

## ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Ю. Э. Пенионжкевич, д. физ.-мат. н., профессор

Объединенный Институт Ядерных Исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия

## NUCLEAR ENERGETIC

Yu. E. Penionzhkevich, Doctor of Sciences, professor

Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia

В статье описывается современное состояние различных источников энергии и их эффективности для обеспечения человечества адекватными объемами энергоснабжения с учетом нарастающих потребностей. Альтернативные виды «зеленой» энергетики сравниваются с возможностями новых технологий ядерной энергетики. Представлены положительные стороны ядерной энергетики, перспективы ее развития и потенциальное влияние на экологию нашей планеты.

*Ключевые слова:* ядерная физика, деление ядер, ядерный реактор, альтернативное топливо, нейтроны, экология, энергия

The article describes the current state of various energy sources and their effectiveness for providing humanity with the necessary energy. Alternative types of «green» energy are compared with the possibilities of nuclear energy. The positive aspects of nuclear energy, the prospects for its development, and the impact on the ecology of our planet are presented.

*Keywords:* nuclear physics, nuclear fission, nuclear reactor, alternative fuel, neutrons, ecology, energy

## Что есть энергия?

Прежде чем говорить о ядерной энергии, хорошо бы понять, что такое энергия вообще. С похожей проблемой сталкивался Сократ при попытке объяснить, что такое красота: примеры привести легко, а дать определение — сложно. В той же Древней Греции Аристотель полагал, что энергия — это некое активное начало, причина всех видимых изменений в мире. Позже выделили виды энергии: потенциальная, кинетическая, тепловая, химическая и т. д. Но любая энергия ассоциируется с работой, которую можно совершить, затратив энергию. Исторически сложилось, что различные виды энергии измеряют в разных единицах: килограммометр (кГм) — единица измерения механической энергии, калория (кал) — тепловой, электронвольт (эВ) — электрической. В ядерной физике используют единицу измерения МэВ (миллион электронвольт).

Идея о том, что все виды энергии эквивалентны, оформилась в 1847 году (ее авторы: Роберт Майер, Джеймс Джоуль и Герман Гельмгольц). Она обрела форму закона сохранения энергии. Он звучит так: «В замкнутой системе сумма всех видов энергии постоянна, независимо от процессов перехода из одной формы в другую». Еще раньше, в 1782 году, Джеймс Уатт (единица мощности Ватт названа в его честь) изобрел паровую машину, которая преобразовывала тепловую энергию в работу, а в 1824 году Сади Карно нашел закон этого преобразования. Оказалось, что в работу можно превратить не все тепло, а только его часть:  $\eta = (T_1 - T_2) / T_1$ , где  $T = t^{\circ}\text{C} + 273,15$  — абсолютная температура.

Это соотношение определяет максимальный КПД любой тепловой машины. При последующих превращениях энергии ее потери непрерывно растут, то есть энергия системы необратимо уменьшается. Именно это свойство энергии отличает ее от вещества: атомы вещества могут быть использованы многократно (сгнившее дерево дает материал для новых деревьев), но энергию можно использовать только один раз. А это означает, что запасы энергии, накопленные на Земле, непрерывно уменьшаются и неизбежно иссякнут. Основной вопрос: когда?

Открытие электричества не отменило этот вывод, просто цепочка превращений энергии удлинилась: тепло → работа → электричество → работа → тепло.

В любом случае процесс использования энергии начинается и заканчивается теплом, и все выводы Карно и Клаузиуса остаются в силе (проекты вечного двигателя Парижская академия наук отказалась принимать к рассмотрению еще в 1775 году — за 70 лет до открытия закона сохранения энергии).

## Ядерная энергия

О существовании внутриядерной энергии ученые узнали в начале XX века, а в 1939 году открыли деление ядра урана под действием нейтронов, что сопровождается выделением огромной энергии:  $n + \text{U} \rightarrow \text{продукты деления (ПД)} + 200 \text{ МэВ}$ .

Это в 50 млн. раз больше, чем при сжигании атома углерода:  $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 4,2 \text{ эВ}$ .

Объяснение этому факту дает знаменитая формула Эйнштейна, которая обобщила закон сохранения энер-

гии до закона сохранения материи:  $E = mc^2$ , где  $E$  — энергия, заключенная в теле массой  $m$ , а  $c$  — скорость света.

При делении ядра его масса уменьшается на величину  $\Delta m$  и выделяется энергия:  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ . Энергия эта огромна: для того чтобы в течение года обеспечить работу атомной электростанции (АЭС) мощностью 1 ГВт, достаточно «сжечь» 1 тонну урана. Для питания тепловой электростанции (ТЭС) равной мощности необходимо 3 млн тонн угля в год — три железнодо- рожных состава ежедневно.

Кроме ядерной энергии деления существует также ядерная энергия синтеза, которая выделяется при слиянии ядер дейтерия и трития:  $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,6 \text{ МэВ}$ .

Эта энергия в 14 раз меньше, чем энергия деления, и выделяется лишь при нагревании смеси ядер до температуры  $\sim 10$  млн градусов. В отличие от ядерного реактора деления, который был построен уже через три года после открытия деления ядра, термоядерный реактор не удастся построить вот уже 70 лет, и сегодня срок его постройки вновь отодвигается еще на 50 лет.

## Сколько энергии необходимо человечеству?

В среднем человек потребляет с пищей 2500 килокалорий в день, то есть его мощность составляет  $\approx 120 \text{ Дж/сек} \approx 120 \text{ Вт}$  — мощность яркой электролампочки; биологическая мощность всего народонаселения Земли (7,6 млрд. человек) составляет  $\sim 10^3 \text{ ГВт}$  (Луна в полнолуние светит в тысячу раз менее ярко).

С доисторических времен человек увеличил потребление энергии (домашние животные, водяная и ветряная мельницы) до 200 Вт, к началу промышленной революции оно выросло до  $\sim 300 \text{ Вт}$ , сегодня —  $\sim 2000 \text{ Вт} = 2 \text{ кВт/чел}$ .

Сегодня мощность энергетики мира составляет  $\sim 1,76 \cdot 10^{13} \text{ Вт} = 1,76 \cdot 10^4 \text{ ГВт}$ , то есть в среднем  $\sim 2 \text{ кВт}$  на человека, хотя потребляется она крайне неравномерно: в США — 12 кВт, в Европе и России — 6 кВт, в Китае — 1,6 кВт, в Сомали — 0,2 кВт. Производство энергии растет со скоростью  $\sim 1,2\%$  в год — чуть быстрее, чем население Земли.

Простой расчет показывает, что каждый новый миллиард населения добавляется за 13 лет. Легко подсчитать, что при таком темпе роста уже через 1000 лет количество людей увеличится в 10 раз, и вряд ли на Земле хватит ресурсов для их существования.

Если к этому времени каждый житель планеты будет потреблять в среднем мощность 4 кВт, то производство энергии вырастет в три раза — до уровня  $\sim 5 \cdot 10^4 \text{ ГВт}$ .

## Где взять необходимые объемы энергии?

Человечество для своих нужд освоило и успешно использует самые разнообразные источники энергии. К ним можно отнести следующие (см. таблицу).

### Источники энергии, используемые человеком

Способ использования	Энергия, используемая человеком	Первоначальный природный источник
Солнечные электростанции	Электромагнитное излучение Солнца	Солнечный ядерный синтез
Ветряные электростанции	Кинетическая энергия ветра	Солнечный ядерный синтез, Движения Земли и Луны
Традиционные ГЭС Малые ГЭС	Движение воды в реках	Солнечный ядерный синтез
Приливные электростанции	Движение воды в океанах и морях	Движения Земли и Луны
Волновые электростанции	Энергия волн морей и океанов	Солнечный ядерный синтез, Движения Земли и Луны
Геотермальные станции	Тепловая энергия горячих источников планеты	Внутренняя энергия Земли
Сжигание ископаемого топлива	Химическая энергия ископаемого топлива	Солнечный ядерный синтез в прошлом.
Сжигание возобновляемого топлива традиционное нетрадиционное	Химическая энергия возобновляемого топлива	Солнечный ядерный синтез
Атомные электростанции	Тепло, выделяемое при ядерном распаде	Ядерный распад

Все виды электроэнергетики можно разделить на традиционную, альтернативную и малую. Характерной чертой традиционной электроэнергетики является её давняя и хорошая освоенность, она прошла длительную проверку в разнообразных условиях эксплуатации. Основную долю электроэнергии во всём мире получают именно на традиционных электростанциях, их единичная электрическая мощность очень часто превышает 1000 Мвт. Традиционная электроэнергетика делится на несколько направлений.

### Тепловая энергетика

В этой отрасли производство электроэнергии производится на тепловых электростанциях (ТЭС), использующих для этого химическую энергию органического топлива.

**Гидроэнергетика.** В этой отрасли электроэнергия производится на гидроэлектростанциях (ГЭС), использующих для этого энергию водного потока. ГЭС преобладает в ряде стран — в Норвегии и Бразилии вся выработка электроэнергии происходит на них. Список стран, в которых доля выработки ГЭС превышает 70%, включает несколько десятков.

**Ядерная энергетика.** Отрасль, в которой электроэнергия производится на атомных электростанциях (АЭС), использующих для этого энергию управляемой

цепной ядерной реакции деления, чаще всего урана и плутония.

**Альтернативная энергетика.** Большинство направлений альтернативной энергетике основаны на вполне традиционных принципах, но первичной энергией в них служат либо источники локального значения, например ветряные, геотермальные, либо источники находящиеся в стадии освоения, например топливные элементы или источники, которые могут найти применение в перспективе, например термоядерная энергетика. Характерными чертами альтернативной энергетике является её экологическая чистота, чрезвычайно большие затраты на капитальное строительство и малая единичная мощность

Альтернативные источники энергии

- Ветроэнергетика
- Солнечная энергетика
- Гидроэнергетика
- Геотермальная энергетика
- Биоэнергетика
- Грозовая энергетика
- Криоэнергетика
- Гравитационная энергетика
- Установки на топливных элементах
- Водородная энергетика
- Управляемый термоядерный синтез

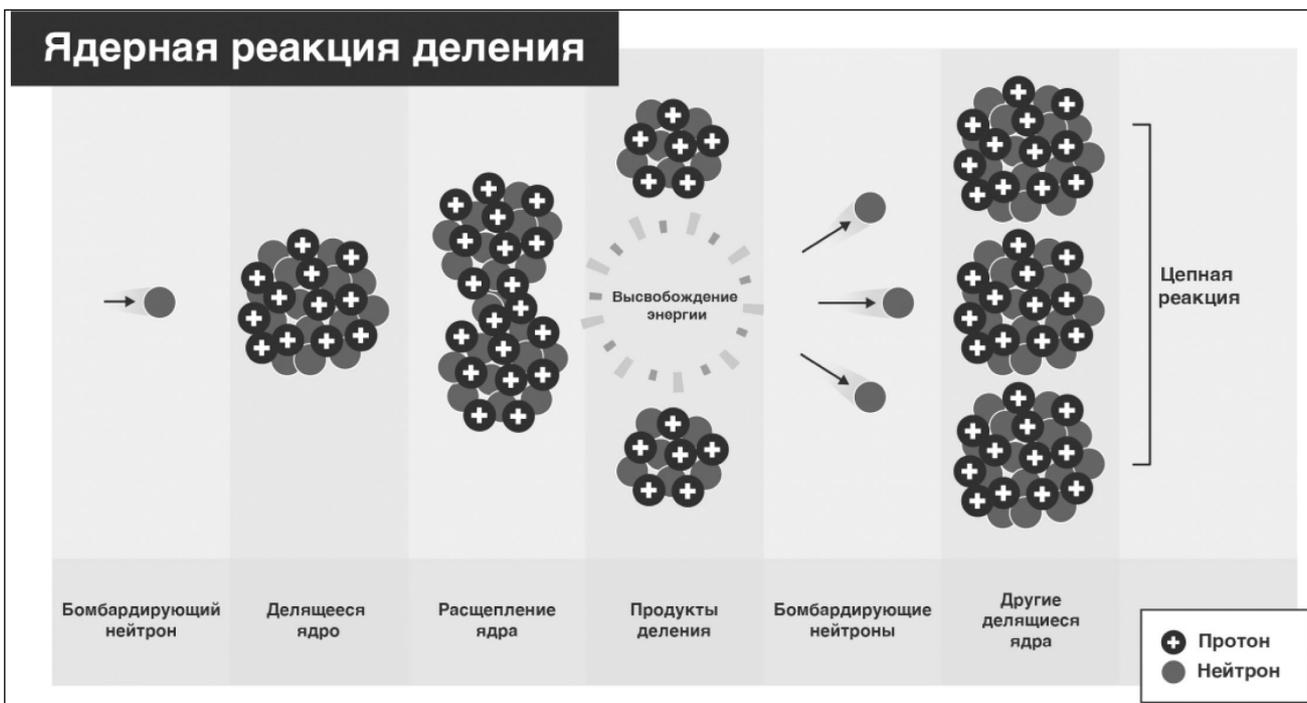
**Малая энергетика.** Так называют электростанции мощностью до 30 МВт с агрегатами единичной мощностью до 10 МВт. К ним можно отнести как экологичные виды энергетике, перечисленные выше, так и малые электростанции на органическом топливе, установки малой мощности на дизельном и газовом топливе.

## Ядерная энергетика

Ядерная энергия представляет собой разновидность энергии, которая высвобождается из ядра — центральной части атомов, состоящей из протонов и нейтронов. Источником этой энергии могут являться два физических процесса: деление, когда ядра атомов распадаются на несколько частей, и синтез, когда ядра сливаются вместе. Ядерная энергия, используемая сегодня во всем мире для производства электроэнергии, вырабатывается посредством деления ядра, в то время как технология производства электроэнергии на основе синтеза пока еще находится на этапе исследований и экспериментальных разработок.

### Что такое ядерное деление?

Ядерное деление — это реакция, в ходе которой ядро атома расщепляется на два или более меньших ядра, при этом происходит высвобождение энергии [1, 2]. Например, ядро атома урана-235, при попадании в него нейтрона, расщепляется на ядро бария и ядро криптона и еще два или три нейтрона. Эти дополнительные нейтроны соударяются с другими находящимися вокруг ядрами урана-235, которые также расщепляются и порождают дополнительные нейтроны с эффектом многократного увеличения, в результате чего за долю секунды формируется цепная реакция. Каждый раз такая реакция сопровождается высвобождением энергии в виде тепла и излучения. Подобно тому, как для получения электроэнергии используется тепло от ископае-



Ядерная реакция деления (графика: А. Варгас/МАГАТЭ)

мых видов топлива, таких как уголь, газ и нефть, на атомной электростанции эта тепловая энергия может быть преобразована в электроэнергию.

## Как работает атомная электростанция?

В реакторе атомной электростанции с помощью соответствующего оборудования локализуется и контролируется цепная ядерная реакция, чаще всего с использованием топлива на основе урана-235, в результате деления которого вырабатывается тепло. Это тепло используется для нагрева теплоносителя реактора, как правило, воды, чтобы получить пар. Затем пар направляется на турбины, заставляя их вращаться и активируя электрический генератор, что позволяет вырабатывать электроэнергию без выбросов углекислого газа.

### *Элементарная теория ядерного реактора.*

Реактором называется устройство, в котором поддерживается управляемая цепная реакция деления [3, 4]. По типу нейтронного спектра реактора в стационарном состоянии различают реакторы на тепловых, промежуточных и быстрых нейтронах.

Ядерно-физические и нейтронно-физические явления составляют основу процессов, происходящих в ядерных реакторах. Ядерные реакторы представляют собой сложную упорядоченную гетерогенную структуру, в которую включены: ядерное топливо, конструкционные материалы, теплоноситель, замедлитель, поглощающие элементы и управляющие элементы. Безопасная и эффективная работа реактора происходит при довольно сильных ограничениях на динамические параметры системы (давление и температура теплоносителя, колебания реактивности и нейтронного поля, состав и температура топлива и т. д.). В конструкции ядерного реактора предусмотрены подавления возникающих отклонений от равновесных условий, при которых происходит устойчивая и безопасная эксплуатация АЭС. Физика ядерных реакторов представляет собой очень обширную развивающуюся область науки. Рассмотрим основные элементы физики ядерных реакторов в упрощенном изложении.

### *Эффективный коэффициент размножения.*

Основным условием работы ядерного реактора является наличие хорошо делящихся ядер ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ), когда на один поглощенный ядерным топливом нейтрон высвобождается эффективное число  $\eta > 1$  новых нейтронов. Основной величиной, характеризующей развитие цепной ядерной реакции и баланс нейтронов в реакторе конечных размеров, является эффективный коэффициент размножения  $k_{эф}$ . Принята следующая классификация систем, содержащих делящиеся материалы: если  $k_{эф} < 1$ , то система находится в подкритическом состоянии, цепная реакция деления затухает, поток нейтронов и мощность реактора уменьшаются;

если  $k_{эф} = 1$ , то система находится в критическом состоянии, идет стационарная самоподдерживающаяся цепная реакция деления;

если  $k_{эф} > 1$ , то система находится в надкритическом состоянии, идет нарастание цепной реакции деления, поток нейтронов и мощность реактора увеличиваются [5–8].

**Ядерные отходы.** В процессе эксплуатации АЭС образуются отходы с различным уровнем радиоактивности. В зависимости от уровня радиоактивности и конечной цели применяются разные стратегии обращения с ними. На радиоактивные отходы приходится небольшая доля общего объема отходов. Здесь необходимо специальное обращение с радиоактивными отходами, чтобы обеспечить защиту людей и окружающей среды от излучения сегодня и в будущем. При работе следующего поколения АЭС на основе, так называемых, инновационных усовершенствованных реакторов будет образовываться гораздо меньше ядерных отходов, чем от сегодняшних реакторов. Ожидается, что строительство таких станций начнется ближе к 2030 году.

### *Ядерная энергетика и изменение климата.*

Ядерная энергия является низкоуглеродным источником энергии, поскольку, в отличие от электростанций, работающих на угле, нефтепродуктах или природном газе, атомные электростанции во время своей работы практически не производят  $\text{CO}_2$ . Атомные электростанции используются для генерации почти трети мировой безуглеродной электроэнергии и имеют решающее значение для достижения целей в области борьбы с изменением климата.

## Преимущество ядерной энергетики

Мировой уровень выделяемого углекислого газа составляет около 32 млрд тонн в год и продолжает расти. Прогнозируется, что к 2030 году объем выделяемого углекислого газа превысит 34 млрд тонн в год. Решением проблемы может стать активное развитие ядерной энергетики, одной из самых молодых и динамично развивающихся отраслей глобальной экономики. Все большее количество стран сегодня приходят к необходимости начала освоения мирного атома. Установленные мощности мировой атомной энергетики составляют 397 гигаватт. Если бы вся эта мощность генерировалась за счет угольных и газовых источников, то в атмосферу ежегодно выбрасывалось бы дополнительно около 2 млрд тонн углекислого газа. По оценкам межправительственной группы экспертов по изменению климата, все бореальные леса (таежные леса, расположенные в северном полушарии) ежегодно поглощают около 1 млрд тонн  $\text{CO}_2$ , а все леса планеты — 2,5 млрд тонн углекислоты. То есть, если за критерий взять влияние на уровень  $\text{CO}_2$  в атмосфере, атомная энергетика соизмерима с «экологической мощностью» всех лесов планеты.

## Роль ядерной энергетики в современном мире

В современном мире вопрос энергопотребления стоит очень остро. Невозобновляемость таких ресурсов,

как нефть, газ, уголь, заставляет задуматься об использовании альтернативных источников электроэнергии, таких как ветер, солнечное излучение, тепло земных недр. Однако не везде климатические и географические условия позволяют их использовать, да и технологии, необходимые для этого, еще не развиты. Поэтому атомная энергетика занимает лидирующие позиции и пока не собирается их сдавать [9–11].

По самым осторожным оценкам, к середине XXI века потребление энергии на планете удвоится. Это станет следствием развития мировой экономики, роста населения и других геополитических и экономических факторов. Так, электричество будет требоваться и для получения перспективного с точки зрения устойчивого развития топлива — водорода, и для обеспечения людей пресной водой.

Несмотря на недавние трагические события в Японии и последовавший за этим всплеск недоверия общественности к «мирному атому», ядерная энергетика продолжает оставаться одним из самых перспективных направлений. Спрос на электроэнергию, растущий вместе с развитием мировой экономики, требует строительства новых энергоблоков. Растет спрос и на основной ресурс ядерной энергетике — уран.

Потребление энергии в мире растет намного быстрее, чем ее производство, а промышленное использование новых перспективных технологий в энергетике по объективным причинам начнется не ранее 2030 года. Все острее встает проблема нехватки ископаемых энергоресурсов. Возможности строительства новых гидроэлектростанций тоже весьма ограничены. Не стоит забывать и о борьбе с парниковым эффектом, накладывающей ограничения на сжигание нефти, газа и угля на тепловых электростанциях.

Решением проблемы может стать активное развитие ядерной энергетике. На данный момент в мире обозначилась тенденция, получившая название «ядерный ренессанс». На эту тенденцию не смогла повлиять даже авария на атомной станции «Фукусима». Даже самые сдержанные прогнозы МАГАТЭ [12] говорят, что к 2030 году на планете может быть построено до 600 новых энергоблоков (сейчас их насчитывается более 436). На увеличении доли ядерной энергетике в мировом энергобалансе могут сказаться такие факторы, как надежность, приемлемый уровень затрат по сравнению с другими отраслями энергетике, сравнительно небольшой объем отходов, доступность ресурсов.

### Перспективы развития атомной промышленности в современном мире

В настоящее время уже не только физики-ядерщики поняли, что ядерная энергия — источник энергии, который открывает принципиально новые возможности и новые проблемы развития человечества. Более 60 лет назад в своем докладе Конгрессу США Энрико Ферми писал, что ядерная энергетика (nuclear

energy) — это новый источник, который, если использовать его правильно, на основе реакторов-бридеров на быстрых нейтронах (БР), то есть реакторов, которые производят топлива больше, чем сжигают (неслучайно французы называют их «Фениксами»), позволит создать практически чистый и неограниченный по масштабам развития источник энергии.

Между тем, профессионалы понимают и более глубокие причины инстинктивного протеста против развития ядерной энергетике: современная ядерная энергетика далека от совершенства. Она возникла после мировой войны как побочный продукт военной программы создания ядерного оружия. Однако сегодня эти проблемы встали в полный рост.

*Первая проблема.* Современные реакторы небезопасны, несмотря на многоуровневую инженерную систему предотвращения аварий. Серьезные аварии случаются редко, но их последствия приходится ликвидировать долго, и обходится это дорого. Необходимо создать внутренне безопасный реактор, в котором аварии будут запрещены законами физики, а не инженерными барьерами.

*Вторая проблема.* Современные ядерные реакторы, работающие на тепловых нейтронах, жгут  $^{235}\text{U}$ . В природном уране его содержится всего 0,72%, а общие запасы  $^{235}\text{U}$ , которые можно извлечь по приемлемой цене, не превышают ~50 тыс. тонн. Каждый атомный энергоблок электрической мощностью 1 ГВт тратит в год примерно одну тонну  $^{235}\text{U}$ . Всего в мире работает сейчас 447 энергетических реакторов, их общая мощность на конец 2017 года составляла 391 ГВт, и потребляют они ~400 тонн  $^{235}\text{U}$  в год. Если учесть атомные ледоколы, корабли, авианосцы, подводные лодки, то ежегодное потребление  $^{235}\text{U}$  вырастет до ~600 тонн, то есть его разведанных запасов хватит примерно на 100 лет [13, 14]. Надо создать реактор, в котором «горит»  $^{238}\text{U}$  — его запасов хватит на сотни тысяч лет.

*Третья проблема.* При работе реактора выгорает менее 10% загруженного ядерного топлива (сегодня ~6%), и, чтобы его использовать полностью, нужно многократно очищать ОЯТ от продуктов деления и изготавливать из него новое топливо — замкнуть топливный цикл. Такая технология пока не создана, и в ее ожидании в хранилищах ОЯТ накоплено ~300 тыс. тонн ОЯТ, ждущих переработки.

*Четвертая проблема.* При работе АЭС образуются продукты деления ~1 тонна в год для реактора электрической мощностью 1 ГВт. Среди них ~10 кг долгоживущих отходов, которые сохраняют свою радиоактивность сотни тысяч и миллионы лет, и оставлять их будущим поколениям люди пока не решились. За 60 лет атомной энергетике в мире накоплено таких отходов более 300 тонн, и что делать с ними — пока неясно.

*Пятая проблема.* Строительство ядерного реактора стоит дорого; пока мы живем в системе рыночной экономики, этот фактор имеет существенное значение.

Не исключено, что в будущем дефицит энергии скорректирует важность экономических критериев. К примеру, сегодня солнечная энергетика стремительно растет, несмотря на то, что она вчетверо дороже ядерной.

Все эти проблемы известны давно, и они уже привели к снижению вклада АЭС в электрические мощности планеты. Скептики предсказывают и дальнейшее снижение вклада АЭС — вплоть до их исчезновения в следующем столетии.

## Термоядерная энергетика

**Термоядерные реакции.** Суть управляемого термоядерного синтеза (УТС) заключается в контролируемом нагревании плазмы достаточно высокой плотности до температуры порядка  $10^8$ – $10^9$  К и удержании ее в течение времени, необходимого для генерации заданной мощности. При таких высоких температурах атомы легких ядер ионизированы и эта электрически нейтральная среда состоит из положительных ионов и отрицательных электронов.

Как источник энергии процесс слияния легких ядер имеет некоторые преимущества по сравнению с делением ядер: (1) имеются большие запасы легких ядер на Земле и (2) продукты слияния в большинстве случаев являются стабильными ядрами и не представляют радиационной опасности по сравнению с продуктами деления [15]. Однако использование реакции слияния сталкивается с очень серьезной трудностью: чтобы слияние ядер произошло с большой вероятностью, необходимо преодолеть отталкивающий кулоновский барьер, который равен  $E_{\text{кул}} \approx 0,15 \cdot Z_1 Z_2$  МэВ.

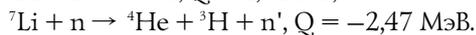
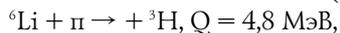
Поэтому проблема получения энергии в промышленных масштабах, используя реакции синтеза ядер легких элементов, получила название термоядерной проблемы.

Получение энергии синтеза в макроскопических количествах удалось пока только в водородной бомбе, где реакция синтеза осуществляется с огромной неконтролируемой скоростью. Для использования реакций синтеза ядер в мирных целях необходимо осуществить управляемый процесс. Эта проблема называется проблемой управляемого термоядерного синтеза (УТС). Она усиленно разрабатывается с начала 50-х годов XX в. Осуществление УТС обещает решение проблемы производства доступной энергии на многие тысячелетия. Наиболее привлекательной для термоядерного синтеза представляется дейтерий — тритиевая или  $d-t$  реакция с большим энерговыделением:  ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$ ,  $Q = 17,59$  МэВ.

Дейтерий — стабильный изотоп водорода. В воде концентрация молекул тяжелой воды составляет 0,015%, т. е. в 18 г воды содержится около  $9 \cdot 10^{18}$  атомов дейтерия. При синтезе 1 кг дейтерия выделяется энергия около  $0,9 \cdot 10^{14}$  Дж, а при сгорании 1 кг каменного угля —  $2,5 \cdot 10^7$  Дж (не учитывая кислорода). Масса воды в океанах составляет примерно  $1,45 \cdot 10^{24}$  кг.

По содержанию энергии это неисчерпаемый источник энергии, если будет разработана приемлемая технология термоядерного синтеза.

Тритий — радиоактивный изотоп водорода с периодом полураспада  $T_{1/2} = 12,3$  года. Тритий образуется в небольших количествах в атмосфере под действием космических лучей (1000–2000 атомов в 1 с на  $1 \text{ м}^2$  поверхности Земли). Тритий соединяется с кислородом, образуя сверхтяжелую воду, которая не накапливается вследствие распада  ${}^3\text{H}$ . В природной воде содержится всего 1 атом трития на  $10^{18}$  атомов водорода, поэтому для использования в термоядерных установках необходимо его производить. Тритий можно производить вblankете термоядерного реактора, использующего  $d-t$  реакцию, путем захвата образующихся нейтронов стабильными изотопами лития  ${}^6\text{Li}$  (7,6%) и  ${}^7\text{Li}$  (92,4%):



Запасы дейтерия и лития на Земле настолько велики, что их должно хватить на сотни тысяч лет.

Для термоядерного реактора с плазмой низкой плотности ( $n \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) согласно критерию Лоусона необходимо достаточно большое время удержания плазмы,  $\tau > 1$  с. Это является основной трудностью на пути к практическому использованию термоядерной энергии. Температура плазмы очень высокая, поэтому любое соприкосновение со стенкой камеры охлаждает плазму и испаряет стенку. Для удержания плазмы и предотвращения ее от соприкосновения со стенками камеры используются магнитные поля различной конфигурации и напряженности, которые принято называть магнитными ловушками. Из различных магнитных ловушек в настоящее время наиболее перспективной считается ловушка, называемая токамак (тороидальная камера, магнитная катушка). Название *tokamak* стало международным термином. Эта ловушка была предложена в СССР Л. Арцимовичем и М. Леонтовичем, и сейчас она применяется во всех странах, ведущих исследования по термоядерному синтезу.

## Международный проект ИТЭР (вместо заключения)

В результате многолетних исследований на установках последнего поколения токамаков осуществлена импульсная управляемая термоядерная реакция относительно малой мощности. Осуществлена научная демонстрация управляемой термоядерной реакции в лабораторных условиях. Следующим этапом разработки этой проблемы должна стать демонстрация управляемой реакции синтеза с термоядерной мощностью несколько сотен мегаватт и отработкой технологии ее практического использования. Для реализации этого шага Россия, Европа, США и Япония в 80-х годах XX в. решили объединить свои научные, технические и финансовые усилия для совместной разработки технического проекта первого в мире экспериментального термоядерного реактора,

получившего название ИТЭР (ITER — International Thermonuclear Experimental Reactor).

Сооружение установки начато в 2007 г. в ядерном научном центре Кадараш (Франция) и будет продолжаться несколько десятков лет. В рамках этого проекта предполагается создать испытать бланкет для производства трития. Это будет самый крупный токамак с большим радиусом плазмы — 6,2 м. Тороидальное магнитное поле (5,3 Тл) создается сверхпроводящими магнитами. В случае успеха проекта ИТЭР предполагается примерно к 2030 г. создать демонстрационный промышленный термоядерный реактор, а к 2050 г. создать коммерческую электростанцию с термоядерным реактором. Энергия синтеза рассматривается многими исследователями в качестве «естественного» источника энергии в долгосрочной перспективе.

В 2015 году был предложен проект гибридного реактора, включающий в себя ядерный реактор на быстрых нейтронах и токамак.

Подобный подход даёт огромные преимущества для ядерной энергетики. Так, например, гибридный ядерный реактор на порядки безопаснее традиционной АЭС, а сценарии ядерных и даже локальных ава-

рий невозможны из-за конструктивных особенностей реактора и физики процессов, протекающих в нём. Нейтроны высоких энергий очень эффективно выжигают ядерные отходы, наработанные в АЭС.

Так появилась концепция безвредной для экологии утилизации отработанного ядерного топлива до состояния естественной радиоактивности земной породы. При замыкании ядерного топливного цикла утилизация ОЯТ подобным образом может занять от 100 до 500 лет. В Гибридных реакторах этот процесс будет идти, как минимум, в 10 раз быстрее. Учитывая количество уже накопленного в России изотопа урана-238, запасов уже добытого урана даже с учётом полного перехода на выработку энергии (тепловой и электрической) гибридными реакторами нам хватит на тысячу лет. При использовании тория-232 в гибридном реакторе нейтронное облучение трансмутирует его в уран-233. Использование урана-233 в качестве топлива на АЭС не даёт таких долгоживущих радиоактивных отходов с периодами полураспада в сотни тысяч лет, как при использовании урана-235. Россия, реализовав концепцию Гибридных реакторов, закроет для себя энергетический вопрос на века.

#### Литература

1. Рубчя В. А. Нейтронная физика и ядерная энергетика, Изд. Санкт-Петербургского госуниверситета, 2013.
2. Абрамов А. И. и др. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Белл Д. Ю., Глестон С. Теория ядерных реакторов. М., 1974.
4. Камерон И. Ядерные реакторы. М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Климов А. Ц. Ядерная физика и ядерные реакторы. М.: Энергоатомиздат, 1971.
6. Петржак К. А., Флёрв Г. Н. Спонтанное деление урана // ЖЭТФ. 1940; 3: 275.
7. Рудик А. П. Физические основы ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1979.
8. Bohr N., Wheeler J. A. The mechanism of Nuclear fission. Phys. Rev. 1939; 56: 426.
9. Пономарев-Степной Н. Н. Роль атомной энергетики в структуре мирового энергетического производства XXI века. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы», 2006; 8.
10. ОАО «Атомэнергопром» (<http://www.atomenergoprom.ru/ru/nuclear/>).
11. ОАО «Концерн Энергоатом» (<http://www.rosenergoatom.ru/rus/press/faq/index.wbp?page=3>).12|1.
12. Сайт МАГАТЭ (<http://www.iaea.or.at/programmes/a2/>).
13. МеталТорг (<http://metaltorg.ru/analytics/publication/?id=2643>).
14. Металлургический бюллетень ([http://www.metalbulletin.ru/analytics\\_articles.php?id=2859](http://www.metalbulletin.ru/analytics_articles.php?id=2859)).
15. ЭНЕРГЕТИКА XXI ВЕКА. Информационный бюллетень: Институт инновационной энергетики Российский научный центр «Курчатовский институт», 2008; 1.