

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

---

**ХИМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**В.С. Арутюнов, А.В. Арутюнов, Г.В. Лисичкин**

**ЭНЕРГЕТИКА В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ:  
ПЕРСПЕКТИВЫ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ**

Учебное пособие  
для студентов и аспирантов Химического факультета МГУ  
имени М.В. Ломоносова

Москва

2025

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

---

**ХИМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**В.С. Арутюнов, А.В. Арутюнов, Г.В. Лисичкин**

**ЭНЕРГЕТИКА В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ:  
ПЕРСПЕКТИВЫ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ**

Учебное пособие

Рекомендовано

методической комиссией Химического факультета для студентов и аспирантов, обучающихся по специальностям «Нефтехимия», «Органическая химия», «Неорганическая химия», «Теория и методика обучения химии», «Химические технологии веществ и материалов», «Экологическая химия и экоадаптивные технологии», «Электрохимия»

*Рецензент*

д-р хим. наук, профессор Б.М. Булычев

**Москва**

**2025**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Введение.....                                                                                    | 5  |
| 2. Современное состояние энергетики.....                                                            | 8  |
| 3. Критерии оценки источников энергии.....                                                          | 14 |
| 3.1. Потребительские качества.....                                                                  | 14 |
| 3.2. Ресурсная база.....                                                                            | 16 |
| 3.2.1. Нефть.....                                                                                   | 16 |
| 3.2.2. Уголь.....                                                                                   | 21 |
| 3.2.3. Природный газ.....                                                                           | 21 |
| 3.2.4. Атомная энергетика.....                                                                      | 33 |
| 3.2.5. Гидроэнергетика.....                                                                         | 34 |
| 3.2.6. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ).....                                                  | 35 |
| 3.3. Себестоимость производства энергии.....                                                        | 37 |
| 3.4. Энергоэффективность источников энергии.....                                                    | 38 |
| 3.4.1. Энергетическая эффективность EROI как<br>определяющий фактор оценки источников энергии.....  | 39 |
| 3.4.2. Энергетическая эффективность EROI базовых<br>источников энергии и динамика ее изменения..... | 44 |
| 3.4.3. Энергетическая эффективность EROI и качество<br>жизни населения.....                         | 52 |
| 3.5. Экологические характеристики источников энергии.....                                           | 55 |
| 3.6. Стабильность поставки энергии.....                                                             | 57 |
| 4. Возобновляемые источники энергии: проблемы и перспективы.....                                    | 57 |
| 4.1. Энергетический потенциал ВИЭ.....                                                              | 57 |
| 4.2. Энергетическая эффективность ВИЭ.....                                                          | 66 |
| 4.3. Экологические характеристики ВИЭ.....                                                          | 67 |
| 4.4. Прогнозы развития ВИЭ.....                                                                     | 75 |
| 5. Заключение. Отдаленные перспективы и термоядерная<br>энергетика.....                             | 76 |
| Литература.....                                                                                     | 82 |

## Аннотация

Энергия является основным фактором, обеспечивающим протекание всех природных процессов. Динамика мировой экономической системы не является исключением и непосредственно определяется объемом доступной для потребления энергии и затратами на ее получение. Поэтому независимо от сферы своей деятельности каждый культурный человек должен обладать общими представлениями о мировой энергетике, доступных и перспективных источниках энергии, их достоинствах и недостатках. Для специалистов-химиков эти знания обязательны. В пособии представлены современное состояние и основные тенденции развития мировой энергетике. Показано, что в реально обозримый период, а это несколько ближайших десятилетий, ископаемые углеводороды будут оставаться основой мировой энергетике. Их ресурсы в земной коре вполне достаточны, но требуются значительные научные и технологические усилия для более эффективного превращения огромных нетрадиционных ресурсов природного газа в востребованные нефтехимические продукты и жидкие моторные топлива. Однако по мере снижения качества доступных энергоресурсов затраты энергии на их собственное производство, распределение и преобразование будут расти, снижая долю чистой энергии, доступной для потребления. Эта доля определяется отношением получаемой энергии к затратам на ее производство – энергетической эффективностью EROI. Существует пороговое значение EROI, ниже которого поток чистой энергии, получаемой обществом, становится недостаточным для его прогрессивного развития. Большинство альтернативных и возобновляемых источников энергии имеют значение EROI ниже порогового, что исключает их заметный вклад в динамику мирового развития. Из-за сокращения доступных ресурсов нефти ее доля в мировом энергобалансе будет постоянно снижаться, а доля природного газа – расти. В долгосрочной перспективе у человечества пока нет других источников энергии, кроме термоядерной энергетике. Но по мере дальнейшего развития и усложнения нашей цивилизации в ограниченных пределах нашей планеты постоянно растущее для преодоления энтропийных процессов потребление энергии, независимо от ее источников, будет обострять проблему теплового баланса Земли.

## 1. Введение

Энергия является одним из наиболее фундаментальных понятий окружающего нас мира. И уже одно это оправдывает то внимание, которое уделяется всем связанным с ней вопросам во всех сферах человеческой деятельности. Если мы как уникальная и единственная известная нам Цивилизация хотим избежать деградации, мы обречены постоянно увеличивать потребление энергии (что не исключает снижение удельного расхода энергии на отдельные промышленные процессы по мере их совершенствования) [1, 2]. Как совместить эту тенденцию с ограниченными возможностями нашей планеты, уже практически полностью нами освоенной?

В свете этой глобальной энергетической проблемы Цивилизации удивительно, что основная дискуссия по энергетическим вопросам в средствах массовой информации (СМИ) и даже в солидных научных изданиях ведется вокруг несравненно менее значимой проблемы более широкого использования так называемых альтернативных источников энергии. В результате, в широких кругах общества, особенно в развитых странах, сложилось твердое убеждение, что переход к «возобновляемым», «экологически чистым», «зеленым» источникам энергии позволит решить не только современные, но и все будущие энергетические и экологические проблемы человечества. И даже сможет обеспечить постоянное комфортное существование, достигнутое современным западным обществом. В свою очередь, это породило различные «зеленые» движения, поддерживаемые преимущественно сытыми и благополучными обывателями, убежденными, что ограничение энергопотребления и ужесточение экологических норм (разумеется, без ущерба для собственного комфорта и уровня жизни) способно сохранить этот комфорт и благополучие не только для них, но и для их потомков. Показательно, что «зеленые» движения практически не имеют успеха и поддержки в странах «третьего мира», для населения которых

гораздо более актуальны проблемы повышения уровня жизни здесь и сейчас, чем достаточно абстрактные проблемы еще не родившихся поколений.

Постоянно внушаемое СМИ убеждение, что возобновляемые источники способны решить глобальную проблему обеспечения человечества энергией, уже настолько вошло в «сознание масс», что некоторые вполне уважаемые ученые и политические деятели, похоже, начинают в это верить, хотя еще полвека назад ведущими специалистами в области мировой динамики и глобальных процессов [3–5] 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, поддерживаемый постоянным шумным давлением различных «зеленых» движений и организаций, то ажиотажно повышается, то несколько затухает синхронно с колебаниями мировых цен на нефть. Немалую роль в спекуляциях на эту тему играет и интерес к дотациям и грантам со стороны сельскохозяйственного и научного лобби развитых стран, а также спекулятивный интерес прессы к всевозможным «научным» сенсациям, постоянно генерируемым «неофициальной наукой» и энтузиастами-любителями. Все это способствовало тому, что «альтернативная энергетика» прочно заняла одно из ведущих мест не только в популярных публикациях, но и в научных изданиях [6]. Во всяком случае, число посвященных ей научных публикаций и специализированных журналов в разы превышает соответствующие показатели для энергетики реальной, дающей минимум в 20 раз больший вклад в обеспечение мира энергией.

К сожалению, то же самое относится и к финансированию научных исследований в области энергетики. Безусловно, новые научно-технические направления всегда более привлекательны для исследователей. Но ведь

большинство этих средств идет не на новые фундаментальные исследования, открывающие новые горизонты, 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, совершенно очевидно. Но как долго это будет продолжаться, когда закончится «углеводородная цивилизация» и что придет ей на смену – в этих вопросах мнения различных групп специалистов сильно расходятся.

Являясь одним из главных потребителей передовых достижений мировой науки и постоянно аккумулируя все наиболее перспективные технологические решения, энергетика, в силу своих масштабов, остается одной из наиболее консервативных технологических отраслей. Массовая смена базовых технологий в энергетике, в силу ее масштабов, 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. Именно этот консерватизм позволяет достаточно надежно прогнозировать будущее состояние энергетики, по крайней мере, в ближайшие 20–30 лет, пока не будет исчерпан технический ресурс уже построенных и строящихся крупных энергетических объектов. Он позволяет также проследить 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.

Между химией как отраслью естествознания и энергетикой как технологической областью имеется определённая дистанция, но постановка многих химических, материаловедческих, химико-биологических и химико-технологических исследований обусловлена именно проблемами энергетики.

Поэтому выпускники химического факультета должны иметь ясное представление о значимости и потенциале конкретных научных направлений, инициируемых запросами энергетики.

## 2. Современное состояние энергетики

Основу современной энергетики составляют три ископаемых первичных источника энергии: нефть, уголь, природный газ, и три менее значимых ее источника: гидроэнергетика, атомная энергетика и большая группа процессов, объединяемых термином «возобновляемые источники энергии» (ВИЭ) (рис. 1). В настоящее время производство подавляющей части потребляемой человечеством энергии обеспечивают ископаемые энергоресурсы, доля которых в мировом энергобалансе превышает 86% (табл. I).

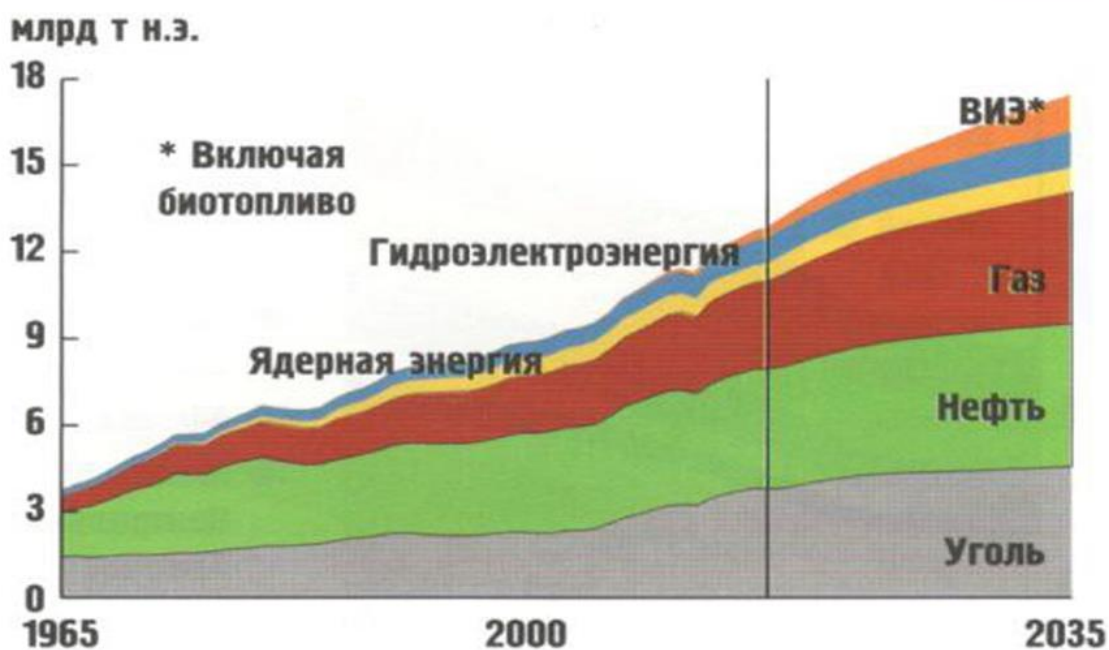


Рис. 1. Текущее и прогнозируемое потребление различных видов первичных энергоресурсов в мировой энергетике [6].

Таблица 1

**Доля основных источников в мировом производстве первичной энергии  
в 2024 г. [7]**

| <b>Источник энергии</b> | <b>Доля в мировом энергобалансе, %</b> |
|-------------------------|----------------------------------------|
| Нефть                   | 33,7                                   |
| Уголь                   | 27,9                                   |
| Природный газ           | 25,1                                   |
| Гидроэнергетика         | 2,7                                    |
| Атомная энергетика      | 5,2                                    |
| ВИЭ*                    | 5,3                                    |

\*) ВИЭ – возобновляемые источники энергии

Как видно из прогнозной части рис. 1, в течение ближайших лет в энергетике не ожидается каких-либо драматических изменений. Производство энергии на базе всех существующих ныне источников будет увеличиваться, в том числе выше, чем в настоящее время будут объемы потребления нефти, угля и природного газа, хотя будет происходить определенное перераспределение их относительного вклада в мировую энергетику. В основном, это будет связано с постепенным снижением доли нефти за счет повышения доли природного газа.

Главной энергетической проблемой сегодня является снижение доступности и, соответственно, доли в мировом энергобалансе жидких углеводородов, являющихся важнейшим и наиболее удобным ископаемым энергоресурсом. Производимые из них продукты, прежде всего, моторные топлива составляют основу современной цивилизации. Именно они придают ей ту гибкость и мобильность, без которой мы уже не можем представить наше существование. Кроме того, нефть служит исходным сырьем для производства огромного ассортимента нефтехимических продуктов, прежде всего, полимерных материалов, обеспечивающих такой уже привычный

комфорт нашему образу жизни. Однако ресурсы нефти в земной коре ограничены, и видимо уже не так далеко время, когда они станут дефицитом. Фактически, закат нефтяной эпохи уже начался, и можно даже четко указать время начала этого процесса. В 1985 году впервые объем мировой добычи нефти превысил объем ее вновь открываемых ресурсов, т.е. началось безусловное сокращение доступных нам запасов нефти [8]. К сожалению, политики осознали последствия этого важнейшего для мировой экономики события лишь двадцать лет спустя, уже в ходе энергетического кризиса 2008 года.

Оценивая масштабы современной энергетики целесообразнее указывать не абсолютные величины, которые мало что говорят неспециалистам, а сравнивать их с природными энергетическими потоками и ожидаемыми изменениями в мировом энергопотреблении. Так, уже сейчас производимая человечеством энергия достигла почти 0,02% от потока солнечной энергии, достигающей земной поверхности [4]. Однако население мира обеспечено этой энергией крайне неравномерно. Подавляющая часть потребляемой на Земле энергии приходится на развитые страны. Только на долю США, где проживает всего ~4% населения планеты, приходится почти 20% потребления мировых сырьевых и энергетических ресурсов. В то же время, согласно данным Международного энергетического агентства (International Energy Agency), в современном мире 1,2 млрд человек все еще не имеют доступа к электроэнергии, а 2,7 млрд человек используют в основном биомассу, т.е. дрова, для отопления и приготовления пищи [9]. И в течение ближайших тридцати лет эти цифры практически не изменятся.

В зависимости от уровня экономического развития страны ежегодное потребление энергии (в пересчете на нефть) изменяется от 65 баррель/чел. в США до 50 баррель/чел. в Западной Европе, 33 баррель/чел. в Японии, 10 баррель/чел. в Мексике (среднемировой уровень), 0,8 баррель/чел. в Бангладеш и 0,7 баррель/чел. в Нигерии. Таким образом, разрыв между наиболее бедными и наиболее богатыми странами достигает почти 100 раз

[10]. По прогнозам к концу текущего столетия население планеты удвоится, достигнув уровня 12–13 млрд человек [11], после чего оно, возможно, стабилизируется. Поскольку потребление энергии значительной частью жителей Земли во много раз отстает от современного уровня развитых стран (свыше 10 кВт установленной мощности на человека), даже после стабилизации населения экономическая и политическая стабилизация в мире невозможна без хотя бы частичного сокращения разрыва в уровне жизни. А это потребует соответствующего сокращения разрыва в энергопотреблении между богатыми и бедными странами.

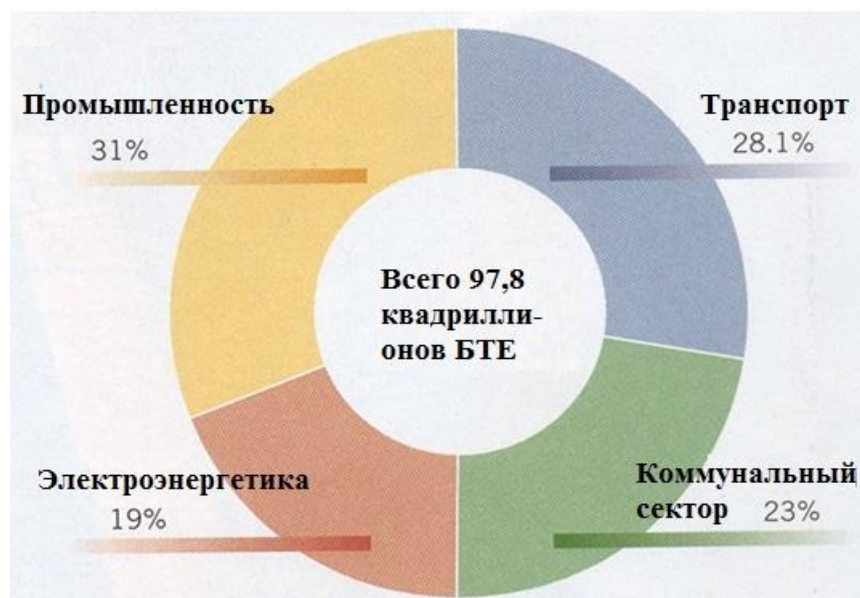
В связи с необходимостью ускоренного развития слаборазвитых стран в течение первой половины текущего столетия прогнозируется быстрый рост мирового потребления энергии на уровне 1,7% в год, и до конца века глобальное потребление энергии, видимо, увеличится еще в несколько раз, вплотную приблизившись к 0,1% от падающего на Землю потока солнечной радиации. Для того же, чтобы обеспечить всему человечеству современный уровень жизни, мировое производство энергии должно увеличиться почти в сто раз, т.е. превысить 1% от потока падающей на Землю солнечной радиации. Но если это реально произойдет, это приведет к нарушению теплового баланса планеты, и для его восстановления согласно закону Стефана-Больцмана с учетом альбедо Земли средняя температура поверхности (~300 K) может увеличиться тоже примерно на 1%, т.е. на ~2–3°C, что неизбежно вызовет климатическую катастрофу глобального масштаба. Причем безотносительно от способа получения этой энергии и концентрации парниковых газов в атмосфере, борьбу с ростом которой считают главной мировой проблемой энтузиасты Киотского протокола. Именно в этом заключается главная глобальная проблема будущей энергетики и истоки ожидаемого климатического кризиса. Но этот вопрос уже выходит за рамки реальных среднесрочных прогнозов.

Пока же мировая энергетика продолжает развиваться очень высокими темпами. Согласно данным Energy Information Administration (EIA)

ожидается, что за два десятилетия этого века мировое потребление энергии увеличится на 59%. Это увеличение произойдет несмотря на ожидаемое значительное увеличение эффективности использования энергии в расчете на единицу производимого Валового Внутреннего Продукта (ВВП).

Активно продвигаемая в ряде стран концепция замещения углеводородной энергетики «экологически чистыми» возобновляемыми источниками энергии далеко не так однозначна, как это может показаться на первый взгляд. Помимо очевидных ресурсных, экономических и даже экологических проблем, связанных с расширением доли ВИЭ в энергобалансе [1], существует принципиальное ограничение, накладываемое базовыми законами природы на их энергетическую эффективность и, соответственно, возможность устойчивого прогрессивного развития опирающейся на их использование цивилизации [2]. Данные об эффективности известных нам источников энергии и ресурсах нашей планеты показывают, что, несмотря на кажущуюся «экологическую привлекательность» и формальную «вечность» возобновляемых источников энергии, они не только не способны заменить углеводородные ресурсы, но даже гипотетический переход на них неотвратимо приведет к деградации экономики и общества. Поэтому единственной известной нам в настоящее время альтернативой ископаемым углеводородам, способной обеспечить непрерывно растущие по мере развития и усложнения нашей цивилизации потребности в энергии [2], остается энергия термоядерного синтеза, которая неизбежно, хотя еще не скоро их заменит.

Энергия необходима практически для всех видов человеческой деятельности. Сейчас вся производимая в мире энергия потребляется в достаточно близких долях четырьмя основными секторами: промышленностью, транспортом, коммунальным сектором и производством электроэнергии (рис. 2).



*Рис. 2. Области потребления энергии в США в 2010 г. [12].*

*(БТЕ – британские тепловые единицы. 1 БТЕ  $\approx$  252 кал)*

Однако вклад различных источников в эти сферы потребления энергии сильно различается (рис. 3). Наиболее универсальными источниками энергии являются нефть и природный газ, используемые во всех секторах, что и обуславливает их особую потребительскую ценность. Правда и для них распределение по сферам потребления сильно различается. Нефть безоговорочно доминирует в транспортном секторе, обеспечивая более 90% его потребности в энергии, на что уходит более 70% добываемой нефти. Доля же газа в транспортном секторе пока невелика, всего несколько процентов. Зато газ обеспечивает значительную долю энергетических потребностей промышленного и коммунального секторов и производства электроэнергии. Такие же источники, как уголь, атомная энергетика и возобновляемые источники, в том числе гидроэнергетика, используются почти исключительно для производства электроэнергии.



Рис. 3. Источники и области потребления первичной энергии в США в 2010 г. [12].

### 3. Критерии оценки источников энергии

Для анализа перспектив различных источников энергии и оценки их способности удовлетворять те или иные потребности мировой экономики и энергетики, необходимо рассмотреть наиболее важные их свойства. Таковыми являются их потребительские качества, ресурсная база, себестоимость производства энергии, энергетическая эффективность, стабильность поставки энергии и экологические характеристики [1].

#### 3.1 Потребительские качества

Важнейшим критерием, определяющим спрос на те или иные энергоресурсы, являются их потребительские свойства. Влияние потребительских качеств на судьбу энергоресурсов хорошо иллюстрирует изменение роли угля в мировой энергетике. Если в начале прошлого века его доля в мировом энергобалансе превышала 50%, то сейчас, несмотря на наличие практически во всех регионах мира огромных ресурсов угля, она сократилась более чем в два раза. Виной тому именно низкие потребительские качества угля, прежде всего, неудобство использования твердого топлива на транспорте, в быту и в промышленности. Немалую роль

в этом играют также его низкие экологические качества, сложность и высокая стоимость транспортировки, а также низкая рентабельность процессов его конверсии в более удобные виды топлива.

Среди известных нам видов энергоресурсов вне конкуренции потребительские качества жидких углеводородов (нефти). Уникальность нефти как энергетического и нефтехимического ресурса в том, что благодаря своему 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 спектр 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, как только были освоены технологии промышленной добычи и переработки нефти, она очень быстро заняла доминирующие позиции в мировой энергетике, и в 1970–80-е годы ее доля в мировом энергобалансе доходила почти до 50%. Универсальность нефти как первичного источника энергии, пригодного для использования практически во всех сферах потребления, иллюстрирует рис. 3. Нефть имеет вполне приемлемые экологические характеристики, и, если бы не прогнозируемый ее дефицит, проблема энергообеспечения вряд ли бы имела такую остроту.

Природный газ по своим потребительским свойствам занимает промежуточное положение между нефтью и углем. Более низкие потребительские качества газа по сравнению с нефтью связаны, прежде всего, со сложностью его транспортировки и использования на транспорте, а также высокими затратами на конверсию в более удобные жидкие энергоносители и химические продукты. К безусловным потребительским плюсам природного газа относятся его наиболее высокие среди ископаемых топлив экологические характеристики, а также удобство использования в бытовом секторе, промышленности и базовой тепло- и электроэнергетике.

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

### ***3.2 Ресурсная база***

Учитывая огромные и быстро растущие потребности мира в энергии, потенциальный объем запасов 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.

#### ***3.2.1. Нефть***

Нефть сегодня, безусловно, является важнейшим природным ресурсом, определяющим состояние не только всей мировой энергетики, но и в значительной степени мировую геополитическую ситуацию. Цена нефти и спрос на нее – важнейшие индикаторы, отражающие текущее состояние мировой экономики.

Ограниченность ресурсной базы – главный недостаток нефти, не позволяющий рассматривать ее как ведущий мировой энергоресурс за пределами двух-трех ближайших десятилетий. Хотя дискуссия между сторонниками органической и неорганической теорий происхождения нефти продолжается, большая часть ее разрабатываемых ресурсов, видимо, имеет

все-таки биогенное происхождение. Поэтому можно считать, что мировая энергетика существует за счет своеобразных «энергетических консервов», приготовленных нам биосферой за последние примерно 300 млн лет ее эволюции начиная с каменноугольного периода. Эти ресурсы громадны, но современная скорость их потребления в миллион раз превышает скорость процессов их естественного формирования в земной коре. За один год человечество расходует запасы, на образование которых природе требовался примерно миллион лет. Поэтому со временем эти ресурсы неизбежно будут исчерпаны. Пик открытий нефтяных ресурсов был пройден еще в 1970-х годах (рис. 4). Поэтому основной объем добываемой сейчас нефти мы получаем за счет эксплуатации тех месторождений, которые были открыты десятки лет тому назад (рис. 5), и уже нельзя рассчитывать на появление большого числа новых крупных месторождений, составляющих основу современной промышленной добычи нефти.

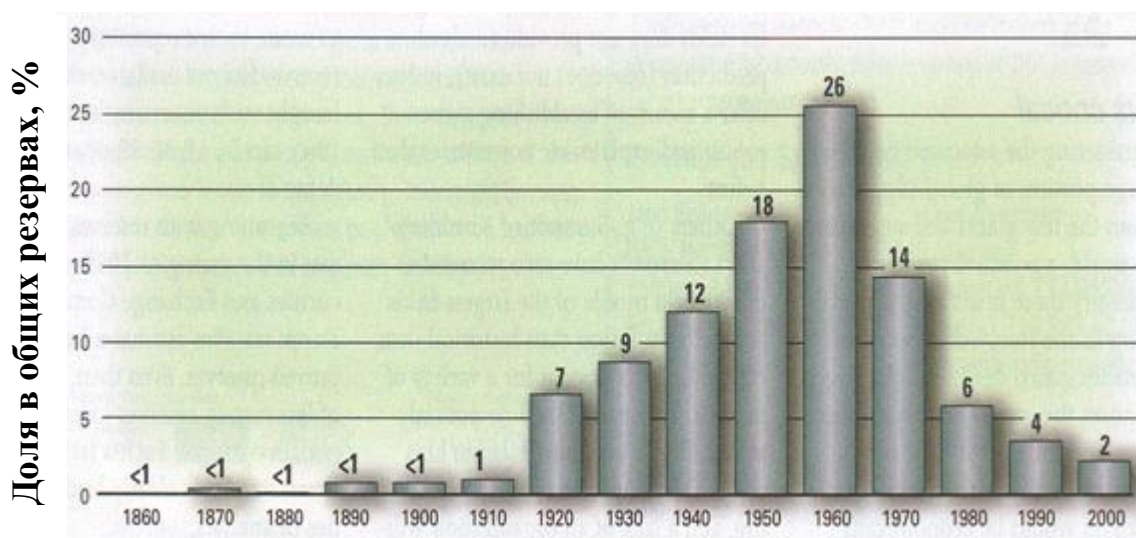
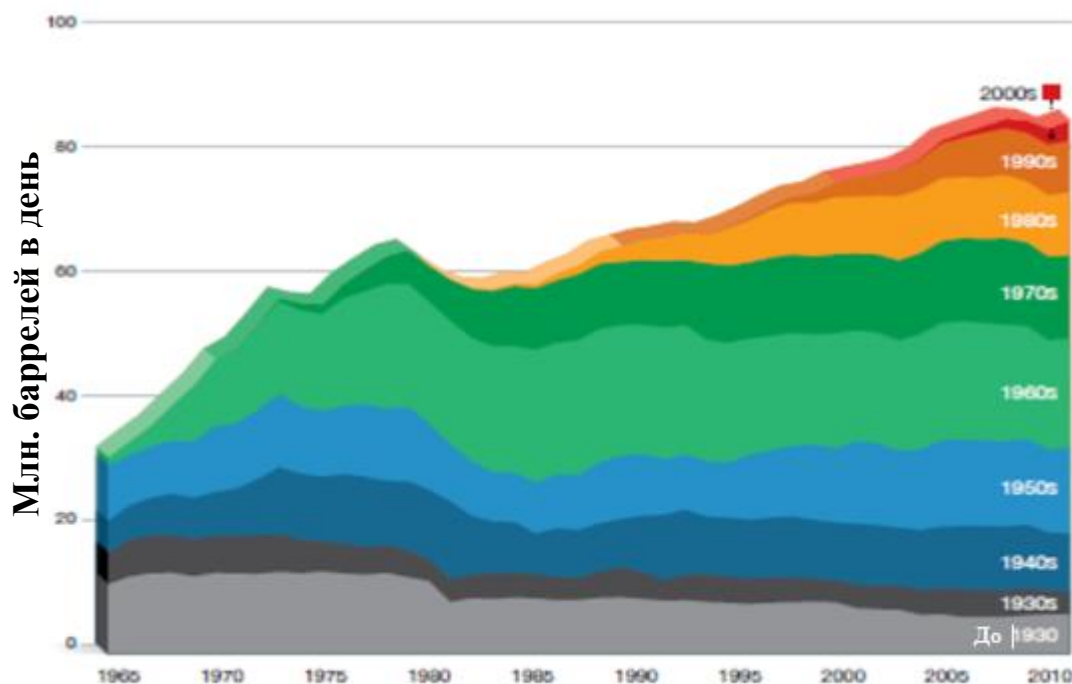


Рис. 4. Доля вновь открываемых гигантских месторождений нефти относительно известных резервов [13].



*Рис. 5. Мировая добыча нефти по датам открытия разрабатываемых месторождений [14].*

В результате сокращения ресурсов поддержание уже практически не растущего мирового уровня добычи нефти требует все более высоких затрат, т.е. каждый следующий баррель добытой нефти обходится мировой экономике все дороже и дороже. За 30 лет с 1973 по 2003 г. при росте мирового объема добычи нефти всего на ~60% затраты на ее добычу в фиксированных ценах выросли почти в 17 раз [15]. А совокупный объем мировых затрат на добычу нефти достиг в 2013 г. 700 млрд долл. в год. 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 вопросом. Безусловно, в земной коре еще остаются неоткрытые месторождения жидких углеводородов, но вряд ли их объем велик. Гораздо больший интерес представляет разработка уже известных, но

трудноизвлекаемых ресурсов, расположенных в морских акваториях, или представленных различными видами трудноизвлекаемой или тяжелой нефти. Рисунок 6 схематически показывает, что 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 [16]. Рост инвестиций в технологии добычи нефти и применение новейших технологических достижений может значительно увеличить общую отдачу месторождений и, тем самым, ресурсы нефти, реально доступные мировой экономике.

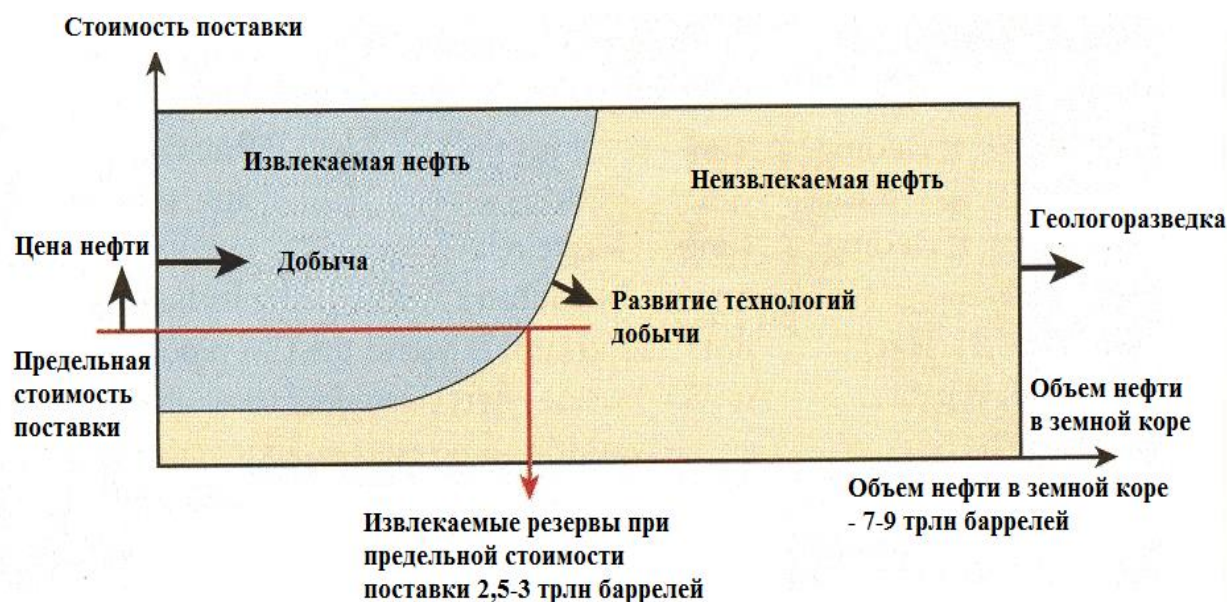


Рис. 6. Факторы, определяющие извлекаемые ресурсы нефти [16].

Что касается конкретного периода истощения нефтяных ресурсов, то различные прогнозы сильно различаются между собой (рис. 7). Наиболее реалистические прогнозы предсказывают достижение пика добычи, с учетом использования всех нетрадиционных и трудноизвлекаемых разновидностей нефти, в течение одного-двух ближайших десятилетий, с последующим плавным снижением ее добычи, замедляемым за счет появления новых технологий, повышающих отдачу пластов. На явное приближение мировой добычи нефти к своему пику свидетельствуют и крайне низкие, несмотря на

острую потребность в ней и постоянный рост затрат на добычу, темпы ее роста, всего на уровне  $\sim 0,5\%$  в год.

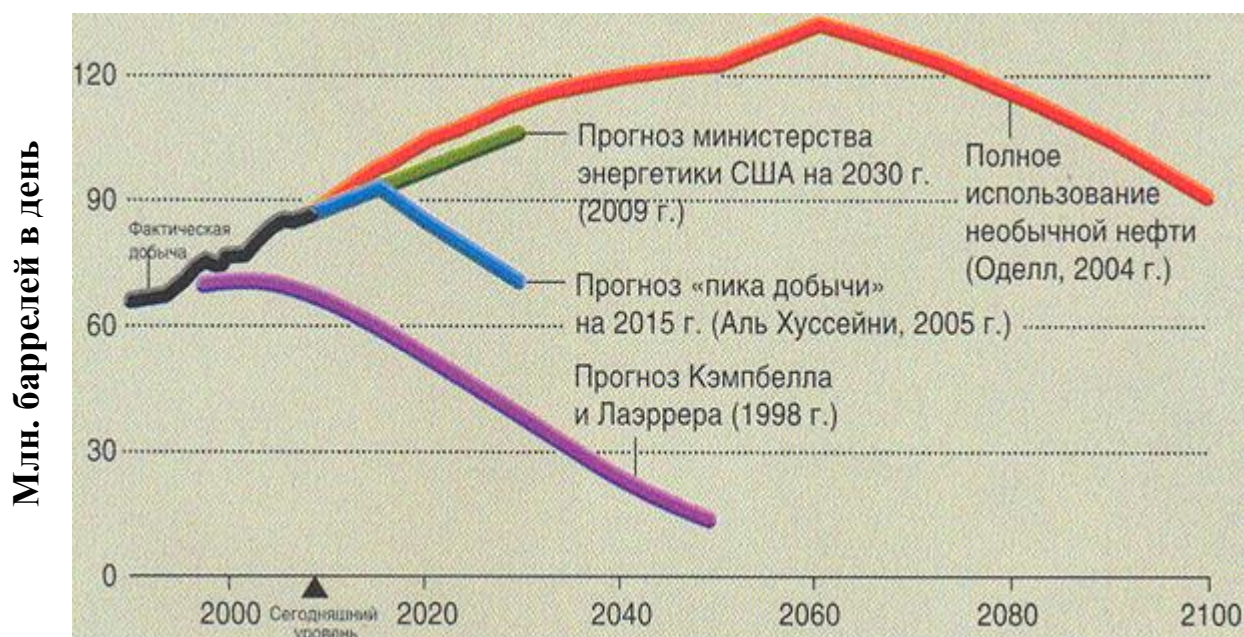


Рис. 7. Различные прогнозы мировой добычи нефти [17].

Многие нефтедобывающие страны мира уже прошли пик своей добычи, а в большинстве остальных период его достижения оценивается всего несколькими годами. По данным Мирового энергетического агентства (IEA) только в 20-ти ведущих нефтедобывающих странах прогнозируемое время полного истощения ресурсов (отношения общего 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. Прогнозная оценка технически извлекаемых запасов сланцевой нефти и других ее нетрадиционных ресурсов показывает, что хотя эти запасы и значительны, но они явно несоразмерны тем огромным потребностям в энергии, которые будут необходимы человечеству уже в ближайшем будущем. Поэтому нефть, оставаясь самым удобным и

привлекательным источником энергии, тем не менее, постепенно вынуждена сдавать свои позиции.

### **3.2.2. Уголь**

Запасы угля огромны и, по некоторым прогнозам, могут обеспечивать потребности мира в энергии в течение нескольких столетий, поэтому в отношении ресурсной базы он имеет несравненные преимущества по сравнению с нефтью. Однако это в значительной степени перечеркивается его низкими потребительскими и экологическими характеристиками. Попытка создания экологически чистой угольной энергетики, предпринятая пару десятилетий назад США, на которую были затрачены огромные средства, оказалась экономически несостоятельной. Сейчас 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, опасностями шахтной добычи, относительно низкой калорийностью угля, что делает нерентабельным его перевозки на большие расстояния, и экологическими проблемами, возникающими при его использовании. До сих пор также не удалось решить проблему достаточно рентабельной конверсии угля в жидкое топливо, несмотря на почти столетнюю историю этих усилий. Практически все недостатки, свойственные углю как энергоресурсу, присущи и другим твердым горючим ископаемым, например, горючим сланцам и торфу, использование которых в энергетике имеет преимущественно локальное значение.

### **3.2.3. Природный газ**

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

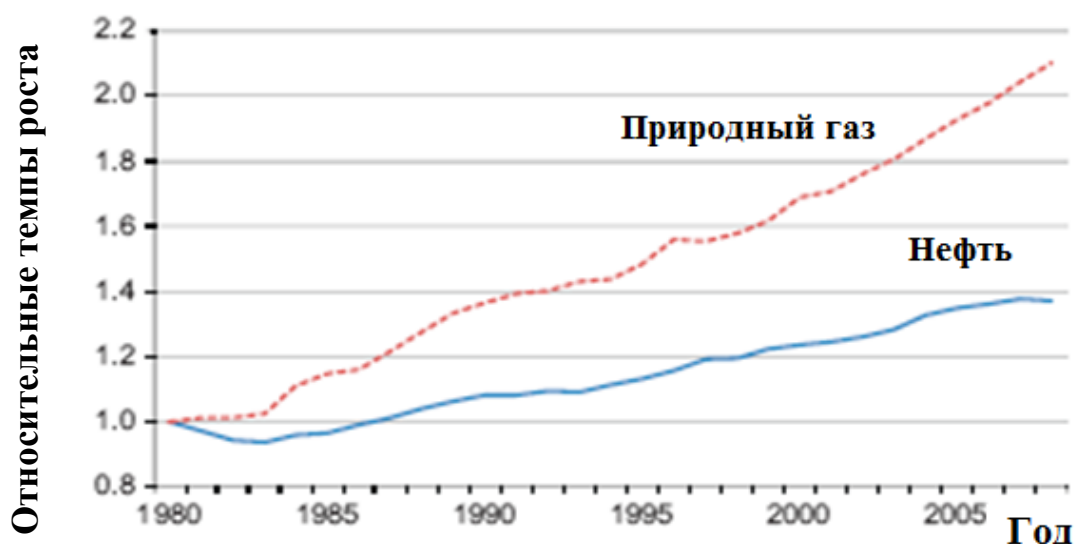


Рис. 8. Относительные темпы роста мирового потребления нефти и газа (1980 г = 1) [18].

Основные геологически доказанные запасы традиционного природного газа сосредоточены в двух регионах мира – странах СНГ и на Ближнем Востоке. В качестве традиционных ресурсов природного газа рассматриваются залежи с минимальными запасами 0,1 млрд м<sup>3</sup> и начальным дебитом скважин более 30 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Общее число месторождений с залежами свободного газа в мире превышает 17 000 и в более 30 000 нефтяных месторождений газ присутствует в виде второстепенного компонента (нефтяной или попутный газ). Из примерно 4500 наиболее крупных месторождений природного газа лишь несколько десятков, составляющих примерно 2% от их общего числа, относятся к категории крупных месторождений, дающей основной вклад в поставки товарного природного газа для энергетики и химической переработки [19]. 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 различными источниками величинами от 350–420 трлн м<sup>3</sup> (осторожные оценки) до 500–550 и даже до

1000 трлн м<sup>3</sup> (см. [20]). Согласно статистическим данным, более 90% выявленных в мире залежей нефти и газа сосредоточено на глубинах до 3 км. Разведанность этого слоя очень высока, поэтому в будущем здесь будут открываться преимущественно мелкие залежи углеводородов. К сожалению, современные технологии добычи, транспортировки и использования углеводородных ресурсов, ориентирующееся, прежде всего, на ресурсы крупнейших месторождений, практически не учитывает это обстоятельство.

Максимальные темпы прироста традиционных ресурсов природного газа, также как в свое время и ресурсов нефти, были достигнуты в 70-х годах прошлого века. А в начале текущего столетия, с задержкой примерно в 15 лет по сравнению с нефтяной отраслью, темпы мировой добычи традиционного природного газа сравнялись с темпом открытия новых крупных месторождений. То есть 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 извлечения этих ресурсов. Это позволяет рассматривать огромные ресурсы нетрадиционного природного газа как реально доступный резерв развития мировой энергетики.

Известные механизмы образования в земной коре метана и других газообразных углеводородов [21–25] 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 и в илах озер, морей и океанов. Метан содержится в кристаллических сланцах, мраморах, гнейсах, гранитах и других горных породах, причем на каждый килограмм породы приходится до 0,1 м<sup>3</sup> метана. В небольших концентрациях метан растворен в пресной и морской воде. Он входит в состав почвенного воздуха и земной атмосферы. Много метана растворено в пластовых водах 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.

Удельное газосодержание подземных вод относительно невелико (0,3–20 м<sup>3</sup> газа на 1 м<sup>3</sup> воды), что делает нерентабельной добычу газа в промышленных масштабах. Но общие ресурсы газа в подземных водах до глубин в 4500 м могут достигать 10 000 трлн м<sup>3</sup>. Вследствие низкого газосодержания, промышленная добыча возможна лишь в небольших объемах и в местах аномально высокой газонасыщенности подземных вод. Например, в месторождении Мобара в Японии газосодержание подземных вод в хорошо проницаемых породах на глубине 200–600 м достигает 25–28 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> добываемой воды. Поэтому газ подземной гидросферы пока рассматривается как весьма проблематичный источник природного газа [26].

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 м<sup>3</sup> при образовании бурого угля до 192 м<sup>3</sup> при образовании каменного угля [26].

Метан скапливается благодаря адсорбции в угле, в вертикальных разломах и трещинах угольных пластов, расслоениях и трещинах между ними. При добыче из одной тонны угля обычно выделяется 6–8 м<sup>3</sup> газа. Так как мировые ресурсы угля составляют примерно 10<sup>4</sup> 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 м<sup>3</sup> природного газа. Поэтому даже умеренная добыча газа из угольных пластов могла бы внести существенный вклад в обеспечение мира природным газом.

«Нетрадиционный» угольный метан уже сейчас занимает заметное место в объеме газодобычи ряда стран. В США активная добыча угольного метана ведется с 50-х годов, а ее годовой объем в настоящее время превышает 55 млрд м<sup>3</sup>, что составляет более 7% от общей добычи природного газа. Добыча угольного метана ведется также в Канаде, Австралии, Китае, Индии, Индонезии и др. странах. Метаноносность высокометаморфизованных угольных пластов возрастает с увеличением глубины их залегания и достигает 40–50 м<sup>3</sup>/т. Предварительная дегазация угольных пластов – необходимое условие безопасной работы шахтеров и источник сопутствующего метана. Хотя отечественными шахтами ежегодно выбрасывается в атмосферу свыше 7,5 млрд м<sup>3</sup> метана, в промышленных масштабах его утилизация до сих пор практически не осуществляется.

Среди нетрадиционных источников углеводородных газов необходимо также отметить природные и антропогенные источники биогаза, преимущественно метана, образующегося в результате бактериального брожения органического вещества.

Однако в качестве основных нетрадиционных источников природного газа сейчас рассматриваются сланцевый газ и газовые гидраты. Создание в США в начале века промышленной технологии добычи сланцевого газа стало крупнейшим событием в мировой энергетике. До этого сланцевый газ даже не рассматривался как реально извлекаемый ресурс. Поэтому превращение огромных запасов сланцевого газа в доступное энергетическое сырье можно рассматривать как крупнейшую за последние полвека научно-техническую революцию в энергетике. 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 в 1,5–2 км в слабопроницаемых для газа осадочных породах, где, собственно, и протекает генезис (т.е. образование) газа. Из-за большой глубины залегания сланцевых

пород и их слабой газопроницаемости разработка этих ресурсов потребовала решения нескольких сложнейших технических проблем. 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 оправдания больших издержек 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 (гидроразрыве) в пласт под большим давлением закачивается 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 вещества, в основном ПАВы, увеличивают отдачу.

После гидроразрыва и выхода закачанной воды эффективная эксплуатация скважины может продолжаться в течение нескольких лет, хотя уже в течение первого года дебит скважины падает 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 породами, 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 [27]. То есть добыча

сланцевого газа может планомерно вестись на огромных территориях, расположенных над зонами с газосодержащими сланцевыми породами.

Тем не менее, сама технология добыча сланцевого газа, на разработку которой американские компании затратили пару десятков лет и миллиарды долларов, остается крайне сложной и дорогостоящей. Сейчас стоимость подготовки одной скважины к эксплуатации оценивается примерно в 5 млн долл. и продолжает постепенно снижаться, что позволяет американским добывающим компаниям поставлять газ на внутренний рынок по беспрецедентно низкой цене порядка 120 долл./1000 м<sup>3</sup>. 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 это соединения включения (клатраты), образующиеся при внедрении молекул газа в пустоты кристаллических структур, составленных из молекул воды. Углеводороды с размерами молекул, большими, чем у изобутана, гидратов не образуют, так как уже не помещаются в полость, образуемую молекулами воды. Один объем воды при образовании гидрата связывает от 70 до 210 объемов газа, при этом удельный объем воды возрастает на 26-32%. При образовании гидрата метана один объем воды связывает 207 объемов метана. А при разложении 1 м<sup>3</sup> гидрата метана при нормальных условиях выделяется 164,6 м<sup>3</sup> газа. При этом объем, занимаемый газом в гидрате, не превышает 20%. Таким образом, в гидратном состоянии 164,6 м<sup>3</sup> газа занимают объем всего 0,2 м<sup>3</sup> [28].

Внешне гидраты метана выглядят как лед или плотный снег, а при разложении (таянии) выделяют воду и метан. В природных условиях они широко распространены и образуют крупные залежи метанового газа. На океанском дне даже при температуре +10°C уже на глубине 700 м давление

достаточно для образования газовых гидратов. Мировые ресурсы газа в газогидратных залежах, сосредоточенных на материках, оцениваются величиной около  $10^{14}$  м<sup>3</sup>. А ресурсы газа, сосредоточенные в гидратном состоянии в акватории Мирового океана, в пределах шельфа и материкового склона – в  $1,5 \cdot 10^{16}$  м<sup>3</sup> [28], хотя имеются и более высокие оценки. Энергия, высвобождающаяся при разложении газогидратных залежей, столь велика, что этот процесс может инициировать тектономагматические процессы в литосфере Земли.

Закономерности распространения скоплений газовых гидратов, а также изотопный состав газогидратных газов и вод свидетельствует о глубинном генезисе углеводородных газов, вошедших в состав газогидратов.

Мощнейшие скопления газовых гидратов приурочены в основном к краевым частям океанического дна, где продолжается океанообразование, и где в современную эпоху происходит массовое поступление глубинного метана. Большая часть газовых гидратов обнаружена на дне океанов в молодых отложениях – метан продолжает поступать в гигантских объемах. Той же причиной обусловлено образование нефти и газа на континентах. В Мезозое и Кайнозое сформировались осадочные бассейны, ставшие резервуарами углеводородов, где расположено большинство известных месторождений нефти и газа. Разница лишь в том, что на континентах возникшая по той же причине и в тот же отрезок времени, что и океаны, впадина заполнялась осадками, в которых и накапливался метан, впоследствии химическим и биогенным путями преобразованный в нефть и углеводородные газы.

По некоторым оценкам залегающий в плейстоцен-современных осадках газогидратный слой содержит не менее  $11,3 \cdot 10^{18}$  м<sup>3</sup> или  $8,5 \cdot 10^{15}$  т метанового углерода. Другие источники не разделяют столь высоких значений гидратоносности, оценивая их ресурсы в  $2 \cdot 10^{16}$  м<sup>3</sup>. Тем не менее, и

по этой оценке более половины органического углерода в земной коре, видимо, содержится в составе газовых гидратов, что вдвое превышает все разведанные и неразведанные ресурсы нефти, угля и газа вместе взятые [30]. Особенно важно, что эти гигантские скопления метана содержатся в плейстоцен-современных отложениях, образовавшихся в последние пять миллионов лет. То есть образовавший их метан выделился за время, составляющее одну тысячную всей истории планеты.

В настоящее время имеются сведения о более чем 100 выявленных газогидратных залежах, а потенциальные мировые запасы газа в гидратном состоянии, по оценкам специалистов, превышают  $16 \cdot 10^{12}$  тнэ (тонн нефтяного эквивалента). Около 98% ресурсов газогидратов сосредоточено в акваториях Мирового океана на глубинах 200–700 м, в придонных осадках толщиной до 400–800 м и более, и только 2% – в приполярных частях материков. Однако и последний факт заслуживает серьезного внимания, поскольку это соответствует 300 трлн м<sup>3</sup> газа, что в полтора раза превышает мировые разведанные запасы природного газа. Например, при современном уровне потребления выявленные запасы газа в гидратном состоянии в США могут обеспечить потребности страны в природном газе в течение 104 лет.

Разработка природных газогидратов – одна из наиболее промышленно значимых альтернатив разработке традиционных месторождений природного газа. Все большее число стран, включая США, Канаду, Индию, Китай, Японию принимает национальные хорошо финансируемые программы по исследованиям газогидратов и поискам их скоплений. Их оптимизм базируется на том, что уже при небольших масштабах выполненных геофизических и буровых работ, открыты гигантские скопления газогидратов и газогидратные провинции. Однако остаются сложности с созданием в обозримом будущем технологий, по которым извлечение метана из газогидратов станет 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 практически извлекать их при приемлемых финансовых, энергетических и технологических усилиях. Рисунок 9 демонстрирует наличие различных видов природного газа в земной коре.

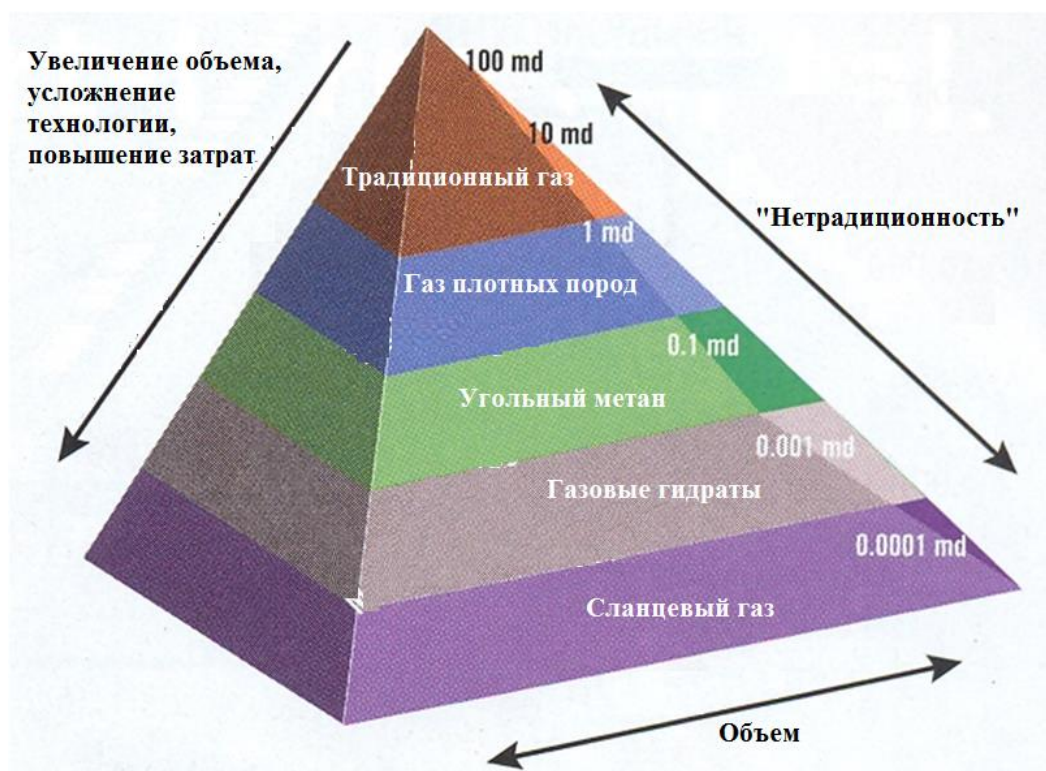


Рис. 9. Наличие различных видов природного газа в земной коре. Цифры – проницаемость пород, вмещающих соответствующий вид газа, в миллиардах (md).

По мере нарастания «нетрадиционности» природного газа с одной стороны растет его объем в земной коре, но с другой стороны, увеличиваются сложность извлечения и необходимые для этого финансовые и энергетические затраты. Как мы видим, человечество располагает огромными ресурсами природного газа (табл. II). Некоторые виды этих ресурсов еще плохо изучены, но независимо от конкретных оценок уже

очевидно, что они настолько велики, что при всех разумных сценариях развития нашей цивилизации их хватит еще на десятки, а может быть и сотни лет.

**Таблица 2**

**Ресурсы природного газа по состоянию на 2018 г.**

|                                        |                             |
|----------------------------------------|-----------------------------|
| Годовая добыча                         | 4,1 трлн м <sup>3</sup>     |
| Доказанные ресурсы                     | 209 трлн м <sup>3</sup>     |
| Прогнозируемые ресурсы                 | 280 трлн м <sup>3</sup>     |
| Угольный метан                         | 260 трлн м <sup>3</sup>     |
| Сланцевый газ                          | 400–700 трлн м <sup>3</sup> |
| Газовые гидраты                        | 20 тыс. трлн м <sup>3</sup> |
| Дегазация планеты                      | ~1 трлн м <sup>3</sup>      |
| Образование CH <sub>4</sub> в биосфере | ~1 трлн м <sup>3</sup>      |

Конечно, добыча нетрадиционных видов газа сложнее и дороже добычи традиционных ресурсов. Но по мере выработки наиболее удобных месторождений постоянно растет и себестоимость добычи традиционного газа. Также как и при добыче нефти, мы вынуждены постоянно осваивать все более сложные для извлечения и потому более дорогостоящие ресурсы. Однако это не драматическое скачкообразное удорожание будущих газовых ресурсов, 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 когда мы говорим о ресурсах традиционного природного газа в России, необходимо понимать, что они в значительной степени представлены арктическими ресурсами, себестоимость добычи которых может быть значительно выше себестоимости добычи сланцевого газа на территории США или других стран. При этом стоимость их транспортировки на мировые рынки Европы

или Азии также выше стоимости транспортировки в эти же регионы газа из США.

Доля нетрадиционного газа (газ плотных коллекторов и метан угольных пластов) уже составляет свыше 15% от общемировой добычи, и имеет явную тенденцию роста, возможно до 40%. Его общая ресурсная база сейчас оценивается примерно в 100 лет текущего мирового потребления газа. Поэтому к 2030-м годам природный газ, по оценкам, станет крупнейшим первичным мировым источником энергии, что будет означать конец почти столетней эры нефти.

Запасы сланцевых углеводородов, по сути, являются первичными по отношению к традиционным запасам. Они распределены по всей 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 вообще можно как-то прогнозировать. До последнего времени единственным препятствием для их использования было отсутствие соответствующих технологий добычи. На сегодняшний день, по крайней мере, 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, то есть 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 около 5% добываемой нефти, так что удовлетворить ее потребности будет проще. Кроме того, в последние годы бурно

развивается новая отрасль – газохимия, которая, в принципе, способна производить все то огромное разнообразие продуктов, которое дает современная нефтехимия.

Таким образом, имеющиеся на Земле ресурсы ископаемых источников вполне способны удовлетворять потребности мировой энергетики, по крайней мере, в течение XXI века, но за этот период им должна быть подготовлена реальная замена.

#### ***3.2.4. Атомная энергетика***

Атомная энергетика также относится к источникам, использующим ископаемые природные энергоресурсы – изотоп урана 235 ( $U^{235}$ ). Его содержание в природном уране составляет всего 0,72%, и при существующем уровне развития атомной энергетики время истощения его запасов с экономически приемлемой стоимостью производства до 80 долл./кг  $U_3O_8$  оценивается всего примерно 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  $U^{238}$ , не позволяет рассчитывать на атомную энергетику как долговременный источник энергии для человечества. Неиспользуемый пока значительный резерв урана – морская вода, средняя концентрация урана в которой составляет  $3,3 \times 10^{-6}$  г/л.

Сейчас на долю атомной энергетики приходится примерно 4,4% вырабатываемой в мире первичной энергии, немногим меньше, чем на гидроэнергетику. Поскольку и атомная и гидроэнергетика производят исключительно электроэнергию, в производстве электроэнергии их доля значительно выше – примерно шестая часть мирового производства электроэнергии и примерно треть европейского осуществляется за счет атомной энергии. А в ряде стран (Франция, Словакия, Бельгия, Швеция, Швейцария) атомная энергетика доминирует в производстве электроэнергии.

**Таблица 3. Доля атомной энергетики в производстве  
электроэнергии ряда стран в 2024 г. [7]**

| <b>Страна</b>  | <b>Доля атомной энергетики в<br/>производстве электроэнергии</b> |
|----------------|------------------------------------------------------------------|
| Франция        | 67,8                                                             |
| Южная Корея    | 30,2                                                             |
| Испания        | 19,1                                                             |
| Россия         | 17,8                                                             |
| США            | 17,8                                                             |
| Канада         | 13,5                                                             |
| Великобритания | 12,2                                                             |
| Япония         | 8,4                                                              |
| Китай          | 4,5                                                              |

В настоящее время 33 страны эксплуатируют атомные электростанции. По состоянию на январь 2023 года в мире насчитывалось 413 энергетических реакторов общей мощностью около 378 ГВт и 57 реакторов находилось в стадии сооружения. Больше всего АЭС (98 энергоблоков) эксплуатируется в США, на втором месте идет Франция (58 энергоблоков), на третьем — Китай (48 блоков). В России (четвертое место) работает 10 АЭС (39 энергоблоков). Мировым лидером по доле атомной энергетики в общей выработке электроэнергии — почти 70%, является Франция.

### ***3.2.5. Гидроэнергетика***

Ресурсная база гидроэнергетики, 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 Международного энергетического агентства (МЭА), общий технически реализуемый потенциал мировой гидроэнергетики составляет 14000 ТВт-ч в год. Из них около 8000 ТВт-ч в год рассматриваются в настоящее время как экономически обоснованные. На сегодня гидроэнергетические мощности объемом около 808 ГВт либо эксплуатируются, либо находятся на стадии строительства с предполагаемым

ежегодным совокупным объемом генерируемой энергии около 7080 ТВт·ч. То есть с учетом географических факторов и неизбежных потерь в процессе преобразования энергии, на Земле уже задействована основная часть реально доступного потенциала гидроэнергетики. Большая часть оставшегося потенциала гидроэнергетики приходится на Африку, Азию и Латинскую Америку. Хотя в основном за счет этих континентов развитие гидроэнергетики будет продолжаться, ее доля в мировом энергобалансе уже не может существенно увеличиться.

### ***3.2.6. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ)***

Хотя формально ВИЭ можно рассматривать как «вечные» источники энергии, их реальный ресурс ограничен если не временными рамками, то объемом получаемой энергии [29]. Все известные нам разновидности ВИЭ: гидроэнергия, энергия ветра, морских волн, приливов, биотоплива и т.п., за исключением крайне незначительной по своему потенциалу геотермальной энергетики, являются производными солнечной радиации, единственного реального внешнего источника поступления энергии на Землю. Поэтому нет смысла подробно анализировать достоинства и недостатки каждого из них. Вполне достаточно на основе известных базовых физических параметров солнечной радиации рассмотреть принципиальный вопрос о ее реальном потенциале как первоисточнике доступных нам ВИЭ, так же как в свое время на основе базовых физических принципов был решен принципиальный вопрос о невозможности создания «вечного двигателя».

Формально ресурс поступающей на Землю солнечной радиации огромен – верхней границы атмосферы Земли за год достигает колоссальный поток солнечной энергии –  $\sim 5.6 \cdot 10^{24}$  Дж. Эта величина примерно в 5000 раз превышает ежегодную потребность человечества в энергии. Примерно 35% этой энергии атмосфера Земли отражает обратно в космос. Остальное количество расходуется на нагрев земной поверхности, испарительно-осадочный цикл в атмосфере, образование волн в морях и океанах, воздушных и океанских течений и ветра, а также процессы фотосинтеза. В

ходе всех этих процессов высокопотенциальная энергия солнечной радиации ультрафиолетового и видимого диапазона превращается в низкопотенциальную энергию нагретой поверхности Земли (ее средняя температура примерно 20 °C), испускаемую нашей планетой в виде инфракрасного излучения обратно в космическое пространство.

Почему возобновляемая солнечная энергетика не может быть основой мировой промышленной энергетики, выдающийся отечественный ученый академик П.Л. Капица еще 50 лет назад объяснил на основе представлений о плотности потока энергии [30]. Действительно, количество энергии, рассеянной в окружающем нас пространстве, огромно. Но как ее извлечь? Все разновидности ВИЭ используют «низкопотенциальную энергию», плотность которой в применяемом энергоносителе (источнике энергии) крайне низка. Для того чтобы представить себе, как отличаются низкопотенциальная энергия, в изобилии рассеянная вокруг нас, и высокопотенциальная энергия, используемая в традиционной энергетике, достаточно сравнить поток энергии, переносимый дуновением ветерка или ласковыми солнечными лучами, с концентрированной энергией в камере сгорания газовой турбины или в атомном реакторе. Именно проблема концентрирования и использования рассеянной низкопотенциальной энергии, которой оперируют все без исключения возобновляемые источники, является главным препятствием на пути их промышленного использования.

Для иллюстрации проведем простую оценку потенциала солнечной радиации, а следовательно, и всех порождаемых ею вторичных источников энергии. Поток солнечной радиации в полдень на экваторе составляет  $\sim 1 \text{ кВт/м}^2$ . С учетом смены дня и ночи его среднее значение в три раза ниже, а в средних широтах оно ниже еще в два раза и составляет  $\sim 150 \text{ Вт/м}^2$ . При реальном КПД солнечных панелей менее 24% для обеспечения средней мощности в 1 кВт необходимо собрать и преобразовать в электроэнергию излучение с площади в  $\sim 30 \text{ м}^2$  [31].

Мировое производство энергии составляет примерно 160 000 ТВт\*ч [7]. Чтобы обеспечить производство такого объема энергии за счет солнечных панелей, необходимо будет оборудовать ими площадь в  $\sim 6 \cdot 10^{11} \text{ м}^2$ , или 0,6 млн км<sup>2</sup>. С учетом вспомогательных площадей для оборудования, подстанций, систем преобразования и аккумулирования энергии, дорог, линий электропередач и т.д. необходимая площадь превысит 1 млн км<sup>2</sup>, то есть около 1% земной суши [31]. Чтобы покрыть такие площади сложным технологическим оборудованием, в земной коре не хватит не только редких элементов, необходимых для изготовления солнечных панелей, но даже обычных конструкционных материалов. А изъятие такой значительной площади из экономического использования и природных экосистем нанесет непоправимый ущерб и тем, и другим.

Что касается других видов ВИЭ, плотность потока производимой ими энергии еще на порядок ниже, поэтому производство такого же объема энергии за их счет потребует примерно в десять раз большей площади, чем солнечная энергетика. Поэтому низкая ресурсная база ВИЭ исключает их доминирование в мировой энергетике.

### ***3.3 Себестоимость производства энергии***

Одним из наиболее важных параметров, который непосредственно влияет на решение о строительстве того или иного энергетического объекта, является стоимость производимой энергии. Эта стоимость, в свою очередь, помимо стоимости сырья зависит от стоимости применяемого энергетического оборудования и сроков его эксплуатации. При этом при расчете себестоимости получаемой энергии необходимо учитывать все затраты на приобретение энергетического сырья, строительство всех необходимых объектов для получения из него энергии и ее транспортировки потребителю, эксплуатационные расходы в течение всего срока эксплуатации оборудования, расходы на его демонтаж и утилизацию после завершения эксплуатации. То есть учитываются все затраты на получение энергии в течение всего жизненного цикла данного энергетического оборудования.

При производстве электроэнергии для сравнения экономической эффективности различных источников в качестве такой меры принимают нормализованную стоимость 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, величина LCOE может рассматриваться как ценовая граница безубыточности поставки данного вида энергии. Именно эта величина определяет экономическую эффективность использования различных источников электроэнергии, их реальную привлекательность для потребителя. Сооружение и эксплуатация источников энергии с LCOE, превышающей эту границу, возможно только при условии государственного субсидирования таких проектов. Значения этой величины для различных источников энергии приведены на рис. 10.

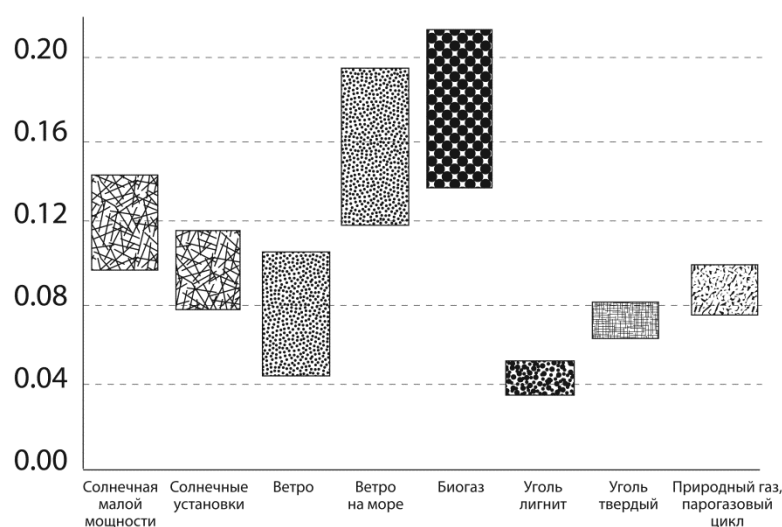


Рис. 10. Нормализованная стоимость производства электроэнергии на основе различных источников, в евро/кВтч [33].

### 3.4. Энергоэффективность источников энергии

Наиболее значимым и объективным параметром оценки реальных перспектив различных источников энергии, включая ископаемые

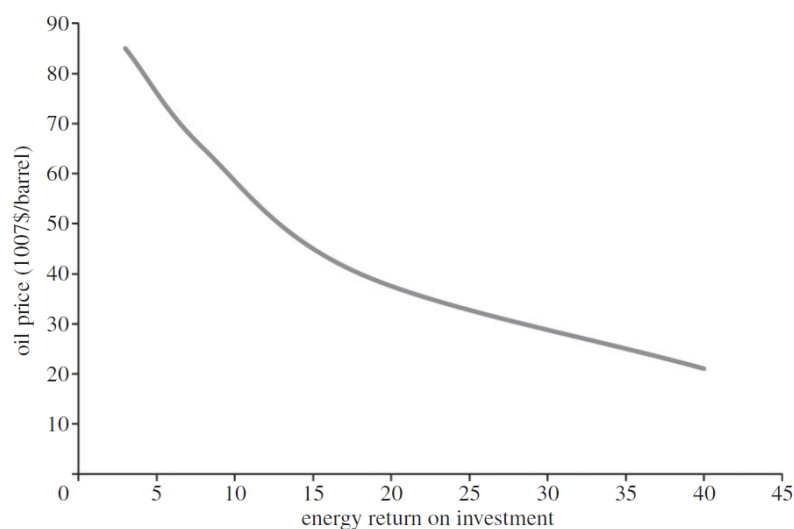
углеводороды, ВИЭ и все прочие альтернативные источники энергии является величина *EROEI (Energy Return On Energy Invested)* – отношение энергии, полученной при использовании данного вида ресурсов, к энергии, затраченной на ее производство [34]. Обычно используют сокращенную версию этого термина *EROI (Energy Return On Invested)*, которой мы будем пользоваться в дальнейшем. Этот показатель учитывает все затраты, включая производство, обслуживание в течение всего срока эксплуатации и утилизацию отработанного оборудования, используемого для получения, переработки и транспортировки энергии, восстановление и рекультивацию нарушенных природных объектов, затраты на ликвидацию аварий и экологического ущерба окружающей среде. Если для некоторого источника энергии EROI меньше единицы, то он превращается из источника в «потребителя» энергии, поэтому не может рассматриваться как ее первичный источник.

#### ***3.4.1. Энергетическая эффективность EROI как определяющий фактор оценки перспективности используемых источников энергии***

Термин EROI был введен в научный оборот относительно недавно, в 1981 г. [35], после двух потрясших мировую экономику нефтяных кризисов, в результате которых резко повысилась стоимость энергетических ресурсов, и критическое значение для мировой экономики затрат на получение энергии стало очевидным. Хотя в последующий период в связи с ростом интереса к «экологической повестке» усилилось внимание к экологическим аспектам различных источников энергии, быстрое увеличение в последние годы доли нетрадиционных и трудноизвлекаемых ископаемых источников в мировом энергобалансе и растущее понимание нереальности глобального перехода на ВИЭ снова выдвинули фактор EROI на первый план.

Исследование взаимосвязи между ценой на нефть, экономическим ростом и EROI за последние 40 лет [36] показало, что экономический рост происходил в периоды, когда низкие цены на нефть сочетались с ростом ее

предложения. Напротив, высокие цены на нефть приводили к увеличению доли расходов в валовом внутреннем продукте (ВВП) на энергоносители, что исторически приводило к рецессиям. При этом EROI и цены на нефть оказались обратно пропорциональными друг другу (рис. 11): увеличение предложения нефти за счет разработки более дорогостоящих трудноизвлекаемых и нетрадиционных источников с более низким EROI приводило к увеличению общих затрат на производство энергии. Авторы работы [36] назвали это «парадоксом экономического роста»: увеличение предложения нефти для поддержания экономического роста требует повышения цен на нефть, что подрывает этот экономический рост. Следовательно, если увеличение поставок нефти возможно только за счет ресурсов с более низким EROI, то цены на нефть должны вырасти, чтобы покрыть растущие издержки, тем самым сдерживая экономический рост.



*Рис. 11. Соотношение между ценой на нефть и EROI [34].*

Помимо обратно пропорциональной зависимости между совокупным EROI добычи нефти и ценами на нее, существует также зависимость между EROI и потенциальной прибылью нефтедобывающих компаний. При этом, когда EROI падает ниже значения 10, зависимость между EROI и прибылью становится нелинейной. Ну а минимальная цена нефти, необходимая для увеличения ее мировых поставок за счет нетрадиционных ресурсов, ставших

основным источником поддержания объемов ее добычи, практически сопоставима с той, которая в прошлом приводила к экономическим спадам.

Одним из важных факторов, до сих пор смягчающих негативное влияние происходящего снижения EROI ископаемого топлива на мировую экономику, является иницилируемое этим снижением увеличение глобальных усилий по сохранению и более рациональному использованию энергии. Эта нарастающая тенденция позволила за последний период почти вдвое снизить удельное потребление энергии на производство единицы ВВП в ведущих экономиках мира (рис. 12).

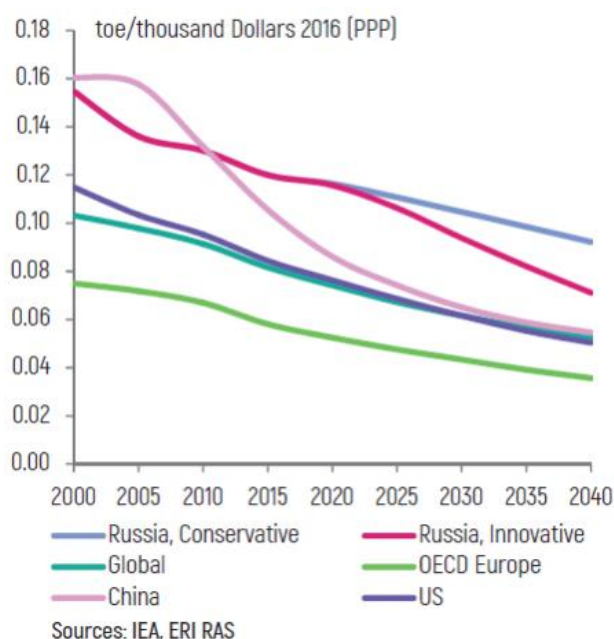


Рис. 12. Динамика снижения удельной энергоемкости ВВП ведущих мировых экономик, млн тнэ/тыс. долларов ВВП по ППС в 2016 году [37].

Концепция EROI наглядно показывает, что истинную ценность для общества и экономики представляет не вся производимая ими «валовая энергия», а только та ее часть, которая остается после вычета всех энергетических затрат на ее получение и преобразование, то есть так называемая «чистая энергия» [36]:

$$\text{Чистая энергия} = \text{валовая энергия} (1 - 1/\text{EROI})$$

По мере снижения EROI доля чистой энергии в общем объеме ее производства снижается экспоненциально (рис. 13). Это экспоненциальное

соотношение между валовой и чистой энергией получило название "обрыв чистой энергии", наличие которого определяет критическую величину EROI, составляющую примерно 10. Повышение значения EROI позволяет увеличивать долю энергии, которая реально используется обществом. Например, источник с  $EROI = 100$  обеспечивает обществу в качестве полезной 99% производимой им энергии. И наоборот, источник с низким EROI практически бесполезен для экономики. Только 50% энергии, производимой источником с  $EROI = 2$ , может быть реально использовано в экономике.

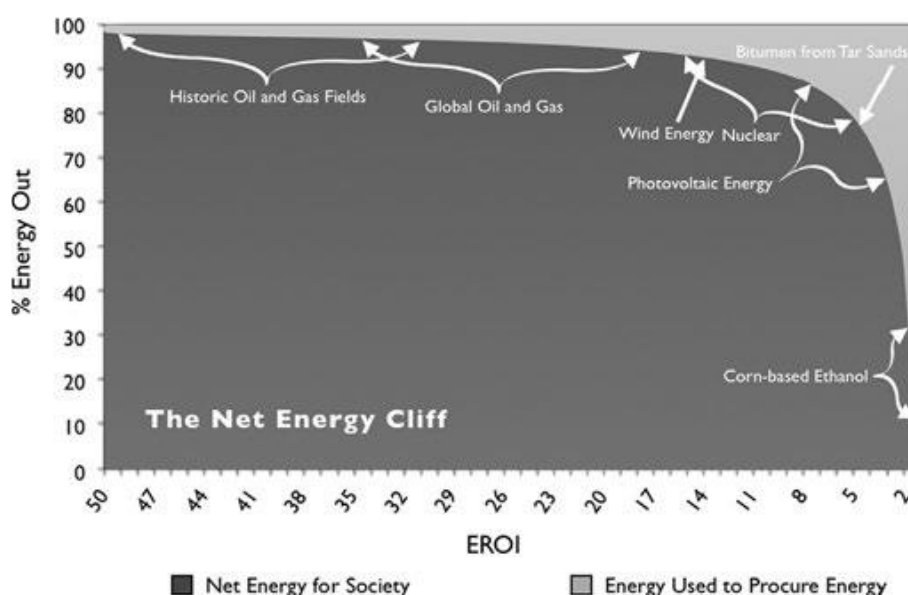


Рис. 13. График соотношения между чистой энергией и EROI. По мере снижения EROI доля чистой энергии в общем объеме ее производства снижается экспоненциально [38].

На рис. 13 отмечены исторические и текущие области значений EROI некоторых источников энергии. Пока, как в предыдущий период, мировая экономика использовала источники энергии с EROI ~100 или хотя бы ~20, как в настоящее время, этот вопрос мало беспокоил общество. Но по мере ускоряющегося снижения этой величины серьезность ситуации становится все более очевидной.

По мере перехода энергетики к источникам энергии с все более низким значением EROI все большая часть энергии, которая ранее использовалась для потребления и/или роста, направляется на производство самой энергии. Это снижает потенциал развития экономики и темпы ее экономического роста. Крайне важен принципиальный вопрос о том, каково минимальное значение величины EROI, при котором прогрессивное развитие общества еще может продолжаться. В работе [39] оценили, что минимальный EROI, необходимый для поддержания системы автомобильного транспорта в США, составляет 3. Поскольку в их расчет были включены энергетические затраты только на поддержание транспортной системы, разумно ожидать, что минимальный EROI для сохранения стабильности общества в целом должен быть намного выше.

Еще одна величина, отражающая влияние EROI на поток чистой энергии, получаемой обществом, это "коэффициент валовой потребности в энергии" GERR (Gross Energy Requirement Ratio). GERR указывает на соответствующее увеличение или уменьшение валового производства энергии, которое необходимо для поддержания чистого потока энергии, получаемого экономикой, с учетом изменения EROI при ее производстве. GERR рассчитывается путем деления общей потребности в энергии GER (Gross Energy Requirement) при использовании заменяющих источников энергии  $GER_x$  на потребности в энергии  $GER_{ref}$  эталонного или предшествующего источника энергии. Таким образом, GERR – это коэффициент, показывающий необходимое увеличение валовой выработки энергии при переходе на источники с меньшим EROI [34]:

$$GER_x = EROI_x / (EROI_x - 1),$$

$$GERR = GER_x / GER_{ref}$$

### 3.4.2. Энергетическая эффективность EROI базовых источников энергии и динамика ее изменения

Экономика всегда стремится использовать энергетические ресурсы с наиболее высоким EROI, поскольку они обеспечивают максимальный объем энергии при минимальных затратах. EROI базовых источников энергии является одним из основных факторов, определяющих темпы и перспективы развития экономики. Поэтому понятно, почему уголь, нефть и газ были и остаются фундаментом мировой энергетики (рис.14).

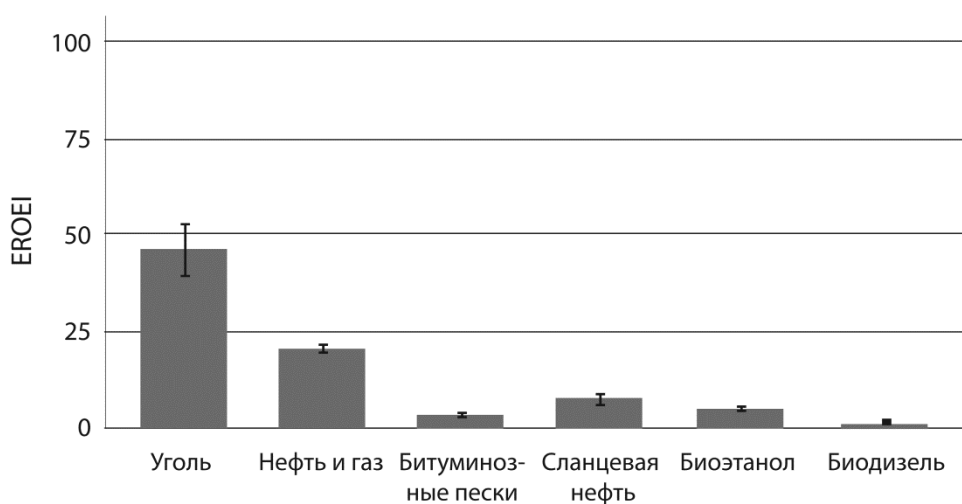


Рис. 14. Средние значения EROI для различных видов топлива [40].

Но по мере истощения высококачественных невозобновляемых ресурсов или наиболее удобных условий для размещения и применения альтернативных источников энергии приходится переходить на ресурсы с всё меньшим значением EROI. Это один из главных и неотвратимых трендов мировой энергетики. Например, когда впервые была начата промышленная добыча нефти, то энергии, содержащейся в одном барреле нефти, в среднем было достаточно, чтобы найти, извлечь и переработать 100 баррелей нефти. За прошедшее столетие это соотношение постепенно снизилось до 20–30 баррелей при добыче традиционной нефти и до 3–5 баррелей добытой нефти на один затраченный при добыче тяжелой битуминозной нефти. То есть при

добыче тяжелой нефти уже примерно 20–30% содержащейся в ней энергии идет на обеспечение самого процесса добычи и ее первичной подготовки [40]. Постоянное увеличение затрат энергии на добычу и переработку традиционных энергоресурсов приводит к постоянному и достаточно быстрому снижению EROI в мировой энергетике (рис. 15).

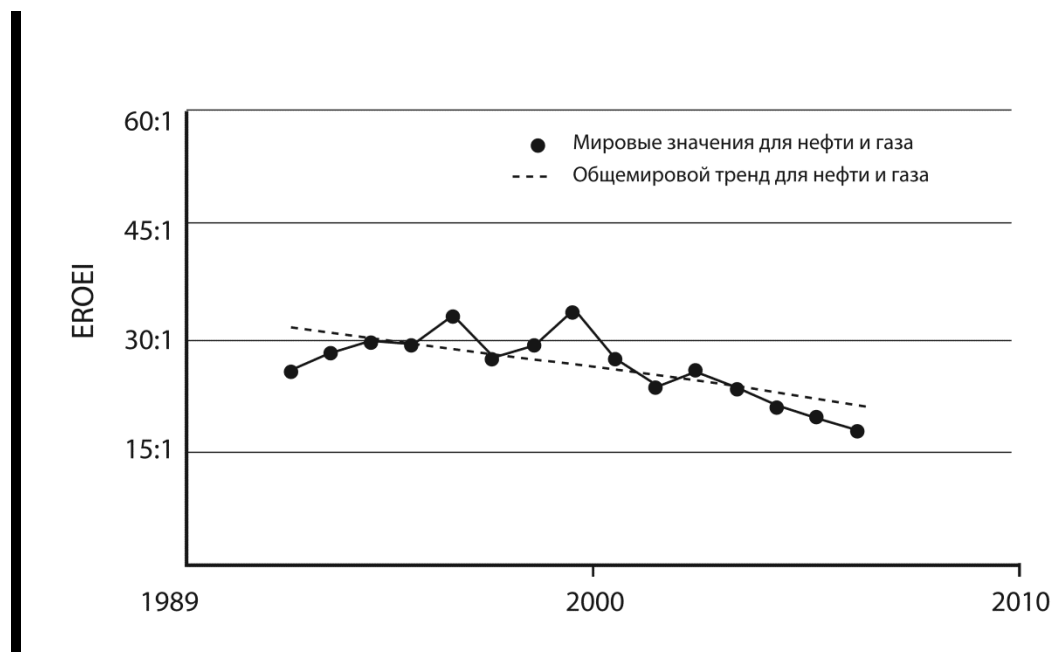


Рис. 15. Тенденции изменения EROI для мировой добычи нефти и газа [40].

Разумеется, при сопоставлении различных источников энергии помимо EROI необходимо учитывать очень многие параметры: надежность, доступность, удобство использования, энергонасыщенность и другие. Например, нефть энергонасыщенна и легко транспортируема, а энергия ветра непостоянна и производится локально. Но в любом случае при понижении коэффициента EROI основных источников энергии экономике становится труднее получать энергию, а ее стоимость относительно других ресурсов и товаров повышается, что делает величину EROI определяющим показателем при сравнении различных энергетических альтернатив.

Общее представление об EROI реально используемых источников энергии, а также его изменении со временем, дает рис. 16. Он наглядно показывает, почему среднемировая себестоимость энергоресурсов и поставляемой энергии непрерывно растет. Почему основой мировой

энергетики являются ископаемые топлива, а не солнечная энергетика, имеющая EROI лишь немного выше единицы. Почему биотоплива – биоэтанол и биодизель – имеющие в большинстве стран EROI всего 1,2–1,5, никогда не смогут стать первичным источником энергии для мирового автотранспорта.

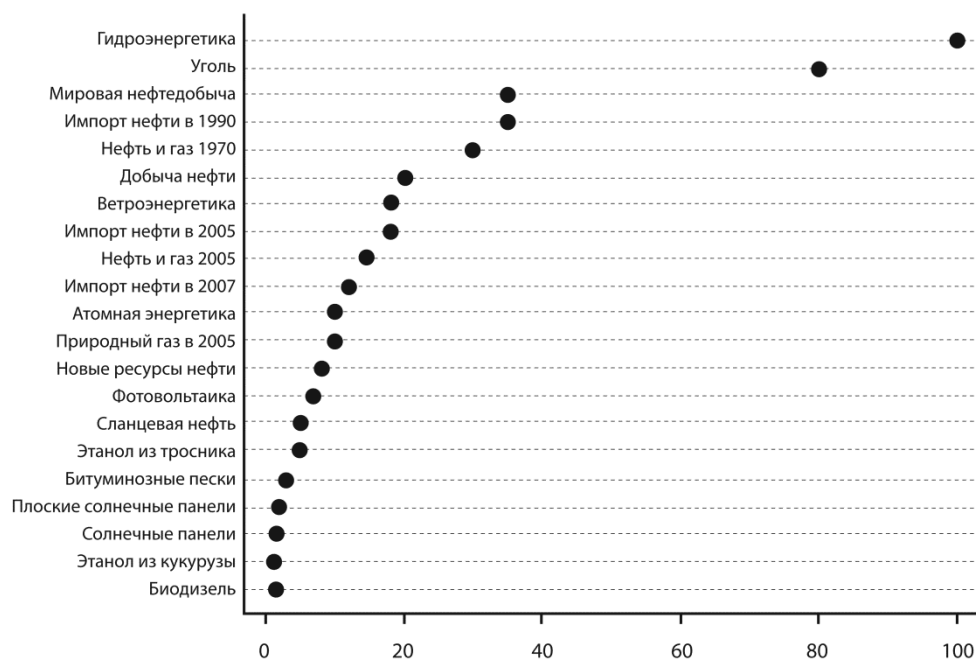


Рис. 16. Значения EROI (на примере США) для различных источников энергии и его изменение по мере истощения наиболее эффективных ресурсов [40].

Поскольку получение энергии требует значительных производственных усилий и энергетических затрат, при снижении EROI получение одного и того же количества чистой энергии занимает всё большую долю экономики. Поэтому непрерывное снижение EROI из-за истощения наиболее эффективных невозобновляемых ресурсов представляет собой одну из наиболее серьезных мировых экономических проблем. Поскольку пороговое значение EROI, при котором человечество еще может продолжать свое развитие, по оценкам, находится в районе 3, это однозначно исключает биотопливо и солнечную энергетику (рис. 16), из числа перспективных источников энергии.

Для иллюстрации представленной выше общей ситуации с реальной величиной EROI используемых и предлагаемых источников энергии и

динамики ее изменения кратко приведем имеющиеся конкретные данные. Эти данные, к сожалению, пока еще немногочисленны и достаточно противоречивы, но хорошо демонстрируют общие тенденции.

Средний показатель EROI при добыче нефти в США снизился примерно с 20 в начале 1970-х годов до 11 к 2013 г., в то время как средний мировой показатель EROI от примерно 30 в 2000 году снизился к 2013 г. примерно до 17. EROI при добыче нефти из глубоководных месторождений, скорее всего, ниже 10, а EROI при добыче сланцевой нефти составляет примерно 1,5 [35]. Примечательно, что в период с 1987 по 2000 год, когда нефтяная промышленность США увеличила количество буровых установок, используемых для добычи традиционной нефти, как и ожидалось, произошло практически пропорциональное увеличение объема добываемой нефти. Но в более поздний период с 2001 по 2012 год в связи со снижением EROI при расширении в общем объеме добычи доли нетрадиционной нефти наблюдалась уже очень слабая корреляция между интенсивностью бурения и объемом добываемой нефти [34].

По имеющимся оценкам, для рентабельной разработки новых месторождений нетрадиционной нефти (битуминозных песков) в Канаде цена нефти должна лежать в диапазоне от 70 до 90 долларов за баррель. Для рентабельной добычи нефти из глубоководных месторождений на морском дне она должна быть от 70 до 80 долларов за баррель [34]. Напомним, что за счет именно этих источников в настоящее время компенсируется падающая добыча традиционных наземных месторождений. Стоит также отметить, что выбросы парниковых газов при производстве бензина и дизельного топлива из битуминозных песков примерно на 15–60% выше, чем при их производстве из обычной нефти [41].

Для сланцевой нефти большинство исследований указывает значение EROI от 1,5 до 4, хотя в более ранних исследованиях приводили значения EROI от 7 до 13. Более поздние анализы ее добычи на базе “технологии Шелл”, которая считается относительно экологически безопасной и

применяется в настоящее время, дают оценки в диапазоне 3–4. Однако поскольку большую часть затрат составляет высокопотенциальная электроэнергия, а на выходе получают нефть, которая требует дальнейшей переработки, можно ожидать, что анализ с поправкой на качество энергоресурса приведет к значению, близкому к 1 [42].

Для угля значение EROI в США упало с примерно 100 в 1960-х годах до ~50, но затем начало увеличиваться, превысив значение 70 к 1987 году. Однако значения, скорректированные на качество добываемого энергоресурса, в 4 раза ниже [42].

Формально недостаток природных ресурсов наиболее востребованных жидких углеводородов может быть компенсирован уже освоенными в промышленном масштабе процессами конверсии угля в жидкие углеводороды (Coal To Liquid – CTL) и природного газа в жидкие углеводороды (Gas To Liquid – GTL). Однако технологии CTL и GTL являются не процессами получения энергии, а процессами ее преобразования, увеличивающими затраты на производство конечного энергоносителя и снижающими общий EROI. Кроме того, переход на процессы CTL и GTL приведет к значительному увеличению выбросов парниковых газов [43]. Существует также довольно узкий диапазон низких цен на газ и высоких цен на нефть, при котором процесс GTL может оставаться прибыльным [43]. Легче будет достигнуть рентабельности при внедрении процессов CTL из-за низкой стоимости угля, но будущая доступность, качество и стоимость этого ресурса остаются неопределенными. И скорее всего, пройдут десятилетия, прежде чем значительная часть мирового спроса на нефть сможет удовлетворяться за счет процессов GTL или CTL, а в переходный период экономика по-прежнему будет испытывать трудности с ростом в условиях высоких цен на нефть и недостаточного объема ее поставок.

В отношении атомной энергетики, видимо, наиболее достоверная информация содержится в работе [40], в которой ее EROI оценивается в

диапазоне 5–8. Более поздние исследования кажутся либо слишком оптимистичными, либо слишком пессимистичными. С одной стороны, по оценки World nuclear association, при расчетном периоде эксплуатации АЭС 40 лет значение EROI достигает 59, а при расчетном периоде эксплуатации АЭС 60 лет – 70 [44]. С другой стороны, имеются оценки, дающие значение этой величины менее 1 [43].

Среди возобновляемых источников энергии только крупные гидроэлектростанции в настоящее время имеют достаточно высокое значение EROI. Для остальных ВИЭ он заметно ниже величины 3: для наземных ветровых станций – 2,9, для ветровых станций в море – 2,3, для солнечной фотоэлектрической (Photovoltaic – PV) энергетики – 1,6 и для энергетики на основе концентрирования солнечной энергии (Concentrated Solar Power – CSP) – 0,8 [45]. То есть средние уровни EROI для ВИЭ в настоящее время значительно ниже, чем в энергетике на ископаемом топливе. Рассматривать в контексте глобальной энергетики такие малоресурсные источники энергии, как энергия морских приливов или геотермальные источники нет смысла, хотя их локальное применение в ряде случаев может быть весьма эффективным. Таким образом, хотя ВИЭ могут временно занять заметную долю в энергетике за счет политического давления и экономических стимулов, исторически они обречены, если не продемонстрируют возможность достижения более высокого EROI.

Что касается биотоплива, то, несмотря на бум первых двух десятилетий этого века, инициированный президентом США Дж. Бушем и подписанным им в 2007 г. законом об «Энергетической независимости и безопасности», уникально низкий EROI и ограниченная мировая ресурсная база биотоплива [1, 46] совершенно закономерно и ожидаемо привели к тихому сокращению активности в этой сфере. Исключение составляют отдельные успешные за счет уникальных природных условий примеры, например этанол из сахарного тростника в Бразилии, и вполне оправданная деятельность по переработке всевозможных биологических отходов. С учетом того, что EROI

большинства наиболее практически значимых видов биотоплива находится в диапазоне от 1 до 3 [47, 48], их использование означает переход на топливо, которое с точки зрения энергетики неприемлемо для долгосрочного экономического развития.

Наиболее активная и хорошо задокументированная дискуссия по биотопливу связана с EROI этанола, получаемого из кукурузы. Споры, посвященные тому, требует ли кукурузный этанол для своего производства больше или меньше энергии, чем он способен дать в качестве топлива, т.е. больше или меньше 1 его EROI, ведутся уже более 30 лет [49]. В многочисленных исследованиях значения EROI варьируются от примерно 0,8 до 1,3–2 [43], но в целом вопрос о том, образуется или нет дополнительная энергия при производстве этанола из кукурузы [50], то есть можно ли вообще рассматривать его производство как источник энергии или нет, до сих пор остается открытым.

Необходимо также упомянуть еще один активно обсуждаемый энергоноситель, хотя он даже формально не может рассматриваться как источник энергии. Водород и так называемая «водородная энергетика» по совершенно непонятным причинам постоянно упоминаются в контексте будущей «безуглеродной» энергетики. Но поскольку так называемый «зеленый» водород, получаемый за счет энергии ВИЭ, EROI которых лишь незначительно превышает единицу (рис. 6, табл. 1), может быть получен только путем дальнейшего преобразования их энергии, причем с достаточно большими потерями, ни о каком реальном производстве энергии не может быть речи. Это просто ее преобразование из одного вида в другой, причем с неизбежными существенными потерями. К тому же реальный потенциал ВИЭ столь низок, что даже если все их установленные мировые мощности будут работать только на производство водорода, то они не смогут обеспечить даже текущий мировой объем его потребления, что реально составляет всего несколько процентов от объема энергии, необходимой для замены ископаемых углеводородов [51, 52]. Общее представление об EROI реальных

и наиболее обсуждаемых источников энергии и динамике их изменения дает табл. 4 [50].

**Таблица 4. Оценка величин EROI различных источников энергии для США [50].**

| <b>Источник</b>                   | <b>Год</b> | <b>EROI</b> |
|-----------------------------------|------------|-------------|
| Ископаемые топлива                |            |             |
| Нефть и газ                       | 1930       | >100        |
| Нефть и газ                       | 1970       | 30          |
| Нефть и газ                       | 2005       | 11–18       |
| Вновь открываемые                 | 1970       | 8           |
| Добываемые                        | 1970       | 20          |
| Мировая добыча нефти              | 1999       | 35          |
| Импортируемая нефть               | 1990       | 35          |
| Импортируемая нефть               | 2005       | 18          |
| Импортируемая нефть               | 2007       | 12          |
| Природный газ                     | 2005       | 10          |
| Уголь                             | 1950       | 80          |
| Уголь                             | 2000       | 80          |
| Битум из нефтеносных песчаников   | —          | 2–4         |
| Сланцевая нефть                   | —          | 5           |
| Другие невозобновляемые источники |            |             |
| Ядерная энергетика                | —          | 5–15        |
| Возобновляемые источники энергии  |            |             |
| Гидроэнергетика                   | —          | >100        |
| Ветровые турбины                  | —          | 18          |
| Геотермальная энергетика          | —          | нет данных  |
| Волновая энергетика               | —          | нет данных  |
| Солнечные коллекторы              |            |             |
| Плоские зеркала                   | —          | 1,9         |
| Концентрирующие коллекторы        | —          | 1,6         |
| Фотовольтаические преобразователи | —          | 6,8         |
| Пассивные солнечные элементы      | —          | нет данных  |
| Биомасса                          |            |             |
| Этанол из сахарного тростника     | —          | 0,8–10      |
| Этанол из кукурузы                | —          | 0,8–1,6     |
| Биодизель                         | —          | 1,3         |

### **3.4.3. Энергетическая эффективность EROI и качество жизни населения**

В связи с очевидной динамикой снижения EROI ископаемых источников энергии, обеспечивающих в настоящее время примерно 85% мирового потребления энергии [1], и неизбежного сохранения этой тенденции в реально обозримом будущем [53] необходимо прогнозировать влияние этого процесса на мировую экономику и состояние общества. По мере снижения EROI дополнительные энергетические возможности общества для реализации таких видов его деятельности как высшее образование, искусство, технологическое развитие, здравоохранение и т.д. неизбежно будут снижаться, что будет отражаться на качестве жизни населения.

В работе [54] предложен общий энергетический индекс Lambert Energy Index (LEI), позволяющий более полно учитывать качество, количество и распределение энергии, реально поставляемой обществу. Цель LEI – сместить фокус анализа того, что определяет качество жизни, с традиционной экономики на биофизическую базу существования общества, которой является объем доступной ему энергии, поставляемый энергетикой. Этот показатель является комбинацией трех факторов:

Энергоэффективность экономической системы: EROI

Средний показатель энергопотребления (ГДж на душу населения): GJ per capita

Распределение доходов/энергии (индекс Джини):  $Gini_{index}$

в соответствии с формулой:

$$LEI = \sqrt[3]{EROI * GJ \text{ per capita} * (1 - Gini_{index})}$$

преобразованных в безразмерный индекс со значениями от 0 до 1

Влияние EROI на качество жизни представлено на рис. 17. Границей вынужденного перехода к низкому/умеренному качеству жизни, согласно [54], являются значения: EROI < 25, энергопотребление < 100 ГДж/чел. и LEI < 0.2.

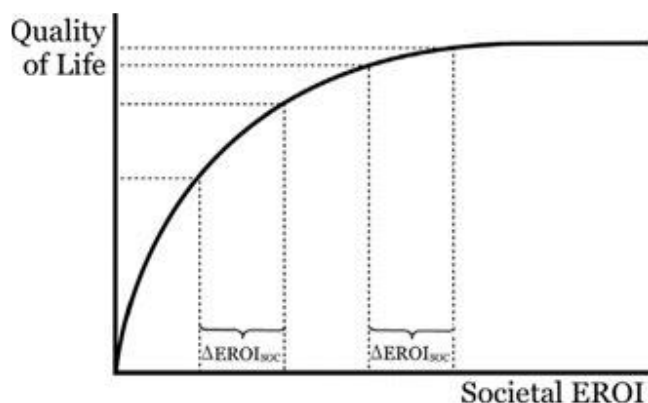


Рис. 17. Зависимость качества жизни от значения EROI [54].

Общий вывод авторов [54] состоит в том, что большинство альтернатив нефти и газу имеют очень низкий EROI и вряд ли способны обеспечить такую же экономическую или социальную выгоду. А повышение эффективности, с которой экономика преобразует энергию (и материалы) в рыночные товары и услуги, является одним из определяющих средств повышения энергетической безопасности. Как только доля затрат на энергообеспечение превышает определенный порог, за этим следует экономический спад. Поэтому, несмотря на благие намерения улучшить энергетический баланс и экологическую ситуацию, широкомасштабное внедрение ВИЭ может привести к слишком низкому значению EROI и оказаться слишком дорогостоящим для обеспечения дальнейшего роста экономики.

В [55] показано, что намечаемый концепцией "зеленого роста" тотальный переход мира к возобновляемой энергетике к 2060 году может снизить значение EROI мировой энергетике с нынешней величины  $\sim 12$  до  $\sim 3$ , стабилизировавшись затем на уровне  $\sim 5$ . Это значительно ниже пороговых значений EROI, которые необходимы для поддержания функционирования промышленного общества, и может привести к существенной деиндустриализации мировой экономики, что ставит под сомнение логичность и жизнеспособность концепции "зеленого роста".

Анализ тенденций развития современной энергетики на базе известных значений энергетической эффективности EROI основных источников энергии и наблюдаемых ее изменений позволяет сделать следующие выводы:

Существует пороговое значение глобального EROI, ниже которого поток чистой энергии, получаемой обществом, становится ниже необходимого для его прогрессивного развития. Значение EROI базовых ископаемых источников энергии, обеспечивающих около 85% мирового производства энергии, неуклонно сокращается и приближается к пороговому значению.

Значение EROI большинства альтернативных и возобновляемых источников энергии ниже порогового, что исключает их заметный вклад в развитие мировой экономики.

По мере снижения EROI базовых ископаемых источников энергии глобальные проблемы прогрессивного развития экономики и общества неизбежно будут осложняться.

Одним из основных факторов, способных смягчить последствия снижения EROI для мировой энергетики, является более рациональное использование доступных энергоресурсов.

Единственной известной в настоящее время альтернативой для поддержания положительной динамики развития общества и обеспечения его энергетических потребностей в будущем остается термоядерная энергетика, развитие которой должно стать приоритетом глобальной энергетики.

Таким образом, в ближайшее время темпы и условия развития цивилизации будут определяться двумя противоположными глобальными тенденциями: растущими по мере развития общества и усложнения его структур потребностями в энергии [2] и постоянно снижающимся по мере снижения качества используемых ископаемых ресурсов значением EROI. Гипотетический выход из этой ситуации пока можно представить только за счет создания термоядерной энергетики.

### **3.5. Экологические характеристики источников энергии**

*Экологический фактор* в настоящее время во многих странах в значительной мере определяет отношение к различным источникам энергии, хотя в немалой степени остается субъективным и зависит от преобладающих взглядов на процессы, результаты влияния которых на земной климат находятся вне сферы научно установленных фактов. Хотя климат планеты в последние годы, безусловно, меняется, до сих пор так и не было предоставлено убедительных доказательств того, что именно антропогенное воздействие и, в частности, углеводородная энергетика являются причиной этих изменений.

Рассмотрим экологические последствия использования различных энергоносителей подробнее. Как известно, сегодня на нашей планете основной источник энергии – ископаемое топливо, нефть, уголь и природный газ, на долю которых приходится более 85% мирового производства первичной энергии (табл. 1).

Но с использованием горючих ископаемых топлив связаны определенные экологические проблемы [56]. Прежде всего, при сгорании все они образуют углекислый газ, накопление которого в атмосфере, как считает ряд специалистов, усиливает парниковый эффект и способствует глобальному потеплению, чреватому массой негативных последствий.

Наиболее «грязным» топливом является каменный уголь. При его добыче образуются терриконы пустой породы и непригодного к транспортировке мелкодисперсного отсева, а при сжигании помимо  $\text{CO}_2$  остаются отвалы, состоящие из золы и шлаков. Большинство углей содержит некоторое количество серы, превращающейся при горении в  $\text{SO}_2$ . Летучие минеральные примеси образуют дым. И, что мало кто учитывает, многие угольные месторождения содержат небольшие примеси радиоактивных элементов: ведь уголь хороший адсорбент, способный накапливать в процессе тысячелетнего залегания в подземных пластах ионы металлов, включая радионуклиды. Поэтому тепловая электростанция, работающая на каменном

угле, загрязняет окружающую среду радиоактивными примесями примерно в 100 раз больше, чем равная ей по мощности атомная электростанция.

Нефть, а точнее получаемый из неё мазут, существенно более «чистое» энергетическое сырьё (табл. 5). Ещё чище природный газ, но и он не без греха: при высокотемпературном горении в потоке воздуха происходит частичное окисление азота до его монооксида, который далее самопроизвольно окисляется до диоксида, последующее попадание которого в атмосферу приводит к выпадению кислотных осадков.

**Таблица 5. Отходы тепловых электростанций, работающих на органическом топливе.**

| <b>Вид топлива</b> | <b>Отходы</b>                                                                                               |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Каменный уголь     | Углекислый газ CO <sub>2</sub><br>Сернистый газ SO <sub>2</sub><br>Дым, аэрозоли<br>Зола<br>Радиоактивность |
| Нефть (мазут)      | Углекислый газ<br>Сернистый газ<br>Дым, аэрозоли                                                            |
| Природный газ      | Углекислый газ<br>Оксиды азота (следы)                                                                      |

Таким образом, понятна мотивация экологов, призывающих заменить ископаемые углеродные источники энергии на возобновляемые, не образующие в процессе использования углекислый газ и другие загрязнители. Среди таких источников рассматривают энергию Солнца, ветра, гидроэнергию, включая энергию морских приливов, геотермальную энергию, энергию растительной биомассы. Поэтому при последующем обсуждении перечисленных источников энергии более подробно будет рассмотрен вопрос об их экологической чистоте.

### **3.6. Стабильность поставки энергии**

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

## **4. Возобновляемые источники энергии: проблемы и перспективы**

### **4.1. Энергетический потенциал ВИЭ**

В связи большим вниманием, уделяемым в настоящее время возобновляемым источникам энергии, и ожиданиями, связанными с их будущим применением, вопрос об их реальном потенциале и перспективах требует отдельного рассмотрения.

**Солнечная энергетика.** Как мы уже отмечали, единственным первичным источником возобновляемой энергии, поступающей на Землю, является энергия солнечного излучения. Все остальные возобновляемые источники по отношению к ней являются вторичными, результатом преобразования лишь небольшой доли падающей на Землю солнечной энергии, и поэтому на порядки уступают ей по своему потенциалу. Может ли хотя бы этот крупнейший возобновляемый источник решить проблемы мировой энергетики? К сожалению, нет. И вот почему.

Общая мощность потока энергии солнечного излучения, падающего на Землю, составляет примерно  $1,74 \cdot 10^{17}$  Вт, а через площадку в  $1 \text{ м}^2$ , расположенную перпендикулярно потоку излучения на входе в атмосферу Земли, проходит поток энергии равный  $1367 \text{ Вт/м}^2$ . Эта величина называется солнечной постоянной. Из-за поглощения при прохождении атмосферы Земли максимальный поток солнечного излучения на уровне моря на экваторе всего примерно  $1000 \text{ Вт/м}^2$ . Среднесуточное же значение потока солнечного излучения через такую единичную горизонтальную площадку из-за смены дня и ночи и изменения угла Солнца над горизонтом как минимум в три раза меньше. В умеренных широтах зимой это значение еще в два раза меньше. Таким образом, даже на экваторе с площади в  $1 \text{ кв. км}$  с использованием крайне сложного и дорогостоящего оборудования при практически предельном для современных условий КПД преобразования солнечной энергии в 30% можно получить мощность всего лишь в 90 МВт. Это соответствует небольшой районной электростанции и в 20 раз ниже мощности типовой промышленной ТЭЦ, не говоря уже о суточном и сезонном непостоянстве производства энергии и, соответственно, необходимости дорогостоящих систем соответствующей мощности и емкости для ее аккумуляции.

С учетом площадей для дополнительного оборудования, аккумулирующих систем, дорог и подъездных путей для удовлетворения даже текущих потребностей мировой энергетики за счет солнечной энергии, потребовалось бы покрыть сложным и дорогостоящим инженерным оборудованием несколько процентов земной поверхности. Не говоря уже о финансовых и экологических проблемах такого проекта, для его реализации в земной коре просто нет необходимых ресурсов даже многих конструкционных элементов, например, алюминия, а тем более редких элементов.

Мы рассмотрели принципиальные физические ограничения для перехода на глобальную солнечную энергетику, которые невозможно

преодолеть за счет будущих технологических новаций. Но есть и экономические показатели, непосредственно определяющие привлекательность и, соответственно, темпы развития различных направлений энергетики, которые также не в пользу энергетики альтернативной. Обратимся снова к солнечной энергетике. В качестве одного из аргументов в ее пользу часто приводят такой расчет: Поверхность самых больших пустынь мира имеет общую площадь около 20 млн км<sup>2</sup> (только площадь Сахары 7 млн км<sup>2</sup>). На эту площадь за год поступает около  $5 \cdot 10^{16}$  кВтч солнечной энергии. При эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, равной 10%, достаточно использовать всего 1% территории этих пустынных зон для размещения солнечных электростанций, чтобы обеспечить современный мировой уровень энергопотребления, что на первый взгляд выглядит убедительно. Но давайте оценим стоимость такого проекта. Возьмем вполне реальный пример одной из лучших и крупнейших в мире солнечных электростанции Ivanpah (США) пиковой мощностью 392 МВт, стоимость строительства которой составила 2,2 млрд долл. или 5612 долл. за кВт установленной мощности. Поскольку станция генерирует энергию только днем, реальная средняя мощность электростанции будет в три раза ниже – всего 123 МВт. Соответственно, удельные капитальные затраты составят 17 870 долл./кВт установленной мощности. Это не просто дорого, это фантастически дорого. Например, 1 кВт установленной мощности на АЭС стоит 2000–4000 долларов. А на тепловых электростанциях, работающих на природном газе, 1 кВт установленной мощности стоит 500–1000 долларов, т.е. в 18–36 раз дешевле. При этом выработка электроэнергии осуществляется непрерывно и независимо от погодных условий. В этом расчете мы еще не учли стоимость систем аккумулирования энергии и передачи ее на тысячи километров из пустынных районов в промышленные центры потребления.

Но и этим проблемы солнечной энергетики не исчерпываются. Принято считать, что лучшее место для размещения солнечных электростанций –

пустыни. Но при этом возникают очень серьезные проблемы с их эксплуатацией, связанные с неизбежным запылением и абразивным повреждением солнечных панелей или концентрирующих солнечное излучение зеркал, особенно во время песчаных бурь. Устранение последствий этого требует огромных затрат, в том числе пресной воды на их отмывание от пыли, в этих безводных регионах.

Теперь вспомним, что установленная мощность всех источников энергии на Земле уже превысила  $3,65 \text{ ТВт} = 3,65 \cdot 10^{12} \text{ Вт}$ . Если эти источники заменить на расположенные в пустынях солнечные электростанции типа Ivanpah, то их сооружение обойдется мировой энергетике в 66 трлн долл., что соответствует ВВП всей мировой экономики. Но есть еще более серьезное чисто физическое ограничение. 1% от площади пустынь – это 200 тыс. км<sup>2</sup>, треть территории Франции. И всю эту громадную территорию необходимо будет покрыть сложными инженерными сооружениями. У мировой экономики нет не только производственных мощностей для изготовления такого объема сложного инженерного оборудования, но даже сырья для его производства, включая производство конструкционных материалов. Мы уже не говорим о перспективах удвоения потребления энергии до конца столетия.

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

**Биотопливо.** Энергетика на основе биотоплива фактически является разновидностью солнечной энергетики, использующей для преобразования солнечной энергии в более удобные нам виды энергии не технические устройства, а фотосинтез в зеленых растениях, поэтому стоит оценить и ее потенциал. Даже по самым скромным оценкам ежегодно на Земле образуется более 200 млрд т сухой зеленой массы растений (ежегодная первичная продукция биосферы). Это в 15 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 выше – до  $2 \cdot 10^{12}$  т в пересчете на сухое вещество.

Однако гигантский объем зеленой массы, производимой биосферой, не означает реальную возможность ее использования в производственной деятельности человечества. Стабильность условий в биосфере нашей планеты, поддерживающей на протяжении более 2 млрд лет, после образования кислородной атмосферы, практически постоянными все основные параметры, 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 [5], человечество не нарушает равновесие биосферы до тех пор, пока оно поглощает менее 1% первичной продукции биоты. Однако уже сейчас потребление чистой первичной продукции биосферы, произведенной на суше непосредственно 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 реализации такого проекта приведет к гибели естественных экосистем и потере равновесия глобальных биосферных процессов.

Таким образом, низкая плотность потока первичной энергии (солнечной радиации на земной поверхности) и низкий КПД преобразования этой энергии зелеными растениями, составляющий, в среднем, немногим более 1%, перечеркивают все надежды на глобальную роль возобновляемой «зеленой» энергетики. Именно из-за низкой плотности потока первичной энергии (солнечной радиации на земной поверхности) и низкого КПД ее преобразования зелеными растениями, сельскохозяйственное производство даже в наиболее развитых странах относится к наименее рентабельной (а во многих случаях, просто убыточной) области человеческой деятельности, поддерживаемой за счет дотаций из других источников.

Как показали результаты моделирования глобальных процессов развития цивилизации, при современном уровне энергопотребления развитых стран за счет возобновляемых источников энергии на Земле может существовать не более 500 млн человек [4], что в десять 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. 6).

**Таблица 6. Плотность потока полезной энергии, получаемой в среднем за год с единицы площади для различных источников биотоплива [57].**

| <b>Сырье</b>         | <b>Формальный поток,<br/>Вт/м<sup>2</sup></b> | <b>Оценка авторов,<br/>Вт/м<sup>2</sup></b> |
|----------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 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                                   |                                             |
| Биотоплива в среднем | 0,155                                         | <0,15                                       |

На самом деле даже эти оценки завышены, и средней оптимистичной оценкой является значение всего 0,073 Вт/м<sup>2</sup>. Эта энергия в десять тысяч раз меньше энергии падающего на эту же площадь потока солнечного излучения [57]. Для сравнения, преобразование солнечной энергии фотовольтаическими солнечными электростанциями в Испании соответствует получению энергии с плотностью потока около 4,8 Вт/м<sup>2</sup>, что примерно в 40 раз выше.

Но и создание искусственных фотопреобразующих систем с мощностью, необходимой для промышленной энергетики, столь же нереально. И дело не только в необходимости изъятия из хозяйственной деятельности и естественных экосистем огромных площадей в сотни тысяч квадратных километров, что соответствует площади крупнейших западноевропейских государств. Как уже отмечалось, для этого необходимы фантастические объемы капитальных затрат на их оснащение сложным

инженерным оборудованием и огромные количества 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 (около 25%) не принципиально отличается от КПД преобразования солнечной энергии некоторыми сельскохозяйственными культурами, достигающего 5–7% (например, кукурузой). Но при этом сельскохозяйственное производство требует значительно меньших капитальных затрат, хотя именно из-за низкой плотности усваиваемого растениями потока первичной энергии оно в большинстве районов мира остается дотационной сферой экономики. А реальная солнечная энергетика является одним из самых дорогих источников энергии, и, несмотря на многолетние декларативные усилия в этой области, занимает очень скромное место в энергобалансе даже наиболее развитых стран мира. Достаточно отметить, что даже упоминавшаяся выше одна из крупнейших в мире солнечных электростанций Ivanpah (США) при стоимости в 2,2 млрд. долл. по мощности в два раза уступает всего одной типовой газовой турбине, которых только в США устанавливается примерно 100 в год.

**Ветроэнергетика.** Аналогичные аргументы можно привести и в отношении ветроэнергетики. Ее главные проблемы – непостоянство вырабатываемой энергии и высокая стоимость ветрогенераторов. Офшорная ветроэнергетика остается одним из наиболее дорогих источников электроэнергии. Стоимость производства электроэнергии на офшорных ветроэлектростанциях колеблется от 200 до 125 долл./МВтч, хотя компании-производители оборудования надеются снизить ее стоимость до уровня ниже 120 долл./МВтч.

Другой проблемой остается низкая единичная мощность ветрогенераторов. Для обеспечения установленной мощности в 1000 МВт,

соответствующей типовой тепловой ТЭЦ, необходимо 660 больших ветряков, занимающих площадь в 375 квадратных миль. Как отмечают специалисты, если даже довести ветряки до размера небоскребов, для полного обеспечения потребностей Нью-Йорка будет достаточно «всего» 13 тыс. таких гигантов. Но номинальная мощность ветровой электростанции – это максимальный показатель ее генерации, достижимый в том случае, если сильный ветер вращает лопасти постоянно. А поскольку у природы бывает и безветренная погода, фактическая мощность составляет всего лишь ~25% от установленной. Таким образом, вышеназванные цифры следует умножить на четыре. Поэтому сооружение ветроэлектростанций окупается в среднем лишь лет через 10 после введения их в эксплуатацию. А их эксплуатация экономически оправдана при среднегодовой скорости ветра свыше 5 м/с.

Таким образом, низкая плотность потока энергии является главным фактором, ограничивающим возможности всех альтернативных источников энергии, на что еще сорок лет назад обратил внимание П.Л. Капица [30]. К сожалению, даже многие специалисты до сих пор его так и не услышали. Поэтому неудивительно, что несмотря на многолетние усилия и многомиллиардные затраты, вклад альтернативных источников энергии, включая солнечную, ветровую и энергию биотоплива в мировую энергетику остается на уровне 5% (табл. 1).

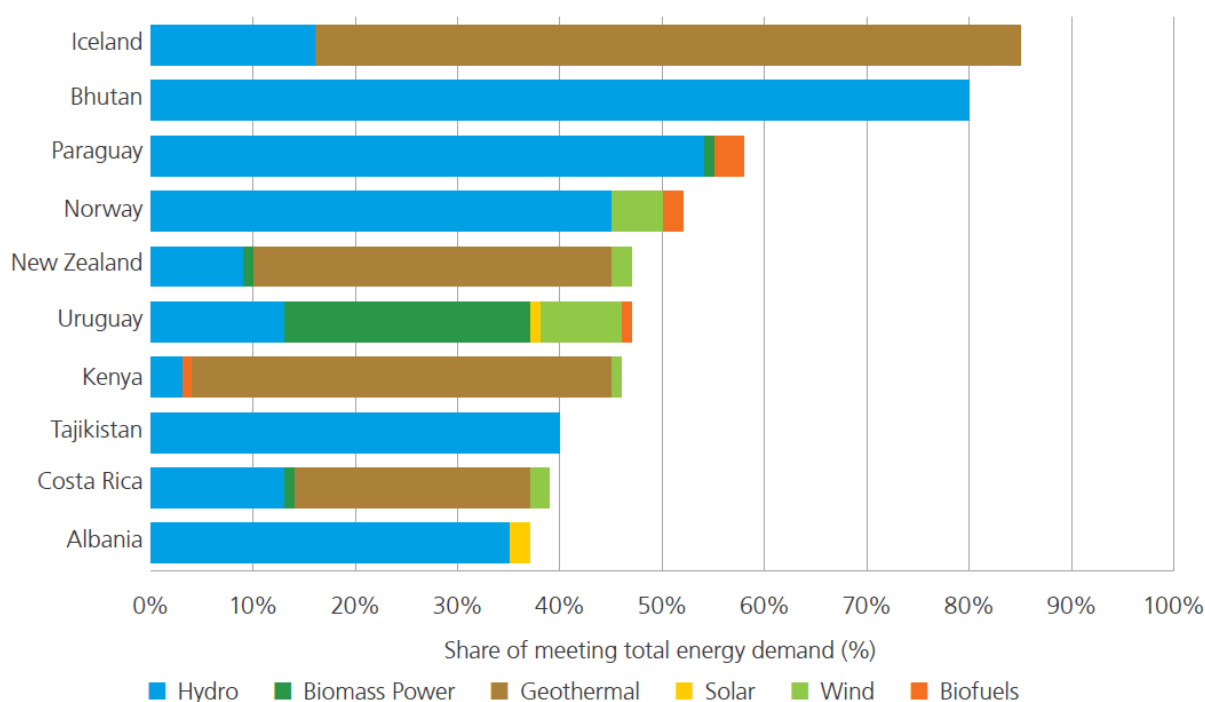
Даже в тех западноевропейских странах, которые провозгласили переход на ВИЭ целью своей государственной политики, их доля ненамного превосходит этот уровень. Например, в Германии, которая ради перехода на ВИЭ отказалась от стабильной и надежной атомной энергетики, их доля в энергобалансе составляет всего 13,8%, что ниже доли ее же угольной энергетики (15,6%). В большинстве же ведущих экономик мира доля ВИЭ находится на уровне 5–6% и ниже (табл. 7).

**Таблица 7. Доля ВИЭ в общем энергобалансе ряда стран в 2024 г. [7].**

| Страна      | Доля ВИЭ в общем энергобалансе |
|-------------|--------------------------------|
| Швеция      | 17,5                           |
| Германия    | 13,9                           |
| Испания     | 12,0                           |
| Нидерланды  | 10,2                           |
| США         | 6,3                            |
| Япония      | 6,1                            |
| Китай       | 5,7                            |
| Франция     | 5,3                            |
| Индия       | 3,1                            |
| Южная Корея | 2,9                            |

Лишь в некоторых небольших странах со специфическими природными условиями, таких, например, как Исландия с ее уникальными геотермальными ресурсами, или Норвегия с ее высоким гидроэнергетическим потенциалом, в энергетике реально преобладают ВИЭ (рис. 18).

2024 top ten countries by renewable contributions



*Рис. 18. Страны с преобладающим вкладом ВИЭ в энергетику в 2024 г. [7].*

Даже в производстве электроэнергии, где доля ВИЭ особенно велика, лишь небольшое число стран с наиболее благоприятными для этого климатическими условиями, не относящиеся к ведущим экономикам мира, имеют высокий вклад таких разновидностей ВИЭ, как солнечная и ветровая энергетика (рис. 19).

2024 top ten countries wind and solar penetration

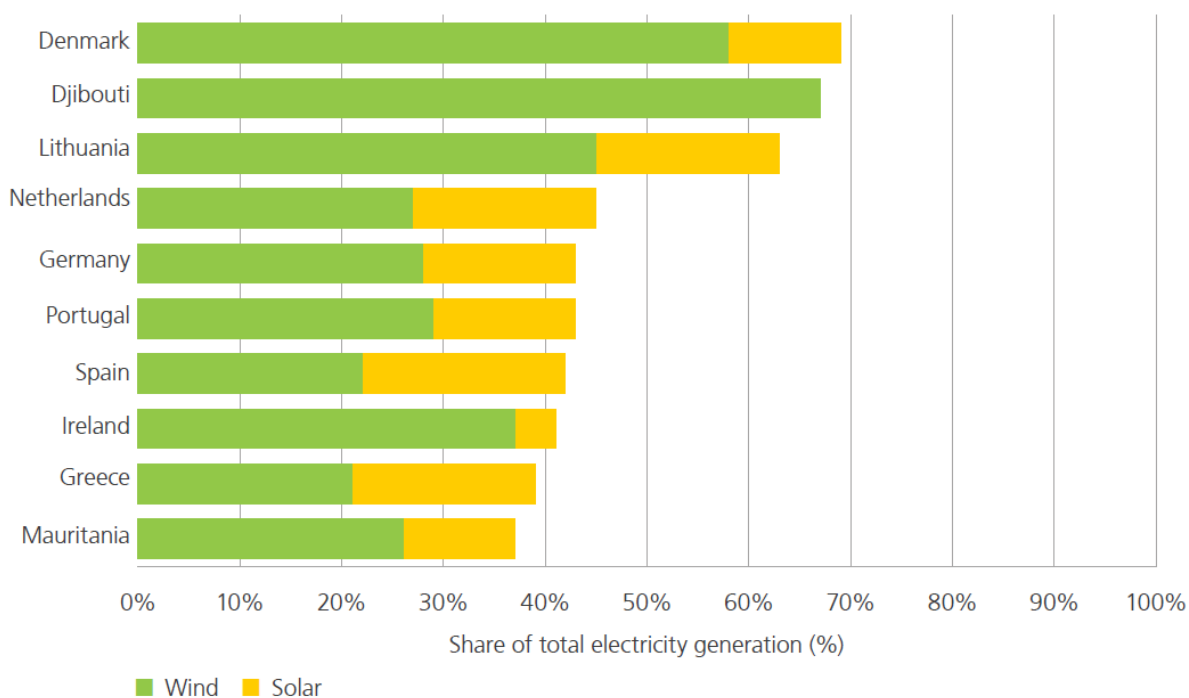


Рис. 19. Доля солнечной и ветровой энергетики в генерации электроэнергии ряда стран в 2024 г. [7].

#### 4.2. Энергетическая эффективность ВИЭ

Еще раз рассмотрим такой важнейший показатель альтернативных источников, как их энергетическая эффективность EROI. В 2006 г. EROI ветровой энергетики в Северной Америке и Европе составлял примерно 20, что способствовало быстрому росту ее использования. Однако удобных мест для установки ветрогенераторов становится все меньше, что является одним из факторов снижения темпов роста мощностей ветровой энергетики.

Для биотоплив картина значительно хуже. Даже при получении этанола из сахарного тростника, являющегося наиболее эффективным сырьем для производства биотоплива, EROI не превышает 5. В остальных случаях он

близок к единице (табл. 8). То есть фактически производство биотоплива даже нельзя рассматривать как получение энергии – это лишь ее перераспределение из одного вида в другой.

**Таблица 8**

**Значения EROI для различных источников биотоплива [57].**

| <b>Сырье</b>                 | <b>Наиболее достоверное значение EROI</b> |
|------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Этанол</b>                |                                           |
| Сахарный тростник (Бразилия) | 5                                         |
| Кукуруза (США)               | 1,25                                      |
| Кукуруза (другие страны)     | 0,18–1,48                                 |
| <b>Биодизель</b>             |                                           |
| Пальмовое масло              | 3                                         |
| Рапсовое масло               | 1,5                                       |
| Соя                          | 1,43–3,54                                 |
| Пшеница (Китай)              | 1,09                                      |

Данные, представленные в табл. 8 совершенно ясно показывают, почему основой мировой энергетики являются ископаемые топлива, а не солнечная энергетика, имеющая EROI лишь немного выше единицы. Почему биотоплива – биоэтанол и биодизель – при производстве которых в большинстве стран EROI составляет всего 1,2–1,5 (табл. 8), никогда не смогут стать первичным источником энергии для мирового автотранспорта. Поскольку пороговое значение EROI, при котором человечество еще может продолжать свое прогрессивное развитие, находится в районе 3, биотопливо, да и солнечная энергетика однозначно исключаются из числа перспективных источников глобальной энергии.

#### **4.3. Экологические характеристики ВИЭ**

Рассмотрим теперь реальные экологические характеристики ВИЭ, которые послужили главным аргументом к призывам и усилиям по их более широкому использованию [56].

*Гидроэнергетика.* Именно озабоченность состоянием окружающей среды и социальные проблемы – основные препятствия на пути использования оставшегося мирового потенциала такого ВИЭ, как гидроэнергетики. При постройке плотин неизбежно образуются водохранилища, и вода, заливая огромные площади (особенно на равнинных реках), необратимо изменяет окружающую природу. Затапливаются сельскохозяйственные угодья, сенокосные луга, леса, выселяются с насиженных мест люди. Например, водохранилищем Красноярской ГЭС мощностью 6 ГВт (10-я в мире, вторая в России, объём 73,3 км<sup>3</sup>) было затоплено 120 тыс. га сельскохозяйственных земель, в ходе строительства было перенесено 13750 строений.

Водоохранилища, необходимые для обеспечения равномерной работы ГЭС, вызывают изменения климата на прилегающих территориях на расстояниях до сотен километров, являются естественными накопителями загрязнений. В водохранилищах развиваются сине-зеленые водоросли, ускоряются процессы эвтрофикации, что приводит к ухудшению качества воды, нарушает функционирование экосистем. Плотины препятствуют миграции проходных рыб. При строительстве водохранилищ нарушаются естественные нерестилища.

Неблагоприятные экологические последствия строительства ГЭС иллюстрирует Волга, превратившаяся в цепь слабопроточных мелководных озёр. Энергетический потенциал Волги практически исчерпан. А популяция русского осетра, который 100 лет назад нерестился в тысячах километров вверх от устья, исчезла. Подъем уровня воды перед плотиной ГЭС вызывает заболоченность местности, засоленность почвы, изменения прибрежной растительности и микроклимата.

Не многим лучше обстоит дело с возведением ГЭС в горах, где площадь зеркала водохранилищ меньше, но непредсказуемо воздействие большой массы воды на тектонику прилегающих горных массивов.

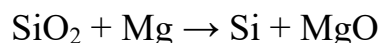
***Приливные ГЭС.*** Использование энергии морских приливов также вызывает неблагоприятные экологические последствия: проекты крупных приливно-отливных гидроэлектростанций представляют собой внушительных размеров плотину, перегораживающую морской залив. Сооружение плотины приводит к увеличению амплитуды прилива. Даже небольшое повышение амплитуды прилива вызывает значительное изменение распределения грунтовых вод в береговой зоне, увеличивает зону затопления, нарушает циркуляцию водных масс, изменяет ледовый режим в части бассейна за плотиной и т.д. Влияют приливные станции и на климат, поскольку меняют энергетический потенциал морских вод, их скорость и территорию перемещения.

Сооружение плотины ПЭС способно вызвать серьезные биологические последствия. Она нарушает природный обмен солёной и пресной воды и тем самым – условия жизни морской флоры и фауны. В бассейне за плотиной работа станции будет оказывать воздействие на литораль (зона между наивысшей точкой затопления во время прилива и нижней, обнажающейся при отливе). Плотина может оказать вредное воздействие не только на местные сообщества, но и на мигрирующие виды. Например, по оценкам биологов строительство плотины в Пенжинской губе Охотского моря нанесет непоправимый вред популяции охотоморской сельди.

При строительстве плотин в зоне умеренного климата возможно образование зоны сероводородного заражения, подобной тем, которые наблюдаются в заливах и бухтах, имеющих естественные пороги. Фьорды Скандинавского полуострова, имеющие естественный порог, представляют собой классический пример такого естественного сероводородного заражения.

Стоит отметить, что эксплуатация крупной (десятки ГВт) приливной станции будет тормозить вращение Земли. Хотя величина этого торможения очень мала, экологические последствия его непредсказуемы.

**Солнечная энергетика.** На практике реализуются две схемы преобразования солнечной энергии в электрическую. Первая, это фотовольтаика (фотоэлектрические, фотовольтаические преобразователи), преобразующие солнечное излучение в электроэнергию на основе фотоэффекта. Вторая, это гелиотермальная энергетика, использующая солнечное излучение для нагрева рабочего тела, например воды, используемой затем в качестве источника тепла или для генерации пара для привода паровых турбин как в обычных тепловых электростанциях. Оба способа преобразования солнечной энергии отличаются высокой материалоемкостью. Для изготовления оборудования требуется огромные объемы таких материалов, как алюминий, кремний, тяжелые металлы (свинец, кадмий и другие), производство которых наносит огромный вред окружающей среде. Например, технология высокочистого кремния включает стадию его восстановления магнием из диоксида:



При этом надо сначала получить металлический магний и также методом, очень далеким от экологически чистого. Поэтому крупнотоннажное производство кремния «солнечной» чистоты чревато сильным загрязнением окружающей среды. Ещё большую экологическую опасность представляет производство арсенида галлия, который может прийти на смену кремнию.

Все более острым становится вопрос об утилизации отработавших свой ресурс (а это всего несколько лет) солнечных панелей, в составе которых достаточно высоко содержание токсичных компонентов, включая свинец и кадмий. Если взглянуть на статистические данные, то уже в 2016 г. было более 250 000 тонн отходов солнечных панелей, а по самому скромному прогнозу уже к 2050 г. эта цифра может увеличиться до 78 000 000 тонн. Но есть более пессимистический прогноз, который говорит, что с таким большим объемом отходов мы столкнемся уже к 2035 году.

Среди других экологических проблем – сильное повышение температуры воздуха при использовании гелиотермоэлектростанций. Так,

более 300 тысяч зеркал уже упоминавшейся американской солнечной станции Ivanpah так сильно нагревают окружающий воздух (температура коллекторов достигает 540°C), что это приводит к гибели пролетающих мимо птиц.

На возможность противоположного явления существенного понижения температуры окружающего воздуха при строительстве крупных фотовольтаических станций, вызывающего конденсацию водяного пара с образованием тумана, понижающего прозрачность атмосферы и снижающего тем самым КПД фотопреобразователей, указал в свое время академик П.Л. Капица. Крупные солнечные станции требуют отчуждения территорий, измеряемых десятками квадратных километров, что вынуждает проектировать такие предприятия исключительно в пустынях. Упомянутая выше станция Ivanpah при очень скромной мощности 390 МВт занимает площадь в 16 кв. км.

**Ветроэнергетика.** Широко распространённое представление об экологической чистоте ветроэнергетики является серьезным заблуждением. Действительно, одна отдельно взятая ветроэлектроустановка безобидна. Но как только мы переходим к крупномасштабной генерации электроэнергии, то оказывается, что для строительства ветроэлектростанций требуются значительные площади. Изготовление десятков тысяч ветряков требует создания специальной отрасли промышленности с соответствующими экологическими проблемами. Требуется резкое увеличение производства алюминия и стеклопластика, а это весьма грязные производства. Уже сегодня приходится решать проблему утилизации отработавших свой недолгий срок (всего несколько лет) лопастей ветрогенераторов. Эти лопасти изготавливаются из прочных и твёрдых полимерных композитных материалов, практически не поддающихся ни сжиганию, ни биоразложению.

Еще одной важной проблемой использования ветрогенераторов являются сильные вибрации их несущих частей, которые передаются в грунт. Значительная часть звуковой энергии (ветряк мощностью 250 кВт создаёт шум силой 50–80 децибел) приходится на инфразвуковой диапазон, для

которого характерно отрицательное воздействие на организм человека и многих животных. Как показал опыт эксплуатации большого числа ветровых установок в США, этот шум не выдерживают ни животные, ни птицы, покидая район размещения станции, т.е. территории самой ветровой станции и примыкающие к ней становятся непригодными для жизни людей, животных и птиц.

Так как скорость вращения лопастей ветровых генераторов близка к частоте синхронизации телевидения ряда стран, то работа ветровых генераторов нарушает прием телепередач в радиусе 1–2 км от генератора. Ветровые генераторы являются также источниками радиопомех. Вращение лопастей ветряков губит птиц. Поскольку обычно ветровые установки располагаются в больших количествах в районах сильных ветров (горные хребты, морское побережье), они могут приводить к нарушению миграции перелетных птиц. Модуляция ветрового потока лопастями создает некоторое подобие регулярных структур в воздухе, которые мешают ориентации насекомых. В Бельгии установили, что это приводит к нарушению устойчивости экосистем полей, расположенных в зоне ветровых установок, в частности, наблюдается падение урожайности.

Имеются и неустранимые последствия крупномасштабного использования энергии ветра: он рассеивается и ослабевает, изменяется роза ветров и, следовательно, нарушается климатическое равновесие, перенос влаги и тепла.

Примеры солнечной и ветроэнергетики позволяют сделать важное заключение: для оценки экологического ущерба, наносимого конкретным видом энергетики, совершенно недостаточно учитывать только чистоту самого первичного источника энергии. Необходимо учитывать воздействие на природу сооружений, машин и устройств для отбора и передачи энергии, а также экологические характеристики технологий производства соответствующих материалов и аппаратуры. Широкое использование любого нового вида энергии требует создания новой отрасли промышленности,

включающей добычу сырья, его переработку, изготовление оборудования, а затем утилизацию морально или физически устаревшего оборудования. Ясно, что новая отрасль станет дополнительным источником загрязнения среды. Таким образом, даже использование формально экологически чистого источника энергии влечёт за собой шлейф заведомо экологически проблемных технологий.

**Геотермальная энергетика.** Одна из экологических проблем, возникающих при использовании подземных термальных вод, заключается в необходимости закачки отработанной воды обратно в подземный водоносный горизонт. В термальных водах содержится значительное количество солей различных токсичных металлов (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 растворённого в воде кислорода – его уже недостаточно для многих рыб (форель, например, живёт только в холодной воде), а минеральные примеси угнетают водные организмы. Поэтому отработанную воду закачивают через специально пробуренные скважины обратно в земные недра. Это требует дополнительных энергозатрат, а последствия этого при крупномасштабном производстве прогнозировать очень трудно.

Отбор из скважин пароводяной смеси сопровождается выбросом в атмосферу пара и токсичных газов; расширяющийся при выходе на поверхность пар вызывает сильный шум. Влияние ГеоТЭС на природу легко наблюдать на примере Паужетской станции на Южной Камчатке: в радиусе двух-трёх километров от станции торчат голые, без коры и листьев стволы камчатской каменной берёзы, далеко слышен неумолкаемый рёв выходящего на поверхность пара. А мощность станции всего 12 МВт, что почти в 5 раз ниже мощности главных турбин атомного ледокола «Арктика».

**Биомасса.** Это самый старый источник энергии, поскольку дрова человечество использует с незапамятных времён. В наше время разрабатывается и апробируется множество проектов и схем получения из растительной биомассы жидких автомобильных топлив, горючего газа, а также процессов генерации электрической энергии. Но и с промышленным применением биомассы в энергетике связаны негативные экологические последствия. Увеличение посевных площадей под техническими культурами привело к усиленному сведению влажных тропических лесов. В Индонезии и Малайзии на Борнео и Суматре расширение плантаций для производства пальмового масла (для получения биодизеля и, к сожалению, и в продуктах питания) привело к тому, что в конце 80-х и 90-х годов было вырублено подавляющее большинство лесов. Близкая ситуация сложилась в Бразилии, где для плантаций сахарного тростника сводят амазонские тропические леса, которые часто называют лёгкими нашей планеты.

Интенсификация производства технических культур требует расширенного применения удобрений и средств защиты растений, что приводит к биодеградации почв. Разрушаются среда обитания животных и экосистемы. Практика выжигания кустарников и торфяников для подготовки сельхозугодий и высокое потребление топлива автотранспортом для перевозки пальмового масла сделали страны Юго-Восточной Азии одним из ведущих мировых источников выбросов парниковых газов.

Обсуждается ещё одна опасность использования биомассы технических культур: тополь, ива, эвкалипт и некоторые другие быстрорастущие растения, в отличие от злаков, синтезируют заметные количества изопреноидов, окисление которых кислородом воздуха приводит к образованию вредного для здоровья озона.

Аналогичное рассмотрение любых других источников энергии, существующих или только намечаемых (энергия малых рек, низкопотенциального тепла, морских волн, термоядерный синтез и т.д.) позволяет сделать вывод, что промышленная энергетика, основанная на

любых источниках, не может быть абсолютно экологически чистой, и всегда связана с определенными экологическими последствиями.

#### **4.4. Прогнозы развития ВИЭ**

В настоящее время использование всех разновидностей возобновляемых источников энергии продолжает быстро расширяться. Суммарная установленная мощность солнечных установок достигла в 2024 г. 1865 ГВт, установленная мощность ветровых генераторов – 610 ГВт, а общий вклад возобновляемых источников в мировую энергетику составил 5,3% (табл. 1). Вместе с гидроэнергетикой, вклад которой в мировое производство энергии 2,7%, возобновляемые источники обеспечивают в настоящее время 8% мирового производства энергии.

Однако если оставить в стороне гидроэнергетику, имеющую ограниченные возможности для дальнейшего развития, и которую скорее следует относить к традиционным источникам энергии, даже в ведущих по уровню развития возобновляемой энергетики странах установленные мощности возобновляемых источников пока несопоставимы с мощностями традиционной энергетики. Несмотря на огромные инвестиции в возобновляемые источники энергии их доля в энергобалансе даже наиболее развитых стран остается крайне низкой. Например, в США, где инвестиции в возобновляемые источники энергии достигают почти половины всех бюджетных ассигнований на исследования и разработки в области энергетики, их вклад возобновляемых источников составляет всего несколько процентов (табл. 7). Такая же картина наблюдается и в Китае, где несмотря на благоприятные климатические условия доля ВИЭ в производстве первичной сохраняется на уровне 6%. То есть во всех крупнейших экономиках мира их совокупный вклад в энергетику незначителен.

При любом сценарии развития мировой энергетики до конца 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 сейчас быстрая смена приоритетов в области энергетики в США и ряде других развитых стран.

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

## **5. Заключение. Отдаленные перспективы и термоядерная энергетика**

Согласно прогнозам наиболее авторитетных источников, таких как Международное энергетическое агентство (МЭА), статистические обзоры Бритиш Петролеум и др., в ближайший период производство энергии на базе всех существующих ныне источников будет увеличиваться. В том числе выше, чем в настоящее время, будут объемы потребления нефти, угля и природного газа, хотя будет происходить определенное перераспределение их относительного вклада в мировую энергетику. В основном это будет связано с постепенным снижением доли нефти за счет повышения доли природного газа.

Прогнозируется, что к 2035 г. вклад трех основных источников ископаемых энергоресурсов практически сравняется, достигнув уровня 25% для каждого из них, то есть на долю традиционных ископаемых источников будет приходиться не менее 3/4 производимой на Земле энергии. А по базовому сценарию Международного экономического агентства доля

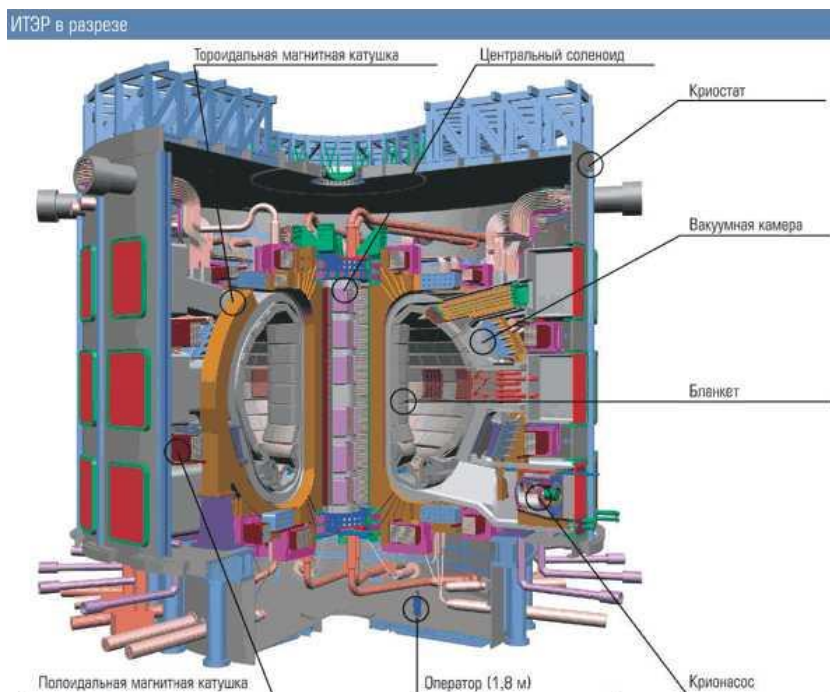
ископаемых видов топлива и в 2050 г., несмотря на рост атомной энергетики и использование возобновляемых источников, будет не менее 85%.

Что будет в более отдаленной перспективе? Как уже не раз указывалось выше, энергией ископаемых источников человечество обеспечено минимум до конца текущего столетия, а может быть и на значительно больший период. Что касается более отдаленного периода, то при современных темпах технологического развития, а главное, темпах прогресса систем искусственного интеллекта, строить прогнозы на период, превышающий несколько десятилетий, вряд ли имеет смысл.

Мы можем лишь констатировать, что единственный известный нам в настоящее время источник энергии глобального масштаба, на который цивилизация может рассчитывать в отдаленном будущем, это энергия термоядерного синтеза. Усилия в ее освоении ведутся человечеством уже несколько десятилетий, причем это один из немногих примеров реального объединения усилий всех ведущих стран мира. С 1986 г. при участии стран Европейского сообщества, Японии, России и США ведется проектирование Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР). Позднее к проекту присоединились Китай, Южная Корея и Индия. В 2001 г. была завершена разработка проекта, а в 2005 г. завершились переговоры о выборе места для его строительства. Крупнейший в истории человечества научный проект реализуется во Франции в районе Марселя. Финансовый вклад Европейского союза составит 45,5%, а всех остальных участников, в том числе и России, по 9,1%.

Размер реактора – более 20 метров в диаметре при 30-метровой высоте (рис. 20). Ток в плазме должен достигать 15 млн А, а температура дейтерий-тритиевой плазмы должна достигать ~150 млн градусов, что почти в десять раз выше температуры в центре Солнца (~20 млн. град.). Магнитное поле, удерживающее плазму, будет создаваться самым большим в мире сверхпроводящим магнитом. Термоядерная мощность установки 1000 МВт будет поддерживаться в течение 400 секунд, а со временем – в течение 3000

секунд. Это даст возможность проводить первые реальные исследования физики термоядерного синтеза в плазме. Считается, что после создания и проведения в течение 12–15 лет исследований на ИТЭР следующим шагом станет строительство в 40-х годах уже демонстрационной термоядерной установки.



*Рис. 20. Международный термоядерный реактор ИТЭР (International Termonuclear Experimental Reactor)*

На единицу термоядерного топлива вырабатывается в 10 млн. раз больше энергии, чем при сжигании органического топлива и в 100 раз больше, чем при расщеплении урана в реакторах атомных электростанций. Оптимисты надеются, что демонстрационный термоядерный реактор будет создан уже в середине текущего века. Но для массового потребителя термоядерная энергия станет доступной не ранее конца столетия. Поэтому в течение почти столетия ископаемые углеводороды будут оставаться основой мировой энергетики.

Исчезнет ли потребность в углеводородах после этого периода? Вряд ли. Жидкие углеводороды остаются наиболее удобным и энергонасыщенным топливом для относительно маломасштабного потребления. А представить

комфортную жизнь и технологическое развитие без самых разнообразных нефтехимических продуктов и материалов на основе углеводородов практически невозможно. Откуда же будет получать необходимые ей углеводороды мировая экономика в отдаленном будущем?

Даже не очень фантазируя, мы можем представить себе будущую замкнутую по углероду экономику на основе достаточного объема энергии, обеспечиваемой термоядерным синтезом. Уже хорошо освоенные практически на промышленном уровне процессы каталитического электросинтеза на основе имеющихся в изобилии в природе углекислого газа и воды и термоядерной энергии могут обеспечить получение из них всех необходимых углеводородных продуктов (рис. 21 и 22) Фактически, это переход от природного фотосинтеза, обеспечившего значительную часть углеводородных ресурсов планеты и условия возникновения жизни на ней, к более интенсивным процессом искусственного электросинтеза.

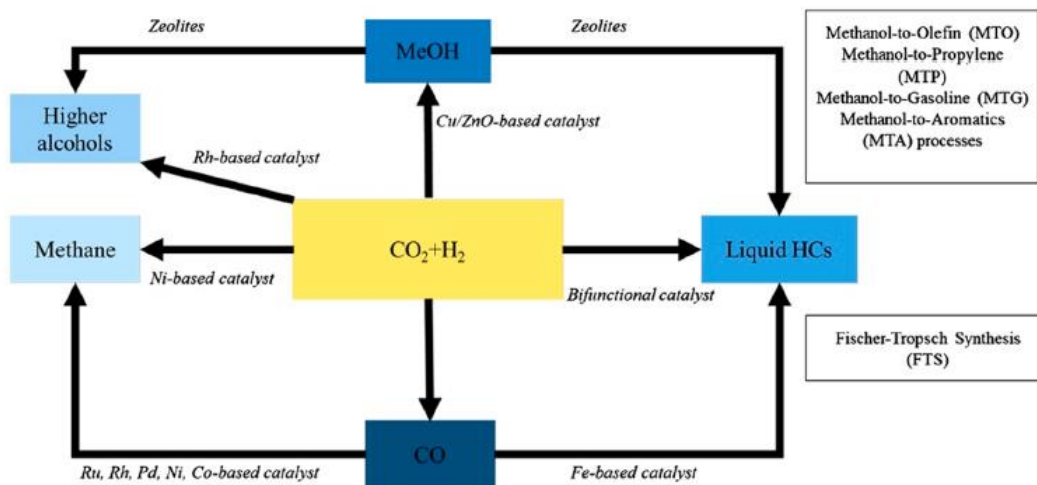
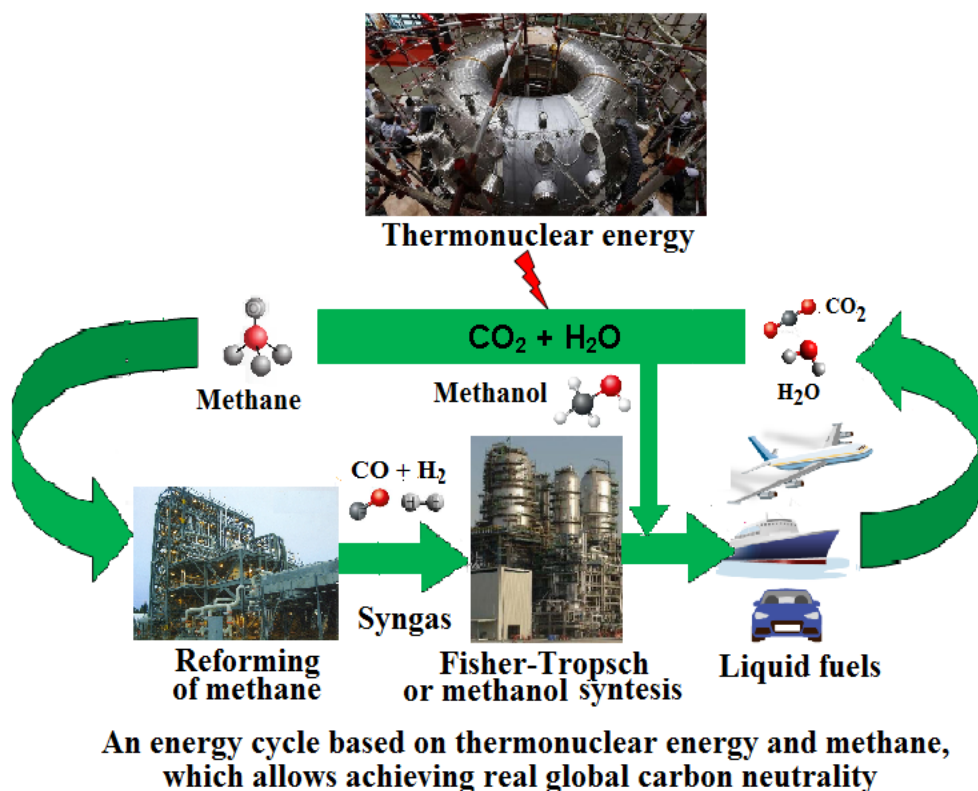


Рис. 21. Вместо природного фотосинтеза – каталитический электросинтез. Возможные пути каталитического превращения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$  в углеводороды [58].

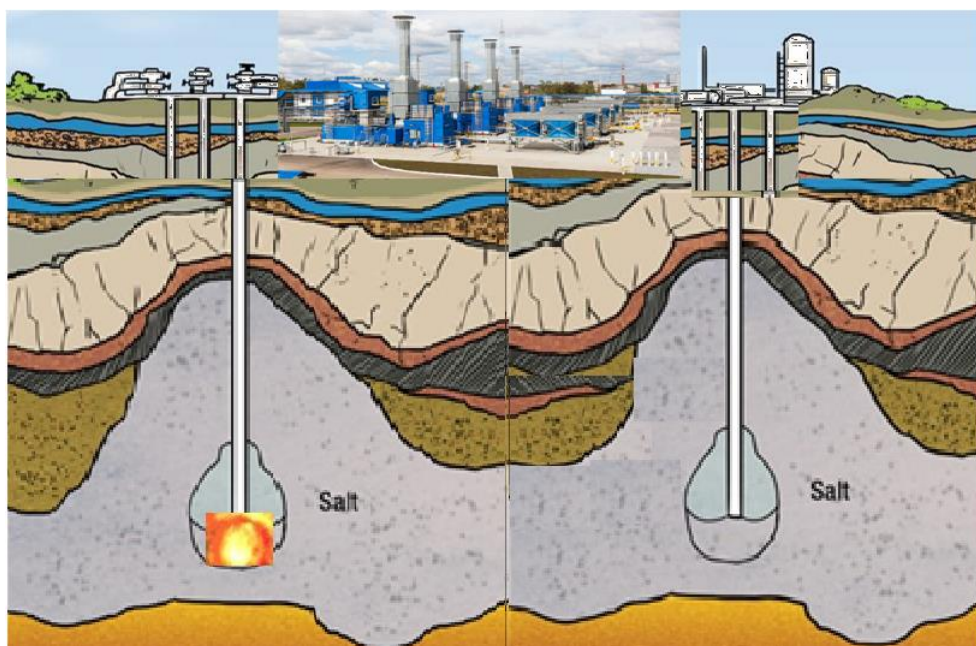


*Рис. 22. Возможность замкнутого по углероду цикла получения жидких углеводородных топлив на основе энергии термоядерного синтеза.*

Помимо реальной возможности создания «нейтральной» по эмиссии  $\text{CO}_2$  углеводородной энергетики замкнутый по углероду энергетический цикл на основе термоядерной энергетики и электросинтеза углеводородов обеспечит будущие потребности цивилизации в углеводородах.

Сомнения в реальности практического освоения термоядерной энергии беспочвенны. Фактически человечество уже освоило этот вид энергии еще 75 лет назад, создав термоядерную бомбу. Даже если возникнут проблемы с созданием технологий на основе магнитного удержания плазмы, могут быть реализованы и менее экзотические варианты использования термоядерной энергии. В качестве простейшей укажем на возможность последовательных термоядерных взрывов в заполненных водой подземных полостях с получением перегретого пара и его подачей в паровые турбины (рис. 23). Достигнутая при взрыве высокая температура может сохраняться в таких полостях месяцами, так что периодичность взрывов может быть не очень

высокой. После срабатывания в турбине сконденсированный пар (вода) может закачиваться в другую подземную полость без его выхода на поверхность для последующего использования в обратном направлении.



*Рис. 23. Вариант термоядерной энергетики, не требующей магнитного удержания плазмы.*

В заключение еще раз напомнить, что удовлетворение постоянно растущих потребностей мира в энергии, без чего не мыслило его прогрессивное развитие, при любом источнике этой энергии неизбежно будет нарушать тепловой баланс планеты и постепенно приводить к повышению температуры ее поверхности в соответствии с законом Стефана-Больцмана [2]. Как будет решаться этот принципиальный вопрос будущими поколениями нам пока трудно даже представить. Но человечество всегда находило выход из самых сложных ситуаций, и вряд ли стоит сомневаться, что и эта проблема найдет свое решение.

## Литература

1. Арутюнов В.С., Лисичкин Г.В. Энергетические ресурсы XXI столетия: проблемы и прогнозы. Могут ли возобновляемые источники энергии заменить ископаемое топливо? Успехи химии. 2017. Т. 86. №8. С. 777–804. <http://iopscience.iop.org/article/10.1070/RCR4723/pdf>
2. Арутюнов В.С. Концепция устойчивого развития и реальные вызовы цивилизации. Вестник РАН. 2021. Т. 91. №3. С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S0869587321030026>
3. Форрестер Дж. Мировая динамика. Наука, Москва, 1978, 167 с.
4. Моисеев Н.Н. Сочинения в 3-х томах. Изд-во МНЭПУ, Москва, 1997. Т. 3 С 92.
5. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивой жизни. Изд-во ВИНТИ, Москва, 1995, 470 с.
6. BP Statistical Review of World Energy, 2015 <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
7. Statistical Review of World Energy. Energy Institute. 2025. 74<sup>th</sup> edition <file:///C:/Users/user/Downloads/Statistical%20Review%20of%20World%20Energy.pdf>
8. Abas N., Kalair A., Khan N. Futures, 2015. V. 69, P. 31.
9. Wells P.R.A. Oil & Gas J., 2005. Feb. 21. P. 20.
10. Role of sustainable energy in ending poverty. <http://www.iea.org/topics/energypoverty/>
11. Добрецов Н.А., Конторович А.Э., Кулешов В.В. Вестник РАН, 2001. Т. 71. С. 867.
12. Lewis P.E., Economides M.J., Ajao O. Market for transport fuels in the US will remain subject to diversification. Oil & Gas J. 2012. V. 110. #10. (Oct. 1, 2012). P. 30–38.
13. Kelley W.L., Harrell D.R., Bishop R.S., Wells K. Oil & Gas J. 2009. June 8. P. 20.
14. 2012. The Outlook for Energy: A View to 2040 <http://www.slideshare.net/skurbatov/2012-the-outlook-for-energy-a-view-to-2040>
15. Sandrea R. Oil & Gas J. 2004. July. 12. P. 34.
16. Wells P.R.A. Oil & Gas J. 2005. Feb. 21. P. 20.
17. Мауджери Л. В мире науки. 2009. №12. С. 52.
18. Cohen G., Joutz F., Loungani P. Energy Policy. 2011. V. 39. P. 4860.
19. Agee M.A. Natural Gas Conversion V. Studies in Surface Sciences and catalysis. Vol. 119.
20. Скоробогатов В.А., Старосельский В.И., Якушев В.С. Газовая промышленность, 2000. №7. С. 17.
21. Melvin A. Natural gas: Basic science and technology. Bristol and Philadelphia, 1988, Adam Hilger.
22. Зорькин Л.М., Суббота М.И., Стадник Е.В. Метан в нашей жизни. Недра, Москва, 1986, 151 с.
23. Голд Т. Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И.Менделеева. 1986. Т. 31. С. 547.
24. Валяев Б. Газовая промышленность. 1997. №7. С. 6.
25. Ионе К.Г., Мысов В.М., Степанов В.Г., Пармон В.Н. Нефтехимия. 2001. Т. 41. С. 178.

26. Арутюнов В.С., Липидус А.Л. Введение в газохимию. Изд-во РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, Москва, 2005, 108 с.
27. Yuan Jiehui, Luo Dongkun, Feng Lianying. Appl. En. 2015. V. 148. P. 49.
28. Макогон Ю.Ф. Газовая промышленность. 2001. №5. С. 10.
29. Арутюнов В.С. О прогнозах глобального энергоперехода. Эко. 2022. №7. С. 51–66. DOI: 10.30680/ЕCO0131-7652-2022-7-51-66
30. Капица П.Л. Энергия и физика. УФН. 1976. № 2.С. 307–314;
31. Arutyunov V. On the sources of hydrogen for the global replacement of hydrocarbons. Academia Letters. 2021. Article 3692. <https://doi.org/10.20935/AL3692>;
32. Арутюнов В.С. Водородная энергетика: Значение, источники, проблемы, перспективы (Обзор). Нефтехимия. 2022. Т. 62. № 4 С. 459–470. DOI: 10.1134/S0965544122040065
33. Википедия. Cost of electricity by source [https://en.wikipedia.org/wiki/Cost\\_of\\_electricity\\_by\\_source#Cost\\_factors](https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source#Cost_factors)
34. Murphy D.J. The implications of the declining energy return on investment of oil production. Phil. Trans. R. Soc. 2014. V. A 372: 20130126. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2013.0126>
35. Hall C.A.S., Cleveland C.J., Berger M. 1981 Energy return on investment for United States petroleum, coal, and uranium. In: Energy and ecological modeling (ed. W Mitsch), pp. 715–724. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
36. Murphy D.J., Hall C.A.S. Energy return on investment, peak oil, and the end of economic growth. Ann. NY Acad. Sci. 2011. V. 1219, P. 52–72. doi:10.1111/j.1749-6632.2010.05940.x
37. Global and Russian Energy Outlook 2019 / ed. A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagin; ERI RAS – Moscow School of Management SKOLKOVO – Moscow, 2019. – 210 p. - ISBN 978-5-91438-029-5.
38. Lambert J.G., Hall C.A.S., Balogh S., Gupta A., Arnold M. Energy, EROI and quality of life Energy Policy. 2014. V. 64. P. 153–167 <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.001>
39. Hall C.A.S., Balogh S., Murphy D.J.R. What is the minimum EROI that a sustainable society must have? Energies. 2009. V. 2. P. 25–47. (doi: 10.3390/en20100025).
40. Hall C.A.S., Lambert J.G., Balogh S.B. EROI of different fuels and the implications for society Energy Policy. 2014. V. 64. P. 141–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>
41. Brandt A.R., Farrell A.E. Scraping the bottom of the barrel: greenhouse gas emission consequences of a transition to low-quality and synthetic petroleum resources. Clim. Change 2007. V. 84. P. 241–263. (doi:10.1007/s10584-007-9275-y)
42. Gupta A.K., Hall C.A.S. A Review of the Past and Current State of EROI Data. Sustainability. 2011. V. 3. no. 10. P. 1796–1809. doi:10.3390/su3101796
43. Jaramillo P., Griffin W.M., Matthews H.S. Comparative analysis of the production costs and life-cycle GHG emissions of FT liquid fuels from coal and natural gas. Environ. Sci. Technol. 2008. V. 42. P. 7559–7565. doi:10.1021/es8002074

44. World nuclear association, 2025. <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/energy-return-on-investment>
45. de Castro C., Capellán-Pérez I. Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies. *Energies*. 2020. V. 13, 3036 <http://dx.doi.org/10.3390/en13123036>
46. Арутюнов В.С. Биотопливо: Pro et contra. *Российский химический журнал*. 2007. Т. 51. №6. С. 94–99.
47. Farrell A.E., Plevin R.J., Turner B.T., Jones A.D., O'Hare M., Kammen D.M. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science*. 2006. V. 311. P. 506–508. doi:10.1126/science.1121416
48. Murphy D.J., Hall C.A.S., Powers B. New perspectives on the energy return on (energy) investment (EROI) of corn ethanol. *Environ. Dev. Sustain.* 2011. V. 13. P. 179–202. doi:10.1007/s10668-010-9255-7
49. Hall C.A.S., Balogh S., Murphy D.J.R. What is the minimum EROI that a sustainable society must have? *Energies*. 2009. V. 2. P. 25–47. doi:10.3390/en20100025
50. Murphy D.J., Hall C.A.S. Year in review EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2010. Vol. 1185. P. 102–118. [doi:10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x)
51. Arutyunov V. On the sources of hydrogen for the global replacement of hydrocarbons. *Academia Letters*. 2021. Article 3692. <https://doi.org/10.20935/AL3692>
52. Арутюнов В.С. Водородная энергетика: Значение, источники, проблемы, перспективы (Обзор). *Нефтехимия*. 2022. Т. 62. № 4. С. 459–470. DOI: 10.1134/S0965544122040065
53. Арутюнов В. Нефть XXI. Мифы и реальность альтернативной энергетики. М.: Эксмо, 2016, - 208 с. ISBN: 978-5-906861-06-1
54. Lambert J.G., Hall C.A.S., Balogh S., Gupta A., Arnold M. Energy, EROI and quality of life. *Energy Policy*. 2014. V. 64. P. 153–167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.001>
55. Capellan-Perez I., de Castro C., Gonzalez L.J.M. Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews*. 2019. V. 26. 100399. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>
56. Лисичкин Г.В., Булычев Б.М. Химия и охрана природы: распространенные заблуждения. Учебное пособие. М. МГУ, 2024, 48 с. <https://www.chem.msu.su/rus/books/2024/lisichkin-bulichev/welcome.html>
57. de Castro C., Carpintero O., Frachoso F., Mediavilla M., de Miguel L.J. *Energy*. 2014. V. 64. P. 506.
58. Kohse-Hoinghaus K. *Chem. Rev.* 2023. V. 123. P. 5139–5219. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00828?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as>