

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

## Возможна ли будущая мировая энергетическая система без ядерного синтеза?

С.В. Путвинский

*Представлен материал о динамике роста населения Земли и статистические данные о нынешней структуре производства и потребления энергии, а также статистические данные по распределению ее потребления среди населения Земли. Обсуждены естественные ограничения на нынешнюю глобальную энергетическую систему, основанную на сжигании ископаемых энергоресурсов, и ее возможное влияние на климат Земли и биосферу. Обсуждаются различные альтернативные источники энергии, которые могли бы заменить нынешнюю энергетическую систему, а также управляемый термоядерный синтез.*

PACS number: 52.55.Fa, 89.30. + f, 89.60. + x

### Содержание

1. Введение (1235).
  2. Мировое население и исторические энергетические системы (1235).
  3. Производство энергии и ее потребности (1236).
    - 3.1. Структура производства и потребления энергии.
    - 3.2. Распределение населения по потреблению энергии.
  4. Естественные ограничения на глобальную энергетическую систему (1238).
    - 4.1. Энергетический баланс Земли.
    - 4.2. Баланс углекислого газа в атмосфере.
    - 4.3. Влияние энергетической системы на углеродный цикл.
  5. Влияние роста концентрации CO<sub>2</sub> на климат и биосферу (1240).
  6. Альтернативные источники энергии (1241).
    - 6.1. Гидроэлектроэнергия.
    - 6.2. Солнечная энергия.
    - 6.3. Использование биомассы.
    - 6.4. Ядерные электростанции.
  7. Управляемый термоядерный синтез (1243).
  8. Заключение (1245).
- Список литературы (1246).

### 1. Введение

Когда академика Л.А. Арцимовича спросили, когда же, по его мнению, будет построен первый термоядерный реактор, он ответил: "Тогда, когда это будет нужно человечеству". Нужны ли нам сейчас термоядерные реакторы? Если не сейчас, то когда они понадобятся и понадобятся ли вообще? Мы, физики, работающие в этой области, понимаем, что трудимся над решением одной из важнейших проблем: созданием чистого для окружающей среды и практически не ограниченного ресурсами

источника энергии. Последние результаты, полученные на самой большой экспериментальной термоядерной установке — Европейский токамак JET — показывают, что цель достижима [1]. JET уже работает на грани положительного выхода, когда полученная мощность термоядерных реакций в дейтериево-тритиевой плазме равна мощности, затрачиваемой на ее нагрев.

К сожалению, ничего не дается даром и тем более создание термоядерной энергетики. Это дело, требующее больших затрат, которые в Российском обществе, потерявшем долгосрочные цели, кажутся немислимыми. Я провел некоторое время, изучая соответствующие данные, имеющиеся в различных обзорах и в компьютерной сети, и собрал некоторые факты и числа, которые предоставляю вашему вниманию.

Материал, представленный в этой статье, организован следующим образом. Сначала я напомним факты о динамике роста населения и представлю статистические данные о нынешней структуре производства и потребления энергии, а также статистические данные по распределению ее потребления среди населения Земли (разделы 2 и 3). В разделах 4 и 5 будут обсуждены естественные ограничения на нынешнюю глобальную энергетическую систему, основанную на сжигании ископаемых энергоресурсов, и ее возможное влияние на климат Земли и биосферу. В следующем шестом разделе будут обсуждаться различные альтернативные источники энергии, которые могли бы заменить нынешнюю энергетическую систему. Седьмой раздел будет посвящен управляемому термоядерному синтезу. И, наконец, в последнем разделе я попытаюсь дать мой ответ на вопрос, заданный академику Арцимовичу.

### 2. Мировое население и исторические энергетические системы

Хотим ли мы этого или нет, но население Земли будет продолжать расти еще долгое время. На рисунке 1 показано, как росло население за последние сорок лет и,

С.В. Путвинский. ITER Joint Central Team,  
11025 N. Torrey Pines Rd., La Jolla, CA92037, USA  
Тел. 1(619) 622-51-64. Факс 1(619)546-86-02  
E-mail: putvins@terus.org

Статья поступила 19 марта 1998 г.

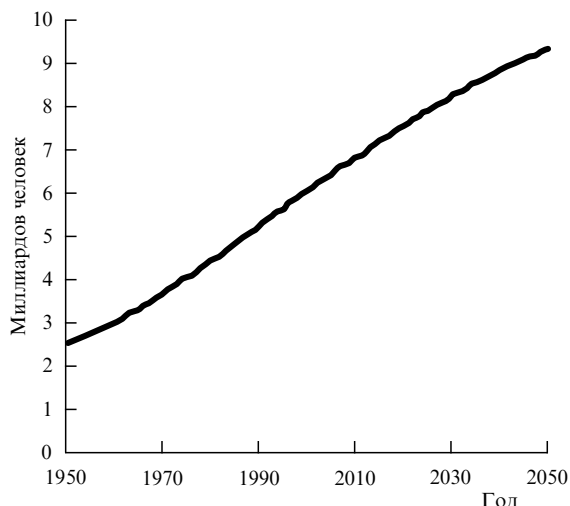


Рис. 1. Рост народонаселения Земли [4].

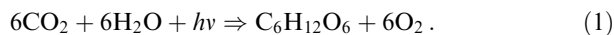
как предполагается, оно будет расти следующие пятьдесят лет.

В шестидесятые годы, когда население на Земле было меньше, чем 3 миллиарда человек, предсказание, что в 2000 году население увеличится вдвое, до 6 миллиардов, казалось фантастикой. Теперь видно, что предсказание было удивительно точным (в настоящий момент на Земле живет 5885 миллионов человек). Те же модели предсказывают, что к 2050 году население благополучно увеличится до 9 миллиардов. Рост населения происходит, в основном, из-за роста продолжительности жизни и с этим ничего не поделаешь — наши моральные принципы направлены на увеличение продолжительности жизни до естественного генетического предела, и решения, связанные с уменьшением времени жизни, неприемлемы для общества.

"Кормитесь и размножайтесь!" — приказал Бог нашим предкам примерно 12 тысяч лет назад, когда последние остатки ледников быстро отступали на север, открывая огромные просторы плодородных пастбищ, способных прокормить бесчисленные стада. И наши предки охотно подчинились.

Сейчас трудно предсказать, на каком уровне остановится рост и какая будет его динамика после максимума. (Замкнутые экологические системы обычно показывают резкое падение численности вида после того, как его плотность достигает уровня, разрушающего среду обитания.) Ясно лишь одно — если не произойдет катастрофических экологических явлений, то в ближайшие 50 лет население будет продолжать расти примерно с той же скоростью, что и предыдущие 50 лет.

Последующие 12000 лет, начиная с того времени, как произошло естественное глобальное потепление и началась история цивилизаций, человек жил на так называемых возобновляемых источниках энергии, потребляя зеленые растения, которые в свою очередь на прямую используют Солнечную энергию в химической реакции фотосинтеза:



Во время своего роста первичный потребитель Солнечной энергии — зеленое растение — поглощает углекислый газ из атмосферы, накапливает зеленую массу и производит кислород. Реакция (1) идет в обрат-

ном направлении, когда растение съедается вторичными потребителями Солнечной энергии (травоядными животными, насекомыми, бактериями и, в частности, человеком) или сгорает в химических реакциях. Этот источник энергии поддерживает почти все уровни глобальной экологической системы и был способен поддерживать человеческое население на уровне нескольких десятков миллионов человек. Неолитическая революция или переход от охоты и собирательства к сельскому хозяйству и разведению домашних животных ничего не изменил с точки зрения энергетики, а лишь создал симбиоз человека и некоторых животных и растений (сообщество человек–свинья–зерно), что привело к их взаимному благополучию и бурному росту населения этого сообщества.

Индустриальная революция, которая произошла в нашем обществе около трехсот лет назад, была явлением совершенно необычным для многих миллиардов лет естественной истории — эта была, по-видимому, первая в истории смена источника энергии от Солнечной к химической энергии полезных ископаемых — угля, нефти и натурального газа. Дешевый и огромный источник энергии колоссально изменил нынешний облик нашего мира и привел к тому бурному росту населения сообщества человек–свинья–зерно, который показан на примере человека на рис. 1.

Химическая реакция, производящая энергию при сжигании ископаемых топлив,



превратилась сейчас в основной источник энергии индустриального мира.

### 3. Производство энергии и ее потребности

#### 3.1. Структура производства и потребления энергии

Рисунок 2 показывает структуру производства и потребления энергии в США как типичный пример для потоков энергии в индустриально развитой стране. Похожие потоки энергии существуют и в других развитых странах, включая Россию, которая по производству энергии на душу населения далеко не на последнем месте, превосходя многие европейские страны.

Большая часть энергии в промышленно развитой стране (80 % в США) производится при сжигании полез-

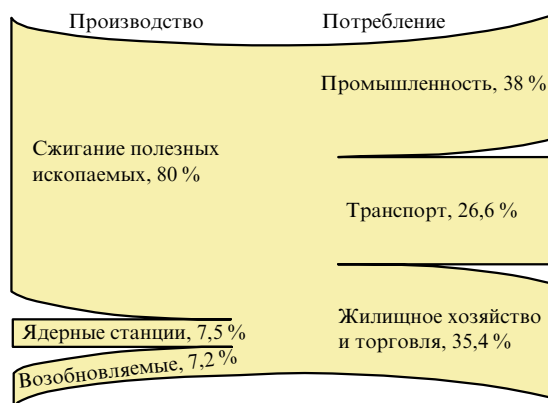


Рис. 2. Структура производства и потребления энергии в США в 1995 г. [5].

ных ископаемых — угля, нефти и природного газа. Ядерная энергетика производит в США лишь около 7,5 % энергии. Примерно то же количество производится возобновляемыми источниками — гидроэлектростанциями, солнечными и ветровыми и др.

Примерно 40 % полной произведенной энергии тратится на промышленное производство, около одной четверти — на транспорт (автомобили, железные дороги, авиация) и остальное используется в наших домах на отопление, освещение и приготовление пищи. Конечно, это деление несколько искусственное, но оно дает представление о том, какие источники энергии нужны человеку-индустриальному.

**3.1.1. Производство продуктов питания.** Очень интересно взглянуть на энергетические затраты в сельском хозяйстве индустриально развитой страны. Таблица 1 показывает, сколько энергии используется на различных стадиях производства продуктов питания, начиная от поля и кончая столом в нашей квартире.

**Таблица 1.** Потребление энергии в сельском хозяйстве США. Относительное распределение взято из [2], а потребление на душу населения пересчитано, основываясь на населении США, составляющем 263 миллиона человек и полном годовом потреблении энергии  $0,95 \times 10^{20}$  Дж [5]

Энергия, использованная на:	В % от полного потребления энергии	В абсолютной величине, $10^{18}$ Дж/год	Средняя мощность на душу, Вт
Выращивание	3,0	2,85	344
Переработку и перевозку	5,9	5,61	676
Продажу	2,6	2,47	298
Приготовление	5	4,74	571
Всего	16,5	15,69	1889
Мощность, потребляемая человеком в виде пищи			100

Выращивание, которое включает распашку полей, их удобрение, посадку растений и сбор урожая, потребляет около 3 % полной произведенной в США энергии. При полной потребляемой энергии  $0,95 \times 10^{20}$  Дж и полном населении 263 миллиона человек это соответствует внушительной средней мощности 344 Вт, приходящейся на каждого человека. Однако это только малая часть всех расходов на питание. Пищу надо переработать, привезти в магазин, продать и приготовить, прежде чем ее можно поставить на стол и съесть. Если подсчитать все энергетические расходы, то средняя мощность, используемая в сельском хозяйстве вырастет почти до двух киловатт или до 16,5 % от полной производимой мощности. Если предположить, что средний человек съедает 1 кг пищи в день (или 2 ккал), то можно оценить среднюю потребляемую мощность в виде продуктов питания — 100 Вт. Это лишь малая часть всех энергетических расходов на производство пищи. Поскольку большая часть энергии производится из полезных ископаемых, то можно ска-

зать, что меню индустриального человека состоит на 90 % из нефти, природного газа и угля.

Дешевые энергетические ресурсы позволили резко сократить число людей, производящих пищу для индустриального общества. В прединдустриальную эпоху производством пищи было занято почти 100 % населения. Это происходит и сейчас во многих бедных странах, таких, как Нигерия, где в сельском хозяйстве работает 97 % населения [2].

В Соединенных Штатах только 7 % населения занято фермерским трудом, и средний американец тратит на питание только 18 % своих доходов [2].

**3.1.2. Транспорт.** Транспорт — один из крупнейших потребителей энергии. В США, например, на него расходуется около 27 % полной производимой энергии. Подавляющая доля энергии (97 %) на транспорте получается из сжигания бензина в двигателях легковых и грузовых автомобилей, которые составляют 80 % его потребителей. Маловероятно, что в будущем число автомобилей в развитых странах будет снижаться — вся инфраструктура развитой страны в большой степени основана на автотранспорте. Несмотря на колоссальное снижение потребления бензина современными автомобилями — расход бензина на 100 км уменьшился за последние 20 лет в 2–3 раза — общее мировое потребление бензина продолжает возрастать. Это происходит за счет роста числа автомобилей особенно в развивающихся странах, таких, как Китай.

Большинство развитых стран имеет очень похожую структуру производства и потребления энергии с небольшими региональными особенностями. В интеграле по всему миру относительный вклад полезных ископаемых в производство энергии даже больше, чем в США. Таблица 2 показывает вклад различных источников энергии в глобальную энергетическую систему. Общий вклад всех полезных ископаемых в мировую энергетику более 86 %.

### 3.2. Распределение населения по потреблению энергии

Хорошо известно, что распределение производства и потребления энергии между различными регионами очень не однородно. Это можно проиллюстрировать на примере электроэнергии с помощью обычной функции распределения,  $N(P)$ , которая дает число людей на земном шаре,  $dN$ , потребляющих на душу населения среднюю мощность,  $P$ :

$$dN = N(P) dP.$$

Такую функцию распределения можно легко вывести из данных по потреблению энергии различными странами [6], относив их к населению этих стран [7]. Распределение,  $N(P)$ , по потреблению электроэнергии показано на рис. 3.

Рисунок показывает, что функция распределения состоит из двух компонент: промышленно развитые страны и так называемые развивающиеся страны (или просто бедные). Разделение на "бедных" и "богатых" видно по изменению среднего наклона функции распре-

**Таблица 2.** Вклад различных энергетических ресурсов в мировую энергетику в 1994 г. [6]

	Уголь	Природный газ	Сырая нефть	Ядерная энергия	Гидроэлектростанции	Остальные источники	Всего
Полная мощность, производимая в мире, $10^{12}$ Вт	3,00	2,81	4,39	0,75	0,81	0,05	11,81
В процентах от полной мощности	25,40	23,74	37,15	6,37	6,88	0,46	100

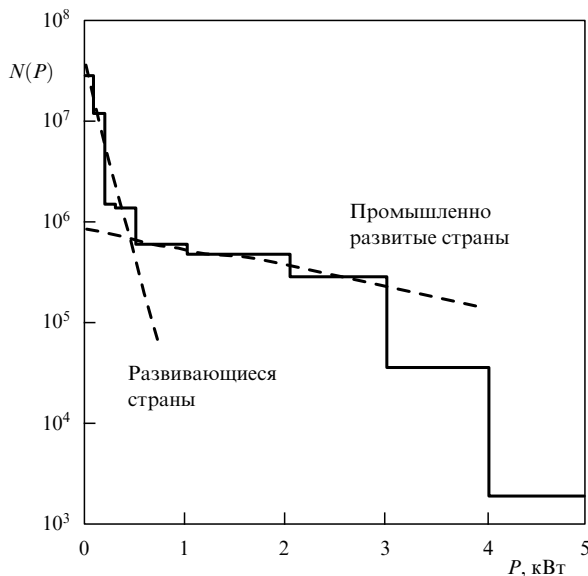


Рис. 3. Распределение населения по среднему потреблению электроэнергии на душу.

деления,  $N(P)$ , которое происходит в районе 500 Вт. Развитые страны, такие, как США, Япония, большинство европейских стран, Россия и др., потребляют более 500 Вт электрической мощности на душу. В энергетически богатых странах живет около 20 % населения, потребляя в среднем около 2000 Вт на душу. Остальная часть населения, т.е. 80 %, живет в странах, где среднее потребление электроэнергии на душу населения было в 1995 г. всего 100 Вт.

Не все промышленно развитые страны имеют высокий уровень жизни. Например, в России, которая является одним из крупнейших производителей энергоресурсов и электроэнергии и потребляет в среднем 1400 Вт электрической мощности на душу, уровень жизни населения довольно низкий по сравнению с другими индустриальными странами. В то же время ясно, что страны со 100 Вт электроэнергии на душу, вряд ли смогут обеспечить достойный уровень жизни, типичный для человека индустриального.

Пока трудно предсказать, как будет эволюционировать функция распределения, показанная на рис. 3, — кинетическое уравнение для нее пока не написано. Известно лишь, что в развитых странах население и среднее потребление энергии на душу практически стабилизировались. Изменяющаяся часть — это развивающиеся страны. Именно они дают основной вклад как в рост мирового населения, так и в рост полного производства энергии. Ясно и то, что развитие средств связи и транспорта увеличивает взаимодействие между этими компонентами у функции распределения. Поток инвестиций в развивающиеся страны (например, в Китай) обязательно приведет к росту производства энергии в этих регионах, а с другой стороны "охладит" энергичную компоненту функции распределения (перенос энергоемких производств из развитых в развивающиеся страны, увеличение эффективности промышленности и транспорта и т.д.)

Рисунок 3 показывает распределение по потреблению электроэнергии, в которую преобразуется только около 24 % энергоносителей. Однако потребление других видов энергии тоже очень неоднородно по регионам и имеет похожие распределения.

Таким образом, производство энергии на уровне нескольких кВт на душу населения необходимо (но не достаточно) для благополучия человека индустриального. Полное мировое потребление энергии будет продолжать расти как за счет роста населения, так и за счет роста душевого производства энергии в развивающихся странах. Прогноз на ближайшие 50 лет предсказывает рост производства энергии в 2–3 раза до уровня  $(25–30) \times 10^{12}$  Вт [1].

#### 4. Естественные ограничения на глобальную энергетическую систему

Рассмотрим, какие существуют естественные ограничения на полное производство энергии. Мы не будем обсуждать природные ресурсы<sup>1</sup>, а обратимся к экологическим последствиям, которые, как теперь стало ясно [1], могут проявиться гораздо раньше, чем будут выработаны ископаемые энергоресурсы.

##### 4.1. Энергетический баланс Земли

Очевидно, что вся произведенная энергия раньше или позже выделится в виде тепла на поверхности Земли, которое, в принципе, может повлиять на климат. Сравнение производимой человеком энергии с полной энергией Солнечного излучения, падающего на Землю, приведено в табл. 3. Пока еще энергия, производимая человеком, меньше, чем  $10^{-4}$  от Солнечной энергии, достигающей поверхности Земли, и составляет всего лишь несколько процентов от ее периодических изменений, которые, как считают, могут быть ответственны за периодические климатические изменения, происходившие в истории Земли. Таким образом, антропогенное производство энергии, добавляющее лишь 0,01 % к Солнечной энергии, слишком мало, чтобы оказать прямое влияние на климат. Более опасным может оказаться изменение химического состава атмосферы, которое может привести к изменению углеродного цикла и, в частности, к изменению глобального теплового баланса за счет парникового эффекта.

Как было показано выше, большая часть энергии (86 %) производится человечеством за счет сжигания ископаемых топлив, или, иначе говоря, за счет использования химической реакции (2), побочным продуктом которой является углекислый газ,  $\text{CO}_2$ . Таким образом, практически весь углерод, сжигаемый при производстве энергии, выбрасывается в атмосферу в форме углекислого газа. Тем самым человек при производстве энер-

Таблица 3. Сравнение производимой человеком энергии с Солнечной энергией [1, 3]

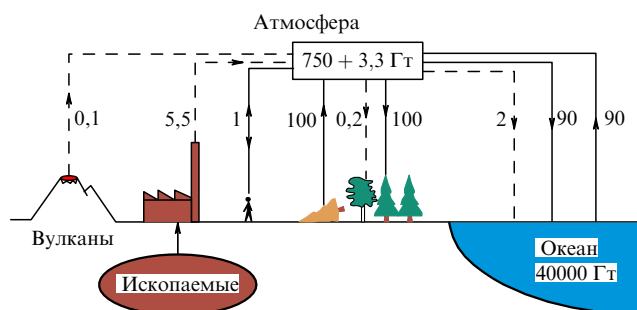
Полное производство энергии (1994)	$1,2 \times 10^{13}$ Вт
Солнечная постоянная	1370 Вт/м <sup>2</sup>
Солнечная энергия, падающая на Землю	$1,8 \times 10^{17}$ Вт
Солнечная энергия, достигающая поверхности Земли	$1,3 \times 10^{17}$ Вт
Амплитуда изменения Солнечного излучения в 11-летнем цикле	0,1 %
Изменение инсоляции при периодических изменениях земной орбиты (период 20–40 тыс лет).	3 %
Механизм Миланковича для объяснения ледниковых периодов [9, 10]	

<sup>1</sup> Подробный анализ природных ресурсов, пригодных для производства энергии, можно найти в работе [8].

гии напрямую вмешивается в один из фундаментальных циклов, на котором построена жизнь на Земле — углеродный цикл. Выбросы углекислого газа на уровне современной энергетики уже приводят к сдвигам в естественном углеродном цикле и, начиная с некоторого уровня, могут вызвать необратимые изменения в биосфере. Парниковый эффект от углекислого газа, производимого при производстве энергии, был предсказан более ста лет назад С. Аррениусом [11]. В то время это были чисто теоретические предположения и было не ясно, будет ли весь выброшенный углекислый газ поглощаться Мировым океаном. Сто лет спустя мы знаем гораздо больше о балансе углекислого газа в атмосфере.

#### 4.2. Баланс углекислого газа в атмосфере

Количество углерода, содержащегося в атмосфере в виде углекислого газа, его количество в Мировом океане и потоки, производимые различными естественными и антропогенными источниками, показаны на рис. 4. Каждый год зеленые растения поглощают из атмосферы примерно 100 Гигатонн (1 Гигатонна =  $10^9$  тонн) углерода в процессе фотосинтеза и роста [12]. (Это соответствует средней продуктивности 20 ц/га зеленой массы на 10 % земной поверхности.) Примерно такое же количество углерода выбрасывается каждый год обратно в атмосферу при потреблении зеленых растений вторичными потребителями, их химическом разложении, лесными пожарами и другими естественными причинами. Полное количество углерода в биомассе, включая почвы, составляет по оценкам около 2200 Гт, что соответствует среднему времени жизни биомассы около 20 лет (близко ко времени жизни дерева). Пищевая цепь сообщества человек — свинья — зерно добавляет в сбалансированный круговорот углерода всего 1 Гт в год. Планктон и другие океанские растения, живущие на глубине до ста метров, куда проникает солнечный свет и где возможна реакция фотосинтеза, обмениваются с атмосферой примерно тем же количеством углерода, 90 Гт в год, что и наземные растения [12]. Океан содержит огромное количество углерода, 40000 Гт, в виде углекислого газа, растворенного в воде на большой глубине, но обмен между поверхностью и глубокими слоями очень медленный. Такой обмен имеет характерное время 500–1000 лет [1] и при нынешней концентрации углекислого газа в атмосфере по современным оценкам обеспечивает откачку около 2 Гт углерода в год.



**Рис. 4.** Углеродный цикл в биосфере [1, 12]. Потоки, отмеченные стрелками, приведены в гигатоннах углерода в год. Около двух Гт из 5,5 Гт, выброшенных при сжигании полезных ископаемых, поглощается Мировым океаном. Дополнительная откачка в размере 0,2 Гт производится наземными растениями (включая эффект от вырубки тропических лесов). 3,3 Гт добавляется каждый год в атмосферу.

Геологические источники углекислого газа не велики. Например, источник  $\text{CO}_2$  от вулканической активности и эрозии геологических структур поставляет в атмосферу только 0,1 Гт углерода в год, что гораздо меньше, чем биогенные потоки.

Рисунок 4 приводит к интересным и неожиданным заключениям. Во-первых, видно, что зеленые растения суши и моря в состоянии "съесть" весь углекислый газ из атмосферы примерно за 4 года. Это означает, что атом углерода в форме молекулы  $\text{CO}_2$  живет в атмосфере в среднем четыре года, до того момента, когда молекула будет поглощена зеленым растением при фотосинтезе. Следующие 20 лет углерод проведет в составе органической материи и при ее распаде снова вернется в атмосферу. Таким образом, полный круговорот углерода происходит примерно за 25 лет. Например, углерод из дерева, которое умерло 100 лет назад, был использован растениями и животными уже четыре раза. Во-вторых, количество углерода в атмосфере в несколько раз меньше, чем количество углерода в биомассе. Все это означает, что атмосферный углекислый газ находится в состоянии настоящего динамического равновесия с живой природой и оценки влияния человеческой активности на баланс углерода должны это учитывать. Парниковый эффект — это лишь часть возможного воздействия, и вполне вероятно, что существуют и другие аспекты, о которых мы пока еще не знаем.

#### 4.3. Влияние энергетической системы на углеродный цикл

Из рисунка 4 видно, что количество углерода, выбрасываемого в атмосферу при сжигании ископаемых топлив, 5,5 Гт, существенно превышает то, что дают все естественные геологические источники. Очевидно, что у биосферы, как у системы, существующей миллиарды лет, должна быть естественная система управления, поддерживающая, в частности, и содержание углекислого газа в атмосфере на постоянном уровне. Действительно, около 2 из 5,5 "дополнительных" к естественному циклу гигатонн углерода поглощаются океанами. Леса и другие растения могли бы поглощать еще 1,8 Гт, но систематические вырубки тропических лесов возвращают обратно 1,6 Гт, так что результирующий эффект от наземной растительности остается на уровне 0,2 Гт в год. Таким образом, промышленные выбросы углекислого газа существенно превышают естественные способности биосферы регулировать содержание углекислого газа в атмосфере, и его концентрация непрерывно растет. Это видно на рис. 5, на котором показаны результаты измерения содержания углекислого газа в атмосфере в течение последних 1000 лет [1]. Регулярные измерения в атмосфере ведутся на Гавайских островах начиная с 1958 г. Более ранние точки были получены по содержанию углекислого газа в пузырьках воздуха во льдах Антарктиды. Видна четкая корреляция между началом регулярного использования полезных ископаемых в начале 18 века и содержанием углекислого газа в атмосфере. Нынешний рост содержания углекислого газа в атмосфере хорошо согласуется с оценками источников и стоков, приведенными выше.

Измерения также показывают, что за последние 200 лет концентрация углекислого газа возросла на 30 % от естественного, прединдустриального уровня.

Таким образом, океаны и наземные растения могут поглотить лишь 40 % выбросов углекислого газа, производимого при сжигании нефти, угля и природного газа, а 60 % выбросов накапливаются в атмосфере.

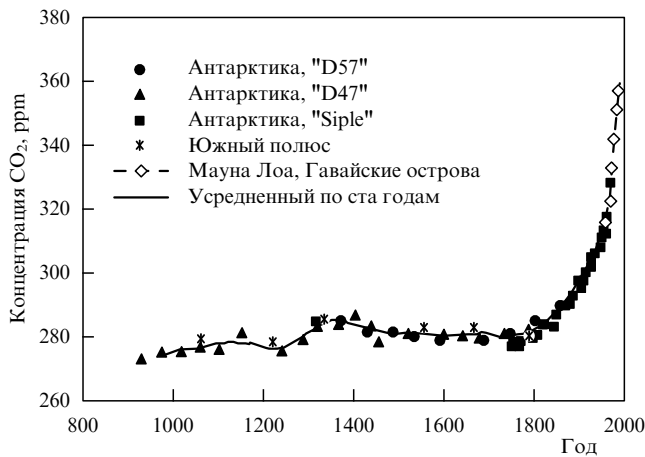


Рис. 5. Зависимость концентрации углекислого газа в Земной атмосфере от времени в течение последних 1000 лет [1]. ● — измерения по пузырькам воздуха во льдах Антарктики. ◇ — прямые измерения на Гавайских островах, осуществляемые с 1958 г. 1 ppm =  $10^{-6}$  объема.

Теперь можно попытаться оценить, каково будет содержание углекислого газа в атмосфере к 2050 г., предполагая, что, как и сейчас, ископаемые энергоресурсы останутся основным источником энергии, а ее производство удвоится по сравнению с нынешним уровнем. В этом случае мировая энергетическая система выбросит к 2050 году в атмосферу 400 Гт углерода и увеличит его содержание с 750 до 1000 Гт. Эта простая оценка хорошо совпадает с прогнозами, сделанными на основе гораздо более сложных моделей [1], которые также предсказывают почти удвоение концентрации  $\text{CO}_2$  к 2050 г. по сравнению с естественным, преиндустриальным уровнем в так называемом случае "все по-прежнему" [1, 12]. Если предположить, что нынешняя скорость поглощения углекислого газа океанами — это ответ естественной системы управления на 30%-ное возрастание концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, то максимальная скорость поглощения может быть не больше 6–7 Гт в год. Это сравнимо с нынешними выбросами  $\text{CO}_2$  и меньше, чем будущие выбросы. Поэтому нет никаких оснований считать, что естественная система управления каким-либо образом стабилизирует содержание  $\text{CO}_2$ . Мы производим слишком большое возмущение. В 1957 г. основоположники изучения углеродного цикла, Р. Ревел и Г. Сюз, писали: "Человечество сейчас проводит глобальный геофизический эксперимент, равных которому не было в прошлом и никогда не будет в будущем. В течение всего нескольких столетий мы возвращаем в атмосферу и океаны углерод органического происхождения, накопленный в осадочных породах за сотни миллионов лет" [12].

Какими же могут быть последствия такого "эксперимента" для сообщества человек — свинья — зерно?

## 5. Влияние роста концентрации $\text{CO}_2$ на климат и биосферу

Возможные последствия выбросов углекислого и других сопутствующих газов в атмосферу активно изучались в течение последних нескольких десятков лет. Основное беспокойство вызывает парниковый эффект [1].

Парниковый эффект играет существенную роль в энергобалансе Земли: без парникового эффекта средняя температура на поверхности Земли была бы ниже точки

замерзания воды. Углекислый газ, водяные пары и некоторые другие газы, содержащиеся в атмосфере, поглощают инфракрасное тепловое излучение с поверхности Земли, нагреваемой солнечным светом, и поддерживают среднюю температуру на уровне  $10^\circ\text{C}$ . Чем больше концентрация парниковых газов, тем больше эффект, который можно характеризовать дополнительной мощностью излучения на единицу площади, эквивалентной влиянию парникового эффекта.

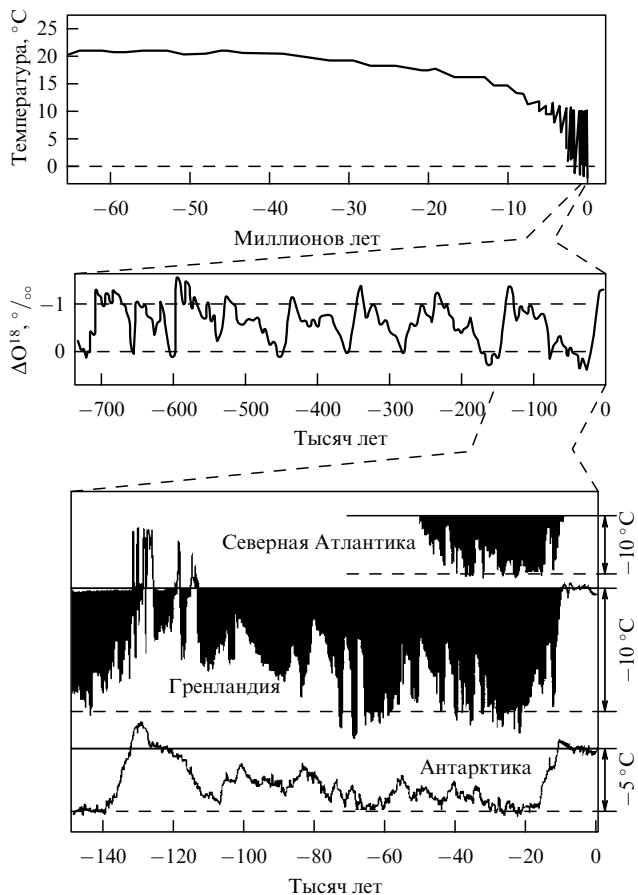
Оценки показывают, что нынешнее увеличение содержания углекислого газа на 30% эквивалентно увеличению потока энергии на  $2,45 \text{ Вт/м}^2$  [1], что составляет 0,7% Солнечной энергии, достигающей поверхности Земли. Это примерно в 70 раз больше, чем прямой нагрев поверхности от сжигания энергоносителей. Климатические модели предсказывают, что к 2050 г., если "все останется по-прежнему", парниковый эффект возрастет до 5–6  $\text{Вт/м}^2$ , составит 1,5% от Солнечной энергии и, следовательно, будет сравним с масштабом естественных изменений, приводивших в геологическом прошлом к глобальным климатическим изменениям.

Последние 5 млн лет климатической истории характеризовались возрастающей изменчивостью климата. Это видно из рис. 6, на котором показаны временные зависимости средней температуры на разных временных шкалах. Постепенное охлаждение Земли, происходившее в течение последних 60 млн лет, около 5 млн лет назад сменилось режимом, характеризующимся регулярными периодическими колебаниями температуры с периодом около 120 тысяч лет. Амплитуда таких "пилообразных" колебаний 5– $10^\circ\text{C}$ . Каждый цикл начинался с относительно быстрого потепления и последующего теплового периода, длящегося 10–20 тысяч лет. Следующие 100 тысяч лет температура постепенно уменьшалась, достигала своего минимума и затем снова быстро возрастала.

100-тысячелетнее уменьшение температуры сопровождалось осцилляциями с меньшей амплитудой и периодом около 20 тысяч лет, которые приводили к периодическому росту и отступлению ледников в северном полушарии — ледниковым периодам. Последний и наиболее холодный ледниковый период был 20–30 тысяч лет тому назад. В это время граница ледника опускалась до широт северной Франции. На рисунке 6 видна корреляция между поведением температуры в северном и южном полушариях, из чего можно заключить, что 20–100-тысячелетние колебания температуры связаны с глобальными изменениями климата.

Что же является причиной периодических изменений температуры? Однозначного ответа пока нет. Есть лишь несколько гипотез: периодическое изменение светимости Солнца, прохождение Солнечной системы через пылевые облака, столкновения с астероидами и, наконец, периодические изменения орбиты Земли и наклона земной оси. Последняя теория, которая называется механизмом Миланковича, считается наиболее достоверной — эллиптичность орбиты Земли и прецессия ее оси вращения имеют основные периоды — 100, 40 и 20 тысяч лет — хорошо коррелирующие с периодическими изменениями температуры [9, 10].

Большое беспокойство у человека-индустриального должны вызывать более частые колебания температуры, с периодом всего 1–2 тысячи лет, которые видны на более тонкой временной шкале на рис. 6. Удивительное свойство этих осцилляций — наличие резких фронтов, напоминающих фазовые переходы. Если это не "шум" в измерениях, то некоторые изменения температуры с



**Рис. 6.** Палеоклиматические данные для температуры поверхности Земли обратно во времени. Наверху: оценки средней температуры на шкале 60 млн лет (из [3]). В середине: разница ( $\Delta O^{18}$ ) между содержанием изотопа кислорода  $O^{18}$  в  $CaCO_3$  в осадках и в морской воде, которая зависит от температуры [13]. Внизу: изменение температуры, оцененное по изменению изотопного состава льда в Гренландии и Антарктике и оцененное по органическим осадкам на севере Атлантического океана [1].

амплитудой  $10^\circ\text{C}$  происходили менее чем за сто лет. На рисунке 6 можно найти события, во время которых средняя температура в месте измерения падала на  $10^\circ\text{C}$ , оставалась на этом уровне около 2000 лет и затем также быстро возвращалась обратно. Имеются дополнительные данные [1], показывающие, что последнее потепление, которое происходило около 11–12 тысяч лет назад, было очень быстрым. Тогда средняя температура в центральной Гренландии выросла на  $7^\circ$  в течение нескольких десятилетий, а изменения температуры сопровождались еще более быстрой сменой распределения осадков и перестройкой циркуляции атмосферы [1]. Возможно, что память поколений хранит воспоминания об этом событии как о всемирном потопе.

Что же происходило с содержанием углекислого газа во время периодических колебаний температуры, и каким образом это влияло на зеленые растения? Оказывается, что концентрация  $CO_2$  тоже сильно менялась вслед за изменением средней температуры и площадей ледников. 20 тысяч лет назад, во время последнего ледникового минимума, концентрация углекислого газа была вдвое ниже прединдустриального уровня, а затем, следуя быстрому увеличению температуры, также быстро возросла [14]. Как выяснилось, низкое содержание углекислого газа само по себе существенно повлияло

на растительный покров даже в тропиках, где похолодание во время ледникового периода было не так велико, как в высоких широтах [15]. Существует и точка зрения, что увеличение концентрации углекислого газа после потепления привело к увеличению продуктивности зеленых растений и сделало возможным земледелие [15] и, как следствие, нынешнее развитие цивилизаций.

Таким образом, в относительно недавнем прошлом на Земле происходили быстрые климатические изменения с характерным масштабом времени, сравнимым со временем жизни одного поколения. Такие климатические изменения должны рассматриваться как глобальные катастрофы, способные оказать серьезнейшие воздействия на инфраструктуру современного общества. Судя по прошлым 120 тысячам лет климатической истории, мы находимся сейчас в конце теплого периода, и в дальнейшем температура должна начать постепенно уменьшаться. Повторится ли этот естественный цикл или же влияние человека уже слишком велико и нас ожидает резкое потепление с полным таянием полярных льдов [14] и очередным "всемирным потопом"? Даже в том случае, если климатические воздействия выбросов окажутся меньше, чем мы сейчас предполагаем, удвоение концентрации  $CO_2$  должно вызвать существенные изменения в биосфере. Сколько точно времени потребуется для того, чтобы выбросы  $CO_2$  привели к серьезным экологическим последствиям, мы пока не знаем, но можем предположить, что в случае "все по-прежнему" это обязательно произойдет.

## 6. Альтернативные источники энергии

Ответственный обитатель индустриального мира, привыкший к потреблению большой дополнительной энергии, должен задуматься над тем, чем же он заменит ископаемые энергоресурсы через 40–50 лет для того, чтобы продлить свое благополучное существование. В этом параграфе мы обсудим, какие из известных источников энергии могли бы сыграть лидирующую роль в будущей энергетической системе.

Готовых кандидатов для новой, "не ископаемой" энергетики не так уж много. Это — гидроэлектроэнергия, солнечная энергия, выращивание и сжигание биомассы, ядерные реакторы, использующие реакцию деления. Остальные источники энергии, такие как энергия ветра, океанские приливы, геотермальная энергия и другие должны использоваться, где это возможно и выгодно, но очевидно, что их энергетические возможности слишком малы и не могут внести существенный вклад в глобальную энергетическую систему. При оценке альтернативных кандидатов нужно учесть, что структура потребления требует, чтобы около 50% энергии производилось и поставлялось потребителю в постоянном режиме (промышленное потребление, обогрев жилищ, часть транспорта). Эта часть потребления должна обеспечиваться так называемой базовой энергетикой. Остальная энергия потребления может производиться и тратиться по мере надобности, с максимальным потреблением в дневное время и относительно небольшим потреблением в ночное время.

**6.1. Гидроэлектроэнергия** уже поставляет в глобальную энергетическую систему около 7% энергии [2]. Этот источник энергии стал активно разрабатываться в начале 20 века и в настоящее время большинство пригодных для коммерческого использования ресурсов уже освоено. Весьма вероятно, что в будущем производ-

ство гидроэлектроэнергии останется на нынешнем уровне  $\approx 10^{12}$  Вт. Гидроэлектроэнергия — это базовый источник энергии.

**6.2. Солнечная энергия** является одним из наиболее привлекательных альтернативных источников энергии. Полная солнечная энергия, падающая на Землю, огромна, и использование менее  $10^{-4}$  ее части, требуемой для мировой энергетической системы, вряд ли может изменить глобальный энергетический баланс. В современных технологиях для прямого использования солнечной энергии применяют как фотоэлектрические преобразователи (солнечные батареи), так и тепловые машины. В последнем случае для увеличения к.п.д. преобразования солнечные лучи должны быть сконцентрированы с помощью специальных зеркал — гелиостатов — на приемниках, в которых происходит нагрев рабочего тела. Прямое солнечное излучение способно нагреть поверхность до температуры менее  $100^\circ\text{C}$ . В тех случаях, когда высокотемпературное тепло не требуется, например для нагрева воды в домах, солнечная энергия уже достаточно широко используется в солнечных районах.

Принципиальная проблема для солнечной энергетики — это наличие энергии только днем. Средняя во времени мощность солнечной энергии по крайней мере в три раза меньше, чем пиковая мощность в полдень (отношение уменьшится, если учесть пасмурные дни). Поэтому использование солнечного света для базового производства энергии требует параллельного строительства накопителей энергии. Например, солнечная электростанция на 1 ГВт средней мощности, работающая в базовом режиме, потребует оборудования, рассчитанного по крайней мере на 3 ГВт пиковой мощности. Кроме того, рядом с ней нужно будет построить накопитель энергии на  $5,8 \times 10^4$  ГДж и вторую, уже не солнечную электростанцию мощностью 1 ГВт, которая будет потреблять накопленную энергию в темное время суток. Чтобы представить себе масштаб накопителя, можно сделать оценку для накопителя, состоящего из двух водохранилищ, разделенных плотиной высотой в 20 м (один из наиболее эффективных накопителей). В течение дня вода будет закачиваться в верхнее водохранилище, а затем использоваться на гидроэлектростанции (мощностью 1 ГВт) в течение темного времени суток. Требуемая площадь водохранилища — 30 км<sup>2</sup>. Таким образом, солнечная электростанция со средней мощностью 1 ГВт для работы в постоянном базовом режиме потребует установленной мощности минимум 4 ГВт и огромного накопителя энергии.

Приведенный пример показывает, что солнечная энергия вряд ли подходит для базового производства энергии. В то же время солнечная энергетика, по-видимому, сможет обеспечить значительную часть энергетических домашних потребностей (нагрев воды и т.п.) и возможно часть энергетических затрат в промышленности и связи. Оценки показывают, что при современной структуре потребления энергии солнечная энергетика в будущем сможет обеспечивать до 20 % полных энергетических потребностей общества [2].

**6.3. Использование биомассы** для производства органического топлива может стать одним из существенных компонентов будущей энергетической системы. Этот, самый древний, способ производства энергии человек использует многие десятки тысяч лет, сжигая дрова сначала на костре, а затем в печи. Прогресс в этом

направлении ожидается от биоинженерии, которая должна вывести высокопродуктивные зеленые растения и разработать эффективные способы их переработки в топливо. Получение энергии из биомассы не нарушает углеродного баланса. При росте зеленое растение потребляет углекислый газ из атмосферы, при сжигании топлива углекислый газ возвращается обратно в том же количестве.

Хотя углеродный цикл при таком способе производства замкнутый, он напрямую вмешивается в естественный углеродный цикл и, начиная с некоторого уровня, может сместить естественное равновесие. Не нужно забывать и то, что кроме углеродного, растения участвуют в азотном и фосфорном цикле, которые тоже будут интерферировать с естественной средой. Учитывая, что все наземные растения связывают ежегодно 100 Гт углерода, можно предположить, что верхний предел для производства биомассы, при котором естественный цикл еще не сильно возмущен, будет на уровне 10 Гт углерода (10 % или меньше это типичное отношение между вторичным потребителем и первичным производителем в здоровой экологической системе). Если предположить, что для производства 1 кг топлива потребуются 6 кг биомассы [2], можно оценить верхний предел для производства энергии из биомассы как 15–20 % от полных будущих потребностей энергии.

Таким образом, этот способ производства энергии, по-видимому, не сможет удовлетворить все потребности базовой энергетике. В то же время топлива, производимые из биомассы, могут, в принципе, заменить значительную часть бензина, используемого в автотранспорте и тем самым существенно снизить несбалансированные выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу. Для этого нужно разработать энергетически эффективные способы выращивания биомассы, при которых энергия, полученная из топлива, превышает энергетические затраты на ее выращивание. Напомним, что в современном сельском хозяйстве на выращивание продукции с энергетическим эквивалентом в 100 Дж требует более 300 Дж энергетических затрат (см. раздел 3).

**6.4. Ядерные электростанции**, использующие энергию деления тяжелых ядер, являются одним из основных кандидатов для базовой энергетике [16]. Ядерные технологии хорошо разработаны и сейчас на подходе новое поколение ядерных реакторов, обладающих повышенной внутренней безопасностью. Ядерные электростанции поставляют в мировую энергетическую систему около 6 % от всей производимой энергии. В некоторых странах это основной источник в базовой энергетике. Например, во Франции ядерные электростанции производят более 70 % электроэнергии. В противоречии со сложившимся общественным мнением, ядерные электростанции являются наиболее безопасными и экологически чистыми среди всех "ископаемых" способов производства энергии. Основное и обоснованное беспокойство, связанное с широким использованием ядерной энергии, вызывают два обстоятельства:

- 1) распространение ядерных технологий и материалов, которые могут быть использованы для производства ядерного оружия;
- 2) наработка и необходимость хранения долгоживущих ядерных отходов.

Если ядерные электростанции будут к 2050 г. производить 50 % энергии, то они будут производить ежегодно и около 50000 т высокорadioактивных отходов [16]. Это не так уж много, если сравнить с тепловыми



электростанциями, которые сегодня выбрасывают в атмосферу 50000 т углерода в одну минуту. Беда в том, что радиоактивные отходы останутся активными в течение последующих 10–100 тысяч лет и будут непрерывно накапливаться и, чем дальше, тем больше затрат будет требоваться для их хранения и переработки.

Таким образом, ядерная энергетика, будучи экологически более чистой, чем тепловые станции, обладает тем же недостатком — это временное решение энергетической проблемы, способное лишь дать дополнительное время на разработку и переход к настоящим возобновляемым источникам энергии. Существует и сильный психологический барьер для широкомасштабного внедрения ядерной энергетике — общественное мнение населения большинства развитых стран направлено против развития ядерного сектора энергетике, и, как следствие, законодательство вносит чрезмерно сильные ограничения на безопасность ядерных реакторов, снижая их конкурентоспособность. Причина здесь проста — нынешнее поколение напугано "ядерной бомбой" как наиболее впечатляющим примером использования ядерной энергии в период холодной войны. В то же время никто не боится печки, к которой все привыкли за десятки тысяч лет человеческой истории несмотря на тот факт, что многие тысячи людей умирают ежегодно от последствий колоссальных выбросов  $\text{CO}_2$  и других веществ в атмосферу трубами промышленных "печек".

Видно, что в настоящее время у нас нет готовых подходящих кандидатов для замены "ископаемой" базовой энергетической системы за исключением ядерных реакторов деления, которые могли бы на некоторое время снизить экологическое давление на окружающую среду, создаваемое сжиганием ископаемых энергоносителей. Преобразование солнечной энергии и производство биомассы вместе с другими возобновляемыми источниками смогут обеспечить не более 50 % будущих потребностей в энергии. Если в ближайшем будущем потребуются быстрые и серьезные меры по снижению выбросов углекислого газа, то единственным решением будет замена тепловых электростанций ядерными.

Имеется еще один потенциальный кандидат для базовой энергетике — управляемый термоядерный синтез, но для его разработки и внедрения потребуются еще многие десятилетия.

## 7. Управляемый термоядерный синтез

Управляемый термоядерный синтез использует ядерную энергию, выделяющуюся при слиянии легких ядер, таких как ядра водорода или его изотопов дейтерия и трития. Ядерные реакции синтеза широко распространены в природе, будучи источником энергии звезд. Ближайшая к нам звезда — Солнце — это естественный термоядерный реактор, который уже многие миллиарды лет снабжает энергией жизнь на Земле. Ядерный синтез уже освоен человеком в земных условиях, но пока не для производства мирной энергии, а для производства оружия — он используется в водородных бомбах. Начиная с 50-х годов, в нашей стране и параллельно во многих других странах проводятся исследования по созданию управляемого термоядерного реактора. С самого начала стало ясно, что управляемый термоядерный синтез не имеет военного применения. В 1956 г. исследования были рассекречены и с тех пор проводятся в рамках широкого международного сотрудничества. В то время казалось, что цель близка и что первые крупные экспериментальные установки, построенные в конце 50-х годов, получат

термоядерную плазму. Однако потребовалось более 40 лет исследований для того, чтобы создать условия, при которых выделение термоядерной мощности сравнимо с мощностью нагрева реагирующей смеси. В 1997 г. самая крупная термоядерная установка — Европейский токамак JET получила 16 МВт термоядерной мощности и вплотную подошла к этому порогу.

Что же явилось причиной такой задержки? Оказалось, что для достижения цели физикам и инженерам пришлось решить массу проблем, о которых и не догадывались в начале пути. В течение этих 40 лет была создана новая наука — физика плазмы, которая позволила понять и описать сложные физические процессы, происходящие в реагирующей смеси. Инженерам потребовалось решить не менее сложные проблемы, в том числе научиться создавать глубокий вакуум в больших объемах, разработать большие сверхпроводящие магниты, мощные лазеры и источники рентгеновского излучения, разработать инжекторы, способные создавать мощные пучки нейтральных атомов, разработать методы высокочастотного нагрева плазмы и многое другое.

Первое поколение термоядерных реакторов, которые пока находятся в стадии разработки и исследований, по-видимому, будет использовать реакцию синтеза дейтерия с тритием



в результате которой образуется ядро гелия, He, и нейтрон. Необходимое условие для того, чтобы такая реакция пошла — это достижение высокой температуры смеси (сто миллионов градусов). Только в этом случае реагирующие частицы могут преодолеть электростатическое отталкивание и при столкновении, хотя бы на короткое время, приблизиться друг к другу на расстояние, при котором возможна ядерная реакция. При такой температуре смесь изотопов водорода полностью ионизируется и превращается в плазму — смесь электронов и ионов. Кроме высокой температуры, для положительного выхода энергии нужно, чтобы время жизни плазмы,  $\tau$ , помноженное на плотность реагирующих ионов,  $n$ , было достаточно велико  $n\tau > 5 \times 10^{14}$  с/см<sup>3</sup>. Последнее условие называется критерием Лоусона. Основная физическая проблема, с которой столкнулись исследователи на первых шагах на пути к термоядерному синтезу — это многочисленные плазменные неустойчивости, приводящие к плазменной турбулентности. Именно они сокращали время жизни в первых установках до величины на много порядков меньше ожидаемой и не позволяли достигнуть выполнения критерия Лоусона. За 40 лет исследований удалось найти способы борьбы с плазменными неустойчивостями и построить установки, способные удерживать турбулентную плазму.

Существуют два принципиально различных подхода к созданию термоядерных реакторов, и пока не ясно, какой подход окажется наиболее выгодным.

В так называемом инерционном термоядерном синтезе несколько миллиграмм дейтериево-тритиевой смеси сжимаются оболочкой, ускоренной за счет реактивных сил, возникающих при испарении оболочки с помощью мощного лазерного или рентгеновского излучения. Энергия выделяется в виде микровзрыва, когда в процессе сжатия в смеси дейтерия с тритием достигаются необходимые условия для термоядерного горения. Время жизни такой плазмы определяется инерционным

разлетом смеси и поэтому критерий Лоусона для инерционного удержания принято записывать в терминах произведения  $\rho r$ , где  $\rho$  — плотность реагирующей смеси и  $r$  — радиус сжатой мишени. Для того, чтобы за время разлета смесь успела выгореть, нужно, чтобы  $\rho r \geq 3$  г/см<sup>2</sup>. Отсюда сразу следует, что критическая масса топлива,  $M$ , будет уменьшаться с ростом плотности смеси,  $M \sim \rho r^3 \sim 1/\rho^2$ , а следовательно, и энергия микровзрыва будет тем меньше, чем большей плотности смеси удастся достичь при сжатии. Ограничения на степень сжатия связаны с небольшой, но всегда существующей неоднородностью падающего на оболочку излучения и с несимметрией самой мишени, которая еще и нарастает в процессе сжатия из-за развития неустойчивостей. В результате появляется некая критическая масса мишени и, следовательно, критическая энергия, которую нужно вложить в оболочку для ее разгона и получения положительного выхода энергии. По современным оценкам [17], в мишень с массой топлива около 5 миллиграмм и радиусом 1–2 миллиметра нужно вложить около 2 МДж за время  $(5–10) \times 10^{-9}$  с. При этом энергия микровзрыва будет на уровне всего  $5 \times 10^8$  Дж (эквивалентно около 100 кг обычной взрывчатки) и может быть легко удержана достаточно прочной камерой. Предполагается, что будущий термоядерный реактор будет работать в режиме последовательных микровзрывов с частотой в несколько герц, а выделяемая в камере энергия будет сниматься теплоносителем и использоваться для получения электроэнергии.

За прошедшие годы достигнут большой прогресс в понимании физических процессов, происходящих при сжатии мишени и взаимодействии лазерного и рентгеновского излучения с мишенью. Более того, современные многослойные мишени уже были проверены с помощью подземных ядерных взрывов, которые позволяют обеспечить требуемую мощность излучения [17]. Были получены зажигание и большой положительный выход термоядерной энергии и поэтому нет сомнений, что этот способ, в принципе, может привести к успеху. Основная техническая проблема, с которой сталкиваются исследователи, работающие в этой области — создание эффективного импульсного драйвера для ускорения оболочки. Требуемые мощности можно получить, используя лазеры (что и делается в современных экспериментальных установках [17]), но к.п.д. лазеров слишком мал для того, чтобы можно было рассчитывать на положительный выход энергии. В настоящее время разрабатываются и другие драйверы для инерционного синтеза, основанные на использовании ионных и электронных пучков, и на создании рентгеновского излучения с помощью Z-пинчей. За последнее время здесь также достигнут существенный прогресс [18]. В настоящее время в США ведется строительство большой лазерной установки, NIF, рассчитанной на получение зажигания [19]. Рисунок 7 показывает сечение камеры, в которой будет происходить поджиг мишени.

Другое направление в управляемом термоядерном синтезе — это термоядерные реакторы, основанные на магнитном удержании. Магнитное поле используется для изоляции горячей дейтериево-тритиевой плазмы от контакта со стенкой. В отличие от инерционных реакторов магнитные термоядерные реакторы — это стационарные устройства с относительно низким объемным выделением энергии и относительно большими размерами. За 40 лет термоядерных исследований были предложены различные системы для магнитного удержа-

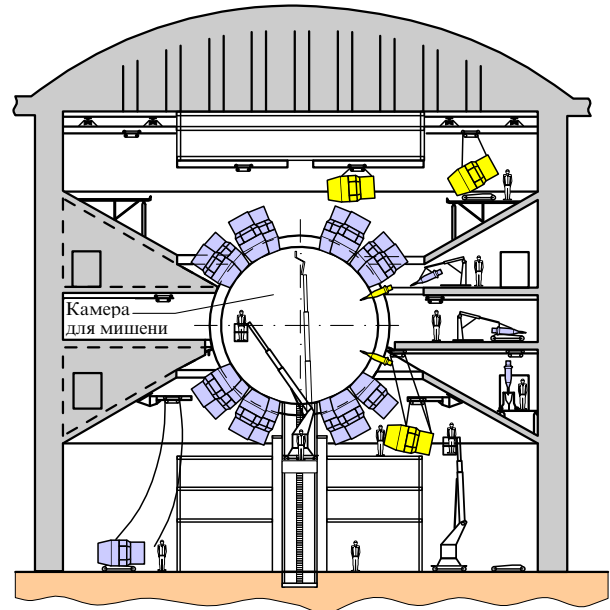


Рис. 7. Камера строящейся в США установки, NIF, в которой будет происходить обжатие и поджиг мишени с помощью лазерного излучения [17].

ния, среди которых токамак занимает сейчас лидирующее положение. Другая система для магнитного удержания плазмы — это стелларатор. Крупные стеллараторы строятся в настоящее время в Японии и Германии.

В токамаке горячая плазма имеет форму тора и удерживается от контакта со стенкой с помощью магнитного поля, создаваемого как внешними магнитными катушками, так и током, протекающим по самой плазме. Характерная плотность плазмы в токамаке  $10^{14}$  частиц в см<sup>3</sup>, температура  $T = 10–20$  кэВ ( $1 \text{ эВ} \approx 12000^\circ \text{C}$ ) и давление 2–3 атм. Для того, чтобы удержать это давление, требуется магнитное поле с индукцией  $B \approx 1$  Тл. Однако плазменные неустойчивости ограничивают допустимое давление плазмы на уровне нескольких процентов от магнитного давления и поэтому требуемое магнитное поле оказывается в несколько раз выше, чем то, которое нужно для равновесия плазмы. Для избежания энергетических расходов на поддержание магнитного поля, оно будет создаваться в реакторе сверхпроводящими магнитами. Такая технология уже имеется в нашем распоряжении — один из крупнейших экспериментальных токамаков, T-15, построенный несколько лет назад в России, использует сверхпроводящие магниты для создания магнитных полей.

Токамак-реактор будет работать в режиме самоподдерживающегося термоядерного горения, при котором высокая температура плазмы обеспечивается за счет нагрева плазмы заряженными продуктами реакции (3) — альфа-частицами (ионами He). Для этого, как видно из условия Лоусона, нужно иметь время удержания энергии в плазме не меньше 5 с. Большое время жизни плазмы в токамаках и других стационарных системах достигается за счет их размеров, и поэтому существует некий критический размер реактора. Оценки показывают, что самоподдерживающаяся реакция в токамаке возможна в том случае, если большой радиус плазменного тора будет 7–9 м. Соответственно, токамак-реактор будет иметь полную тепловую мощность на уровне 1 ГВт. Удивительно, что эта цифра примерно совпадает с

мощностью минимального инерционного термоядерного реактора.

За прошедшие годы достигнут впечатляющий прогресс в понимании физических явлений, ответственных за удержание и устойчивость плазмы в токамаках. Разработаны эффективные методы нагрева и диагностики плазмы, позволившие изучить в нынешних экспериментальных токамаках те плазменные режимы, которые будут использоваться в реакторах. Нынешние крупные экспериментальные машины — JET (Европа), JT60-U (Япония), T-15 (Россия) и TFTR (США) — были построены в начале 80-х годов для изучения удержания плазмы с термоядерными параметрами и получения условий, при которых нагрев плазмы сравним с полным выходом термоядерной мощности. Для токамаков TFTR и JET использовали DT смесь и достигали соответственно 10 и 16 МВт термоядерной мощности. В экспериментах с DT смесью JET получил режимы с отношением термоядерной мощности к мощности нагрева плазмы,  $Q = 0,9$ , и токамак JT60-U на модельной DD смеси достиг  $Q = 1,06$ . Это поколение токамаков практически выполнило свои задачи и создало все необходимые условия для следующего шага — строительство установок, нацеленных на исследование зажигания,  $Q \geq 5$  и уже обладающих всеми чертами будущего реактора.

В настоящее время ведется проектирование такого первого экспериментального термоядерного реактора — ИТЭР [20]. Общий вид реактора показан на рис. 8. В проекте участвуют Европа, Россия, США и Япония. Предполагается, что этот первый термоядерный токамак-реактор будет построен к 2010 г.

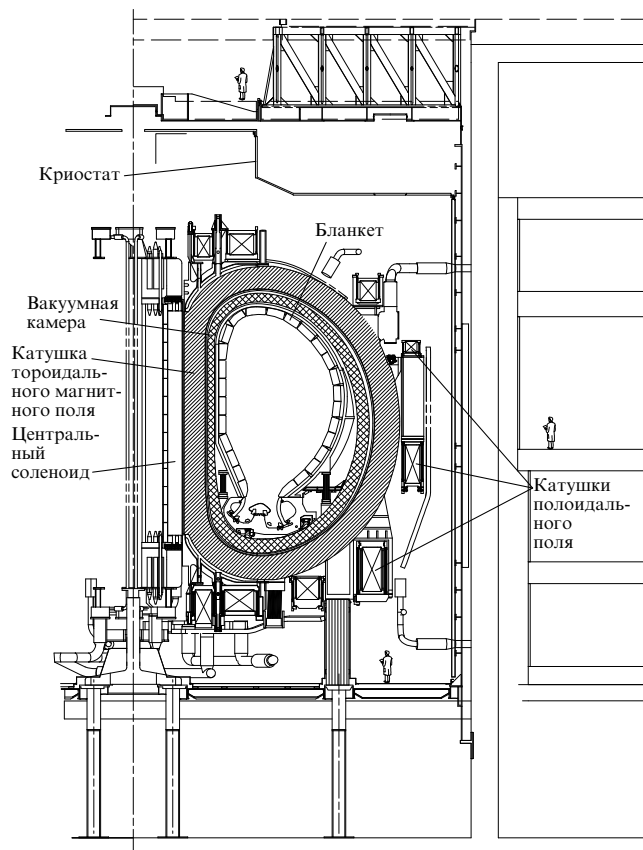


Рис. 8. Общий вид проектируемого токамака-реактора ИТЭР.

Существуют огромные запасы топлива для термоядерной энергетики. Дейтерий — это широко распространенный в природе изотоп, который может добываться из морской воды. Тритий будет производиться в самом реакторе из лития. Запасы дейтерия и лития достаточны для производства энергии в течение многих тысяч лет и это топливо, как и продукт реакций синтеза — гелий, не радиоактивны. Радиоактивность возникает в термоядерном реакторе из-за активации материалов первой стенки реактора нейтронами. Известны низкоактивирующиеся конструкционные материалы для первой стенки и других компонент реактора, которые за 30–50 лет теряют свою активность до полностью безопасного уровня. Можно представить, что реактор, проработавший 30 лет и выработавший свой ресурс, будет законсервирован на следующие 30–50 лет, а затем конструкционные материалы будут переработаны и вновь использованы в новом термоядерном реакторе. Кроме дейтерий-тритиевой реакции, которая имеет высокое сечение при относительно низкой температуре, и, следовательно, легче всего осуществима, можно использовать и другие реакции [21]. Например, реакции  $D + {}^3He$  и  $p + {}^{11}B$  не дают нейтронов и не приводят к нейтронной активации первой стенки. Однако условия Лоусона для таких реакций более жесткие и поэтому нынешняя термоядерная программа в качестве первого шага нацелена на использование DT смеси.

Несмотря на большие успехи, достигнутые в этом направлении, термоядерным реакторам предстоит еще пройти большой путь прежде, чем будет построен первый коммерческий термоядерный реактор. Развитие термоядерной энергетики требует больших затрат на развитие специальных технологий и материалов и на физические исследования. При нынешнем уровне финансирования термоядерная энергетика не будет готова раньше, чем к 2020–2040 гг.

## 8. Заключение

Благополучие человека, живущего в современном индустриальном обществе, основано на большом потреблении относительно дешевой энергии. Предполагается, что потребление энергии будет расти быстрее, чем растет население Земли, и по крайней мере удвоится к 2050 г. Более 86 % от полной используемой человечеством энергии производится при сжигании полезных ископаемых — угля, нефти, природного газа и др., что приводит к ежегодным выбросам в атмосферу около 5,5 Гт углерода в форме углекислого газа. В случае прежней структуры производства энергии выбросы возрастут к 2050 г. до 11 Гт углерода в год, что составит заметную долю от полного круговорота углерода в биосфере.

Даже нынешний уровень выбросов превосходит то, что может быть скомпенсировано естественной системой управления биосферы. Из 5,5 Гт углерода, выбрасываемых промышленностью в атмосферу, около 3,3 Гт накапливается в ней в виде углекислого газа, который будет оставаться в ней в течение многих сотен лет. За последние 200 лет концентрация углекислого газа в атмосфере увеличилась на 30 %. Прогнозы предсказывают, что к 2050 г. содержание  $CO_2$  в атмосфере удвоится по сравнению с преиндустриальным уровнем.

Накопление углекислого и других сопутствующих производству энергии газов в атмосфере приводит к эффективному нагреву земной поверхности за счет усиленного поглощения теплового излучения с поверхности Земли. В настоящее время парниковый эффект от

избыточного углекислого газа дает эффективный нагрев поверхности на уровне  $2,45 \text{ Вт/м}^2$ . К 2050 г. эффект парниковых газов достигнет уровня  $5-6 \text{ Вт/м}^2$  и станет сравним с теми естественными изменениями уровня солнечного излучения, которые приводили в геологическом прошлом к существенным климатическим изменениям. Палеоклиматические данные указывают на то, что климат может измениться быстро, за время сравнимое с жизнью одного поколения. Серьезность экологического положения становится все более очевидной для широких слоев населения и сегодня уже сделаны первые, пока еще нерешительные шаги, направленные на снижение выбросов углекислого газа в атмосферу<sup>2</sup>.

То, что требуется — это радикальная перестройка нынешней энергетической системы. У нас есть примерно 50 лет для того, чтобы заменить прежнюю энергетическую систему, основанную на сжигании ископаемых энергоресурсов, на систему, использующую другие экологически чистые и возобновляемые источники энергии. Наиболее вероятно, что новая энергетическая система будет использовать комбинацию различных источников энергии: солнечную энергию, производство биомассы, ядерные реакторы синтеза и термоядерную энергетику, и только объединенные усилия людей, работающих в различных областях научных исследований в энергетике, способны решить эту глобальную проблему в такой исторически короткий срок.

В то же время видно, что единственный кандидат для базовой энергетики — это ядерная энергия. Ядерные электростанции, основанные на реакции деления, уже сейчас могут начать заменять тепловые электростанции, сжигающие ископаемые энергоресурсы. И хотя ядерная энергетика, использующая реакции деления, это тоже временное решение, она может дать время, необходимое для разработки термоядерных реакторов синтеза. Многолетние исследования в области управляемого термоядерного синтеза показали, что термоядерные реакторы могут стать тем способом производства энергии, который в будущем заменит нынешнюю базовую энергетическую систему. Сейчас уже наступило время разработать активную комплексную энергетическую программу, основанную на широком международном сотрудничестве для того, чтобы в течение следующих 40–50 лет заменить существующую энергетическую систему на

новую, основанную на экологически чистых и возобновляемых источниках энергии, так необходимую для будущего процветания человечества.

Автор выражает благодарность В.С. Муховатову, В.А. Чуянову и М.Н. Розенблюту за интерес и помощь в работе и ценные замечания.

## Список литературы

1. Houghton J T et al. (Eds) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press, 1996)
2. Howes R, Fainberg A (Eds) *The Energy Sourcebook* (New York: AIP, 1991)
3. *Climate in Earth History* (Papers presented at the American Geophysical Union Meeting, Toronto, 1980) (Washington, D.C.: National Academy Press, 1982)
4. *Total Midyear Population for the World: 1950–2050* (US Bureau of the Census: International Data Base, 1997) <http://www.census.gov/ipc/www/worldpop.html>; Капица С П *УФН* **166** 63 (1996)
5. Allen C *Annual Energy Review Graphical Summary* (Energy Information Administration, Department of Energy, US) <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/aergs/aer2.html>
6. Allen C *World Primary Energy Production, 1986–1995* in *International Energy Annual 1995* (Energy Information Administration, Department of Energy, US) <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/aer-int.html>
7. "Population of the countries of the world", in *World Population Prospects: the 1996 Revision* (New York: United Nations, 1996) [gopher://gopher.undp.org:70/00/ungophers/popin/wdtrends/pop1996](http://gopher.undp.org:70/00/ungophers/popin/wdtrends/pop1996)
8. Tomabechi K *Fusion Engineering and Design* **24** 343 (1994)
9. Emiliani C *Earth and Planetary Science Letters* **37** 349 (1978)
10. Kukla G J *Nature* (London) **253** 600 (1975)
11. Arrhenius S *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **41** 237 (1896)
12. Joos F *Europhys. News* **27** 213 (1996)
13. Linden E "Warnings from the ice" *Time* (April 14) 56 (1997)
14. Delmas R J, Ascencio J-M, Legrand M *Nature* (London) **284** 155 (1980)
15. Farguhar G D *Science* **278** 1411 (1997)
16. Адамов Е О и др. *Атомная энергия* **82** 3 (1997)
17. Lindl J *Phys. Plasmas* **2** 3933 (1995)
18. Glanz J *Science* **277** 304 (1997)
19. Lawer A *Science* **275** 1253 (1997)
20. *Technical Basis for the ITER Final Design Report, Cost Review and Safety Analysis* (IAEA: ITER Final Design Report, 1998)
21. Головин И Н, Препринт ИАЭ-5522/8 (М.: ИАЭ, 1992)
22. *Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on Climate Change*, Kyoto, 1–10 December 1997 (United Nations, FCCC/CP/L.7/Add. 1, 1997)

<sup>2</sup> На последнем международном совещании в Киото (Япония) [22], удалось прийти к соглашению о снижении к 2008–2012 гг. выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу до уровня на 5% ниже уровня 1990 г.

## Can the future world energy system be free of nuclear fusion?

S.V. Putvinskii

ITER Joint Central Team,

11025 N. Torrey Pines Rd., La Jolla, Ca92037, USA

Tel. 1(619) 622-5164

Fax 1(619)546-8602

E-mail: putvins@terus.org

Available information on the dynamics of world population growth as well as global statistical data on today's energy production, consumption and distribution are presented. Natural restrictions on, and possible climatic and biospherical impacts of, modern world's fossil combustion energy system are discussed. Alternative energy sources capable of replacing the existing energy system are considered and prospects for controllable nuclear fusion are discussed.

PACS numbers: 52.55.Fa, **89.30. + f**, **89.60. + x**

Bibliography — 22 references

Received 19 March 1998