2016)
52. A.J.Ragauskas, G.T.Beckham, M.J.Biddy, R.Chandra, F.Chen, M.F.Davis, B.H.Davison, R.A.Dixon, P.Gilna, M.Keller, P.Langan, A.K.Naskar, J.N.Saddler, T.J.Tschaplinski, G.A.Tuskan, C.E.Wyman. *Science*, **344**, 709 (2014)
53. E.Tvinnereim, E.Ivarsflaten. *Energy Policy*, **96**, 364 (2016)
54. N.L.Panwar, S.C.Kaushik, S.Kothari. *Renew. Sust. Energy Rev.*, **15**, 1513 (2011)
55. C.O.Tuck, E.Perez, I.T.Horvath, R.A.Sheldon, M.Poliakoff. *Science*, **337**, 695 (2012)
56. S.K.Rose, E.Kriegler, R.Bibas, K.Calvin, A.Popp, D.P.van Vuuren, J.Weyant. *Climat. Change*, **123**, 477 (2014)
57. M.Besson, P.Gallezot, C.Pinel. *Chem. Rev.*, **114**, 1827 (2014)
58. T.Abbasi, S.A.Abbasi. *Renew. Sust. Energy Rev.*, **15**, 3034 (2011)
59. Б.М.Булычев. *Рос. хим. журн.*, **50** (6), 3 (2006)
60. А.А.Цыганков. *Рос. хим. журн.*, **50** (6), 26 (2006)
61. P.A.M.Claassen, T.De Vrije. *Int. J. Hydrogen Energy*, **31**, 1416 (2006)
62. G.A.Olah, A.Goeppert, G.K.S.Prakash. *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2006
63. G.Q.Ning, F.Wei, G.H.Luo, Q.X.Wang, Y.L.Wu, H.J.Yu. *Appl. Phys. A*, **78**, 955 (2004)
64. S.N.Klyamkin, E.A.Berdonosova, E.V.Kogan, K.A.Kovalenko, D.N.Dybtsev, V.P.Fedin. *Chem. Asian J.*, **6**, 1854 (2011)
65. S.N.Klyamkin, S.V.Chuvikov, N.V.Maletskaia, E.V.Kogan, V.P.Fedin, K.A.Kovalenko, D.N.Dybtsev. *Int. J. Energy Res.*, **38**, 1562 (2014)
66. S.P.Malyshenko, S.V.Mitrokhin, I.A.Romanov. *J. Alloys Compd.*, **645**, 84 (2015)
67. S.Mitrokhin, T.Zotov, E.Movlaev, V.Verbitsky. *J. Alloys Compd.*, **580**, 90 (2013)
68. C.de Castro, O.Carpintero, F.Frachoso, M.Mediavilla, L.J.de Miguel. *Energy*, **64**, 506 (2014)
69. М.Шенин. *Нефтегазовая вертикаль*, (1–2), 6 (2017)
70. P.E.Lewis, M.J.Economides, O.Ajao. *Oil Gas J.*, **110** (10), 30 (2012)