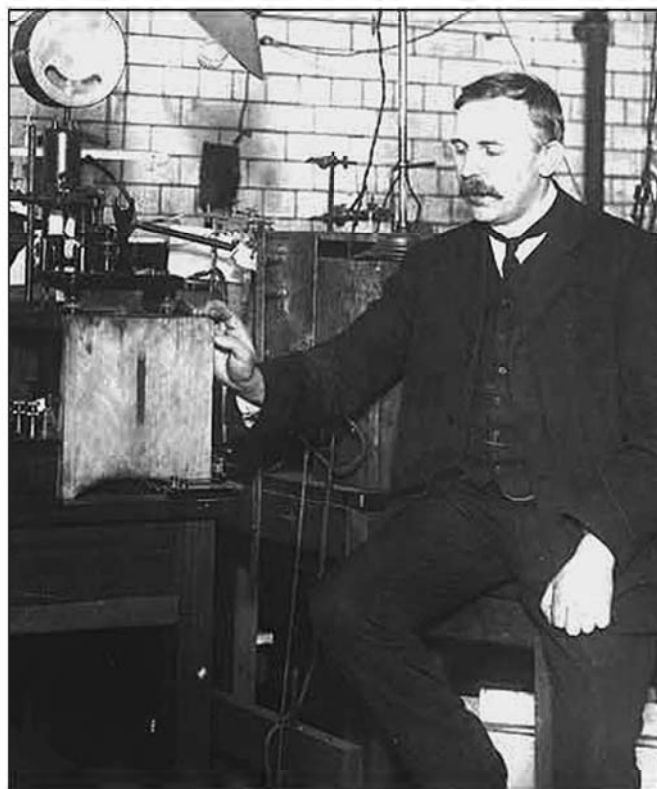


ОТКРЫТИЕ, ИЗМЕНИВШЕЕ ХОД ИСТОРИИ



Эрнест Резерфорд (1871—1937).

Сто лет назад, 7 марта 1911 г., на заседании Манчестерского философского общества Эрнест Резерфорд сделал доклад «Рассеяние α - и β -лучей и строение атома». Он сообщил слушателям, что атом устроен подобно Солнечной системе — в центре его расположено ядро, размеры которого ($\sim 10^{-13}$ см) в 100 тыс. раз меньше атома. Тогда уже понимали, что в ядре сокрыта огромная энергия, но только через тридцать лет ее сумели освободить.

Сам Резерфорд не дожид до этого дня и до конца жизни утверждал: «Каждый, кто ожидает получить энергию от трансмутации атомов, толкует о лунном свете». Эйнштейн был с ним солидарен: «Нет ни малейшего намека на то, что ядерная энергия станет когда-то доступной», — говорил он в 1932 г., всего за семь лет до открытия деления урана.

Так думали не все: Владимир Иванович Вернадский еще в 1910 г., за год до открытия ядра, внушал академическому собранию: «Теперь перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие те источники сил, какие рисовались человеческому воображению». В 1922 г. он возвращается к этой мысли: «Мы подходим к великому перелому в жизни человечества, с которым не могут сравниться все им ранее пережитые. Недалеко то время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который даст ему возможность строить свою жизнь, как он захочет» [1]. А Фредерик Содди, открывший вместе с Резерфордом законы радиоактивного распада, со всей определенностью утверждал эти же мысли уже в 1904 г., объясняя в своих лекциях и книгах, что «искусственная трансмутация элементов навсегда освободит человечество от проблемы энергии».

Ядерная энергия и человек

В.В.Орлов, Л.И.Пономарев

Проблема энергии в мире — ключевая, от ее решения во все времена зависела жизнь человека, и до сих пор добыча энергии занимает существенную часть производственных затрат общества (в России ~30% [2]). В древние века она сводилась к добыче пищи и тепла; приручение огня стало решающей ступенью на пути развития человечества. Ежедневная потребность человека в пище эквивалентна энергии ~2.5 тыс. килокалорий (~10⁷ Дж) [3]*, а мощность его жизнедеятельности равна примерно 120 Вт, т.е. сравнима с мощностью яркой электролампочки или горящей спички. Приручение домашних животных и использование энергии ветра и рек увеличило эту мощность в несколько раз, и к началу промышленной революции потребление энергии возросло до ~500 Вт. Затем человек изобрел тепловые машины (1784), пароход (1807) и паровоз (1825), к концу XIX в. — электрические машины, а в середине XX в. освободил энергию ядра.

По значимости для будущего человечества овладение ядерной энергией можно сравнить только с приручением огня его дикими прародителями. Переход от химической энергии горения углерода к энергии деления ядра урана и энергии синтеза ядер изотопов водорода начался совсем недавно, еще живы немногие свидетели этих судьбоносных событий. Но, может быть, имен-

* Различные единицы энергии связаны соотношениями: 1 Дж = 0.239 кал = 0.102 кгм = 10⁷ эрг = 0.625 · 10¹⁵ эВ.

© Орлов В.В., Пономарев Л.И., 2011



Виктор Владимирович Орлов, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник РНЦ «Курчатовский институт», научный руководитель разработки реактора БРЕСТ (Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники). Область научных интересов — физика и техника реакторов, ядерная энергетика. Лауреат Ленинской и Государственной премий СССР, заслуженный деятель науки РФ.



Леонид Иванович Пономарев, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, начальник лаборатории теоретических исследований РНЦ «Курчатовский институт». Специалист в области атомной, мезоатомной и ядерной физики. Лауреат премии РАН им.И.В.Курчатова.

но поэтому человеческое сообщество до сих пор не осознало вполне их значение. Более того, величие этой победы породило иллюзию, будто задача уже полностью решена: она перестала быть научной проблемой и превратилась в инженерную дисциплину.

Многоликая энергия

Подавляющее число людей не понимают главного: в отличие от материалов, которые могут служить многократно, **энергию можно использовать только один раз, и практически вся она сконцентрирована в ядрах атомов.** Энергия — понятие древнее: оно встречается уже у Аристотеля (ἐνέργεια), где означает некое деятельное начало. С возникновением науки стали различать потенциальную и кинетическую энергию, тепловую энергию, энергию химических реакций и т.д. и, наконец, *работу*, которую можно выполнить, используя различные виды энергии. Трудями Роберта Майера (1842) и Германа Гельмгольца (1847) был установлен закон сохранения энергии (первый закон термодинамики, по словам Майкла Фарадея, «высший из всех, доступных человеческому пониманию»): *энергия не возникает и не уничтожается, она только переходит из одной формы в другую.*

В 1847 г. Джеймс Джоуль установил механический эквивалент теплоты: 1 ккал = 427 кгм, и встал вопрос о законах превращения тепла в работу. В действительности он возник еще раньше, когда тепло представляли себе как некую невесомую жидкость — теплород, а распространение тепла — как перетекание этой жидкости от горячего тела к холодному.

В 1824 г. молодой офицер инженерных войск Сади Никола Карно написал сочинение «О движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», в котором установил, что с помощью тепловых машин в работу можно превратить не все тепло, а только его часть $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$, где T_1 и T_2 — абсолютная начальная и конечная температура тепловой машины. Важно отметить, что обычно использование энергии проходит через стадию тепла, а следовательно, подчиняется принципу Карно. При этом только часть тепла можно обратить в работу, а другая его часть безвозвратно теряется (переходит в низкопотенциальное тепло, которое в работу обратить нельзя); мера этих потерь называется *энтропией*. Энтропия замкнутой системы непрерывно растет, пока в ней совершается работа, и этот факт составляет содержание второго закона термодинамики.

Сегодня общая мощность энергетики мира составляет $\approx 1.6 \cdot 10^{13}$ Вт [4], т.е. в среднем ~ 2 кВт на человека, а в индустриально развитых странах даже 6–12 кВт/чел. Рост производства энергии (1.5%/год) опережает рост населения (1.17%/год) [5] (в основном за счет развивающихся стран), и становятся актуальными вопросы: насколько этот рост обеспечен природными ресурсами топлива, существуют ли пределы роста генерации энергии и насколько они обоснованы.

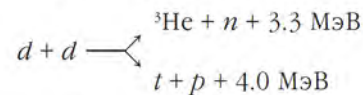
Основной ресурс энергии на Земле — излучение Солнца: его общая мощность, достигающая по-

верхности Земли, равна $0.8 \cdot 10^{17}$ Вт, т.е. примерно в 5 тыс. раз превышает мощность всей энергетики мира, а его средняя мощность равна ~ 160 Вт/м². Из этой мощности только $\sim 0.3\%$ ($\sim 2 \cdot 10^{14}$ Вт) усваивается растениями в процессе фотосинтеза, а остальная часть расходуется на ветры, облака, течения — все, что мы называем климатом и погодой.

В древности основным источником энергии служили дрова, т.е. продукция фотосинтеза, образующаяся под действием солнечных лучей. В эпоху промышленной революции (XVIII в.) стали использовать уголь, в 1856 г. пробурили первую нефтяную скважину, а в XX в. начали интенсивно жечь природный газ. Во всех случаях при этом используется химическая энергия горения углерода, которая на протяжении веков согревала человека: $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 4.2$ эВ.

Энергию деления ядер урана: $U \rightarrow$ осколки + 200 МэВ — человек начал использовать только в середине XX в. В каждом акте деления выделяется энергия в 50 млн раз большая, чем при сгорании одного атома углерода, поэтому потенциальные запасы энергии в Земле много больше, чем думали 100 лет назад.

Энергию синтеза ядер человек еще не освоил, но уже научился освобождать — пока только в виде взрыва термоядерной бомбы, в которой инициируется реакция $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6$ МэВ. Именно эта, а также реакции



являются потенциальным источником ядерной энергии синтеза.

Из табл.1 видно, что известные сегодня потенциальные запасы ядерного топлива на много порядков превышают запасы топлива органического

Таблица 1
Ресурсы энергии на Земле*

Реакция	Ключевой элемент	Среднее содержание в литосфере, г/г	Среднее содержание в океане, г/г	Удельная энергия, Дж/г	Общее содержание в Земле, Дж	Коммерческие ресурсы, Дж	Ресурс, лет
$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 4.2$ эВ	C	—	—	$\sim 3 \cdot 10^4$	Нефть + газ, уголь	$\sim 2 \cdot 10^{22}$ $\sim 2 \cdot 10^{23}$	~ 50 ~ 500
$n + (U, Th) \rightarrow$ \rightarrow осколки + 200 МэВ	U Th	$4 \cdot 10^{-6}$ 10^{-5}	$1.5 \cdot 10^{-9}$ $< 5 \cdot 10^{-10}$	$0.83 \cdot 10^{11}$ $0.83 \cdot 10^{11}$	$\sim 3 \cdot 10^{28}$ $\sim 8 \cdot 10^{28}$	$\sim 10^{24}$ $\sim 3 \cdot 10^{24}$	~ 2000 ~ 6000
$d + d \rightarrow \begin{cases} {}^3\text{He} + n + 3.3 \text{ МэВ} \\ t + p + 4.0 \text{ МэВ} \end{cases}$	D	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	$0.9 \cdot 10^{11}$	$\sim 2 \cdot 10^{30}$?	?
$d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6$ МэВ	${}^6\text{Li}$	$3.7 \cdot 10^{-6}$	10^{-7}	$2.9 \cdot 10^{11}$	$\sim 10^{29}$?	?
$d + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + 18.3$ МэВ	${}^3\text{He}$	$7.3 \cdot 10^{-19}$	—	$4.9 \cdot 10^{11}$	$\sim 10^{15}$?	?

* Таблица составлена по данным справочника [6] и отчета [7]. При вычислениях принято, что масса Мирового океана равна $\sim 10^{21}$ кг, а масса сухопутной литосферы на глубину 300 м равна $\sim 10^{20}$ кг. В ресурсе ядерной энергетики учтены только богатые руды с содержанием урана $\geq 0.1\%$. В ресурсе не включены запасы урана в океане ($\sim 10^{26}$ Дж) и бедных рудах, стоимость извлечения которого сегодня превышает экономически приемлемую.

виды энергии

тепловая
химическая ($C + O_2 \rightarrow CO_2 + 4.2 \text{ эВ}$)
ядерная ($U \rightarrow \text{осколки} + 200 \text{ МэВ}$)

источники энергии сегодня

биомасса
гидро, ветер
уголь
нефть
газ
ядра — деление
ядра — синтез
Солнце

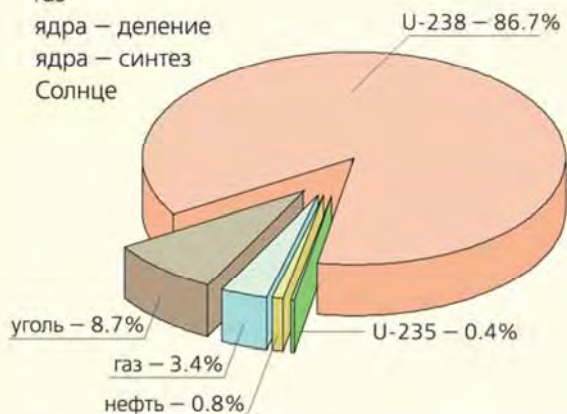


Рис.1. Современные рентабельные запасы топлива.

(рис.1). Как надолго их хватит? Согласно прогнозам, к середине XXI в. население Земли (рис.2) увеличится до 9 млрд человек [5], а мощность производимой энергии удвоится — до $3 \cdot 10^{13}$ Вт, т.е. $\sim 10^{21}$ Дж/год, или ~ 3 кВт/чел. [8]. Чтобы обеспечить такую энергетику дровами, необходимо сжигать $\sim 20\%$ ежегодной продукции фотосинтеза. Нефть и газ также не могут решить эту задачу, поскольку при прогнозируемой мощности будущей энергетики, по оценкам, их ресурса хватит не больше, чем на 50–100 лет. Угля хватит лет на 300–500, однако

экологический ущерб от его сжигания оценивается сегодня как неприемлемый. После этого останется только ядерная энергия, а также энергия солнечного излучения — тоже ядерная: Солнце светит за счет реакции слияния четырех протонов в ядро гелия ($4p \rightarrow {}^4\text{He} + 26.73 \text{ МэВ}$).

Существует также проблема «теплового загрязнения», а именно — предел роста производства энергии без нарушения равновесия биосферы Земли. Если численность населения нашей планеты стабилизируется на уровне ~ 12 млрд человек и все они захотят жить на уровне современных развитых стран, т.е. потреблять энергию ~ 10 кВт/чел, общая мощность энергетики вырастет до $\sim 10^{14}$ Вт = 10^5 ГВт. Эта энергия вдвое больше, чем прогноз на конец XXI в. и составляет $\sim 0.1\%$ от мощности солнечной энергии, приходящей на Землю. Такой рост энергии приведет к приросту средней температуры Земли примерно на 0.1°C , т.е. даже максимальный сценарий роста энергетики не должен разрушить тепловой баланс биосферы Земли (но уже близок к допустимому пределу).

Средняя мощность излучения Солнца у поверхности Земли с учетом ночных часов и облачных дней не превышает ~ 50 Вт/м², а если учесть эффективность ($\sim 20\%$) современных преобразователей излучения в электричество [9], она снижается до ~ 10 Вт/м². Чтобы обеспечить бытовые потребности (~ 1 кВт/чел), достаточно покрыть фотоэлементами крышу дома площадью 100 м², что вполне реально и уже сейчас делается в южных странах. Таким способом можно удовлетворить все бытовые нужды (хотя и очень дорого), но это не решает проблем промышленности, транспорта и любого крупного производства, которое требует значительно большей концентрации энергии. В отдаленном будущем, когда будут исчерпаны все земные запасы топлива, излучение Солнца останется единственным источником энергии, и, если к этому моменту человечество еще будет существовать, оно обязано найти способ его эффектив-

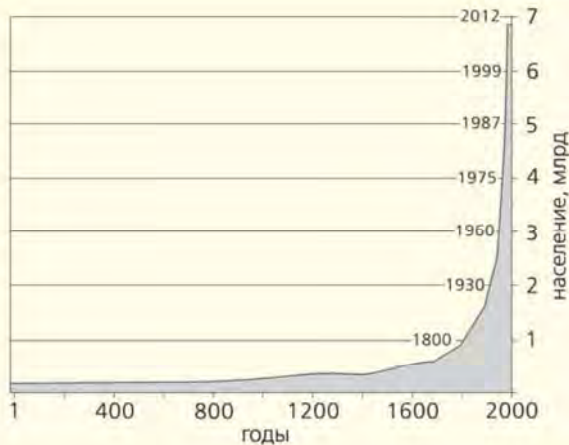


Рис.2. Рост численности населения Земли с начала нашей эры (слева) и прогноз его дальнейшего увеличения (справа).

ного использования. Топливный ресурс ядерной энергетики, с учетом запасов урана в океане и земной коре, — миллионы лет, так что у человечества достаточно времени для перехода в эпоху солнечной энергетики, которая свободна от проблемы «теплового загрязнения».

Ядерный ресурс

Открытие деления ядра урана произошло в декабре 1938 г., уже через четыре года, в декабре 1942 г., была осуществлена цепная ядерная реакция, а в августе 1944 г. были построены первые промышленные реакторы. Единственной целью этих работ было создание атомной бомбы, и первые из них были взорваны в июле и августе 1945 г. Ужасный эксперимент наглядно продемонстрировал, что в ядрах урана сосредоточена огромная энергия, которую при определенных условиях можно освободить и использовать.

Начало мирного использования энергии ядра датируется 27 июня 1954 г., когда в Обнинске под Москвой атомная электростанция (АЭС) на тепловых нейтронах мощностью 30 МВт (тепл) (5 МВт (эл.)) впервые дала ток в городскую сеть. В США ведут отсчет от пуска первого экспериментального реактора на быстрых нейтронах EBR-1 мощностью 1.2 МВт (тепл), Айдахо, 1951 г. Первые промышленные АЭС с быстрыми реакторами были разработаны под руководством А.И.Лейпунского в 60-х годах прошлого века. Но они оказались намного дороже АЭС с тепловыми реакторами, и развитие атомной энергетики пошло по пути совершенствования реакторов на тепловых нейтронах, т.е. на основе опыта, полученного при создании атомного оружия и атомных подводных лодок. Последствия этого решения стали ясны много позже, и мы к ним еще вернемся.

В настоящее время во всем мире работает 438 ядерных реакторов (рис.3, 4) общей мощностью



Рис.3. Доля атомной энергии в выработке электричества в разных странах по данным МАГАТЭ 2007 г.

372 ГВт, которые производят ~6% энергии и ~14% электричества [8]. При этом для работы АЭС с электрической мощностью 1 ГВт в течение года надо всего ~200 т природного урана, в то время как для работы тепловой станции равной мощности нужно ~2 млн т угля (эшелон угля в день). А радиоактивность золы и дымовых шлейфов ТЭС в несколько раз превышает радиоактивный фон АЭС.

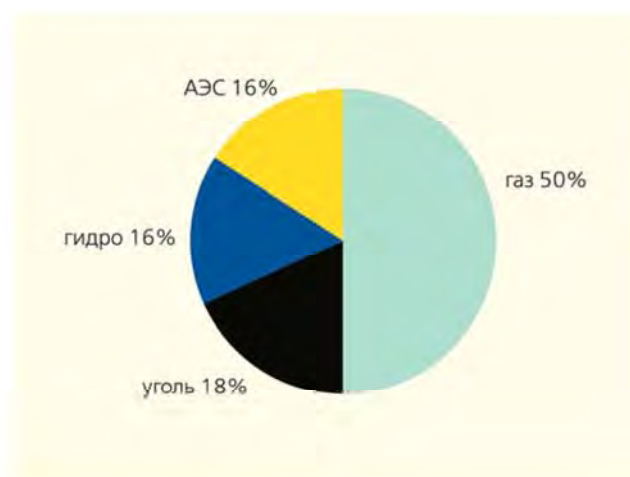


Рис.4. Доля атомной энергии в выработке электричества в мире (слева) и в России (данные 2008 г.).



Рис.5. Вероятность смерти человека при различных факторах риска. На 1 ГВт (эл.) в топливном цикле угольных станций гибнет около 300 человек, а в цикле АЭС — в 500 раз меньше.

У АЭС с точки зрения экологии есть несомненные преимущества (рис.5, 6): при работе в штатном режиме добавочная вероятность смерти вблизи АЭС в 100 раз меньше, чем вблизи ТЭС, что сравнимо с вероятностью погибнуть от удара молнии и в 10 тыс. раз меньше вероятности гибели в автомобильной катастрофе [10]. Конечно, на АЭС возможны аварии, и самая ужасная из них случилась в Чернобыле в 1986 г.: в ней погибло около 50 непосредственных ликвидаторов аварии и девять детей, по прогнозам, от ее последствий можно ожидать еще ~4 тыс. смертей, из зараженных районов переселено ~600 тыс. жителей, а общий ущерб от аварии оценивается в сотни млрд долл. [11]. Но масштаб этой трагедии только отчасти связан с ядерной спецификой: такова общая особенность аварий на всех крупных промышленных объектах с большой концентрацией энергии, примерами которых могут служить недавняя авария на Саяно-Шушенской ГЭС (погибли 76 человек) или авария 1984 г. на химическом заводе в Бхопале (Индия), которая унесла одновременно ~5 тыс. жизней и еще ~150 тыс. человек — впоследствии. Все это — плата за энергию и комфорт, который она с собой приносит, и отказаться от этого трудно, точно так же, как и от автомобилей, хотя только в России на дорогах ежегодно гибнет ~30 тыс. человек, а во всем мире — свыше миллиона.

Главная причина возражений против атомной энергетики состоит в том, что в современном виде она неэкономична, небезопасна и не имеет устойчивого будущего. По многим причинам, первая из которых — ограниченность ресурсов ядерного топлива. В табл.1 приведены общие ресурсы энергии, запасенные в ядрах урана и тория. Но современная ядерная энергетика использует не весь уран, а только его изотоп ^{235}U , содержание которого в природном уране всего 0.72%, т.е. для нее топливный ресурс в 200 раз меньше и составляет всего ~50 лет. Грамотные противники атомной энергии все это знают, а неграмотные чувствуют, и в этом корень эмоциональных протестов «зеле-



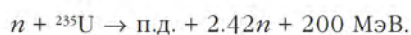
Рис.6. Тепловая (слева) и атомная станции (справа).

ных» (в сочетании с безотчетной радиофобией) против необходимого и неизбежного блага энергии ядра.

Истоки нынешнего кризиса атомной энергетики следует искать в истории и обстоятельствах ее возникновения. Она появилась как побочный продукт программы создания атомного оружия, да к тому же в условиях войны, когда не время было думать о радиоактивных отходах, ресурсах и безопасности сверх абсолютно необходимой. Теперь же пришло время создавать новую ядерную энергетику с перспективой в тысячи и миллионы лет, где все эти требования должны быть учтены с самого начала. Чтобы понять пути этого обновления, надо несколько глубже взглянуть на суть физических процессов, происходящих в ядерном реакторе и во всем его топливном цикле.

Арифметика ядерного реактора

Ядро урана может делиться самопроизвольно, но такое спонтанное деление происходит очень редко: из $2.56 \cdot 10^{24}$ ядер, которые содержатся в 1 кг урана, за 1 с спонтанно делится только 10. Однако при облучении нейтронами ядра урана делятся с большой вероятностью, если для этого обеспечить необходимые критические условия, которые, в частности, зависят от конструкции реактора, состава топлива и энергии нейтронов. Природный уран состоит из смеси изотопов ^{238}U (99.280%), ^{235}U (0.715%) и ^{234}U (0.005%), причем ^{235}U делится нейтронами всех энергий (преимущественно медленными (тепловыми) нейтронами с энергией 0.025–1 эВ), а ^{238}U — только быстрыми (с энергией нейтронов выше 1 МэВ). При делении ядер урана образуются продукты деления (п.д.): ~300 изотопов 35 элементов из середины таблицы Д.И.Менделеева, большинство из которых быстро распадаются (уже через несколько дней после выгрузки отработавшего топлива из реактора остается только ~50 значимых изотопов). При каждом делении ядра ^{235}U освобождается два или три нейтрона (в среднем $\nu = 2.42$) со средней энергией ~2 МэВ:



Эти вторичные нейтроны могут вызвать последующие деления и породить уже $2.42 \cdot 2.42 = 4.86$ нейтронов, следующее поколение даст $(2.42)^3 = 11.76$ нейтронов, и т.д., т.е. становится возможной *цепная реакция* деления. В естественной смеси изотопов ^{238}U в 139 раз больше, чем ^{235}U , поэтому в такой смеси цепная реакция невозможна: родившиеся нейтроны поглощаются ядрами ^{238}U , не успев замедлиться. Такая реакция возможна, однако, в реакторе со специальной конструкцией, когда небольшие блоки урана погружены в замедлитель нейтронов (в графит или тяжелую воду), где нейтроны замедляются от энергии ~ 1 МэВ до

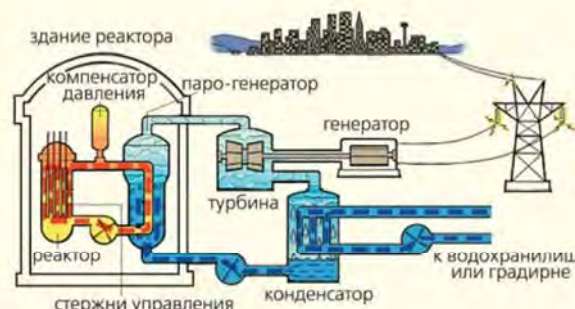
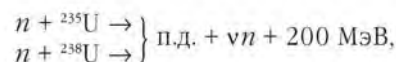


Рис.7. Схема производства электричества на АЭС.

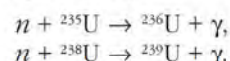
энергии менее 1 эВ и вероятность захвата ядром ^{235}U больше, чем ^{238}U , примерно в 200 раз. Именно так была осуществлена первая цепная ядерная реакция на природном уране при температуре $T = 300 \text{ K}$ ($E = 0.04 \text{ эВ}$) реактора, где нейтроны замедляются до теплового равновесия.

В большинстве современных АЭС ядерное топливо обогащают до ~4% ^{235}U , а в качестве замедлителя используют обычную воду. Та же вода используется для отвода тепла, выделившегося при делении ядер, а также для выработки электроэнергии с помощью паровых турбин — электрогенераторов (рис.7). Можно обойтись и без обогащения, если в качестве замедлителя использовать «тяжелую воду» D_2O , т.е. воду, в которой протоны заменены ядрами дейтерия (в Канаде именно такие реакторы приняты за базовые). Коэффициент конверсии тепла в электричество на современных АЭС достигает величины $\eta \approx 0.35$, но в среднем тепловая мощность АЭС с электрической мощностью 1 ГВт (эл.) соответствует ~3 ГВт (тепл.).

В смеси изотопов урана нейтроны не только вызывают реакции деления,

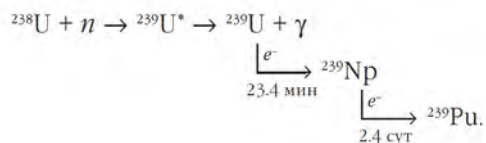


но также испытывают радиационный захват ($n\gamma$ -реакция):



Сечения (вероятности) $\sigma_{n\gamma}(E)$ этих реакций зависят от энергии нейтронов E и сравнимы с сечениями $\sigma_f(E)$ реакций деления, а от их отношения $\alpha = \sigma_{n\gamma}(E)/\sigma_f(E)$ сильно зависят нейтронный баланс реактора и сама возможность цепной реакции. В типичном промышленном реакторе ВВЭР-1000 (водо-водяной реактор с электрической мощностью 1 ГВт (эл.), зарубежный аналог — PWR) топливо представляет собой смесь ~4.3% ^{235}U + 95.7% ^{238}U , для которой доля делений равна ~0.4, т.е. в ~40% случаев ядро ^{235}U делится, а в остальных случаях происходит радиационный захват нейтронов ядрами ^{238}U и ^{235}U . Именно эта $n\gamma$ -реакция обеспечи-

вает наработку оружейного плутония (^{239}Pu) в цепочке реакций:



В серийный реактор ВВЭР-1000 загружают 70 т урана, в котором 3.1 т ^{235}U , и каждый год 1/3 отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), т.е. 23 т, заменяют на свежее. Таким образом, «кампания топлива» длится три года, и за это время «сгорает» 2 т (~65%) загруженного ^{235}U , а несгоревший ^{235}U (1.1 т) остается в ОЯТ (11.6 кг/т). При каждом делении выделяется 200 МэВ = $3.2 \cdot 10^{11}$ Дж, и, чтобы обеспечить мощность 1 ГВт (эл.), в реакторе каждую секунду должно происходить 10^{20} делений ядер, т.е. 0.039 г/с, или 1240 кг/год. Поскольку реактор эффективно работает только ~80% времени, нужно обеспечить деление массы ядер ~1 т. При этом делится 700 кг ^{235}U , а остальные ~300 кг восполняются за счет деления ядер ^{238}U (30 кг) и ^{239}Pu (270 кг), который нарабатывается из ^{238}U в процессе работы реактора.

Кроме несгоревшего ^{235}U (11.6 кг/т) ОЯТ содержит наработанный в реакторе ^{239}Pu (5.6 кг/т ОЯТ или 130 кг/год), который, подобно ^{235}U , также эффективно делится и может быть использован в дальнейшем как ядерное топливо (и взрывчатка: первая атомная бомба была начинена ^{239}Pu).

Нейтронный баланс реактора зависит от значений ν и α для ^{235}U и ^{239}Pu , а также от вклада порогового деления ядер ^{238}U . В тепловом реакторе $\alpha = 0.17$, $\nu = 2.42$, а вклад ^{238}U составляет около 3%, что дает 2.07 нейтрона, или примерно один избыточный нейтрон после вычета одного нейтрона на поддержание цепной реакции. С учетом утечки и паразитного поглощения нейтронов, для производства ^{239}Pu остается меньше одного нейтрона, т.е. образующийся ^{239}Pu не компенсирует расход ^{235}U . В быстром реакторе для ^{239}Pu в равновесном режиме $\alpha \approx 0.2$, $\nu = 2.9$, а вклад ^{238}U возрастает до ~10%, что увеличивает число вторичных нейтронов до 2.6, т.е. остается 1.6 нейтрона, которых даже с учетом потерь достаточно для расширенного воспроизводства ^{239}Pu , а тем более для равновесного режима работы реактора.

Радиоактивные отходы

Радиоактивные отходы (РАО) — это продукты деления урана (более сотни изотопов из середины таблицы Менделеева), масса которых (~42 кг/т ОЯТ) примерно равна массе сгоревших урана и плутония, и ~20 изотопов трансуранических элементов: нептуния (Np), плутония (Pu), америция (Am) и кюрия (Cm), которые образуются из ^{235}U и ^{238}U при захвате нейтронов их ядрами. Содержа-

ние трансуранических в ОЯТ невелико (табл.2): ^{237}Np — 0.58 кг/т ОЯТ, изотопы Pu (^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu) — 4.5 кг/т, Am — 0.15 кг/т, Cm — 0.04 кг/т, но именно они (вместе с ^{239}Pu) определяют долговременную радиоактивность РАО.

Эта «ядерная зола» живет своей жизнью, и с годами соотношение элементов в ней меняется, например, через 30 лет масса америция (за счет распада $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$) увеличится почти в 10 раз (1.2 кг/т), а три четверти кюрия распадется. За год из реактора мощностью 1 ГВт (эл.) выгружают ~23 т ОЯТ, в которых содержится 970 кг продуктов деления, 270 кг ^{235}U , 130 кг ^{239}Pu , 100 кг других изотопов Pu, 3.5 кг Am и 0.9 кг Cm. Общая масса Am и Cm в выгружаемом ОЯТ невелика: 4.4 кг/год для станции мощностью 1 ГВт (эл.) или 1.6 т/год для всех АЭС мира, но что с ними делать дальше — пока не ясно.

Как правило, публика плохо понимает разницу между отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО), которые по массе составляют только ~5% от ОЯТ, и отсюда происходит множество недоразумений (включая парламентские дебаты по поводу закона о ввозе ОЯТ в Россию). В каждой тонне ОЯТ содержится 42 кг продуктов деления и ~11 кг ^{236}U , ^{237}Np и изотопов Pu, т.е. 53 кг РАО, а остальное — 930 кг ^{238}U , 11.6 кг несгоревшего ^{235}U и 5.6 кг наработанного ^{239}Pu . Поэтому ОЯТ — это не только (и не столько)

Таблица 2
Содержание урана и трансуранических элементов в ОЯТ ВВЭР-1000*

Нуклид	Масса при выгрузке, кг/т ОЯТ	Масса после 30 лет хранения, кг/т ОЯТ	Период полураспада, T _{1/2} , лет
U-235	11.56	11.58	7.04·10 ⁸
U-236	5.46	5.47	2.34·10 ⁷
U-238	930.3	930.3	4.47·10 ⁹
Np-237	0.58	0.62	2.15·10 ⁶
Pu-238	0.18	0.15	87.5
Pu-239	5.58	5.65	2.41·10 ⁴
Pu-240	2.31	2.30	6.56·10 ³
Pu-241	1.46	0.34	14.25
Pu-242	0.51	0.51	3.73·10 ⁵
Am-241	0.048	1.13	4.33·10 ²
Am-242	~10 ⁻⁴	~10 ⁻⁸	1.8·10 ⁻³
Am-242m	0.001	0.001	1.41·10 ²
Am-243	0.097	0.097	7.37·10 ³
Cm-242	0.015	~2·10 ⁻⁶	0.45(163 дня)
Cm-243	~4·10 ⁻⁴	~2·10 ⁻⁴	29.1
Cm-244	0.028	0.009	18.1
Cm-245	0.001	~10 ⁻⁴	8.5
Cm-246	~10 ⁻⁴	0.001	4.75·10 ³
Сумма	10.81	10.81	
трансуранических			

* Таблица соответствует топливу реактора ВВЭР-1000 с обогащением 4.3% ^{235}U и выгоранием 40 МВт·сут/кг.

кущей), третий еще не достиг уровня технологических и инженерных решений. В этом одна из основных трудностей нынешней ядерной энергетики, вызывающая ее неприятие — вплоть до требований запретить.

Проблемы

Сегодня решением обозначенных проблем ядерной энергетики озабочены во всех развитых и развивающихся странах, и повсюду разрабатываются программы ее развития. (В России такая программа была одобрена правительством в 2000 г. [12]). Во всех этих программах много графиков, таблиц и формул, но суть их проста: ядерная энергетика будущего должна удовлетворять следующим критериям:

- быть обеспеченной ресурсами,
- быть безопасной,
- сохранять экологию,
- быть экономичной.

Нынешняя ядерная энергетика доказала свою работоспособность, но она соответствует этим требованиям лишь отчасти. И дело здесь не только в авариях типа Чернобыльской: столь же неприятен риск попадания ^{235}U и ^{239}Pu в руки террористов и других антисоциальных групп. А при сохранении нынешней технологии ядерного топливного цикла эту проблему кардинально решить нельзя.

В наследство от ядерной технологии военных лет остались водоемы и целые территории, отравленные радиоактивными отходами, и они останутся такими в течение многих сотен лет. Сейчас ОЯТ накапливается в хранилищах (11,5 тыс. т ежегодно) вместе со всеми РАО (~600 т/год, в том числе ~45 т трансуранов). Кардинальное решение проблемы РАО и безопасности ядерной энергетики возможно только при переходе к такому ядерному топливному циклу, который не требует выделения ^{239}Pu из ОЯТ, а также обеспечит надежную изоляцию РАО и уничтожение трансуранов. Эти задачи, однако, пока не решены, хотя их важность уже осознана даже на государственном уровне: во Франции, где сегодня 76% электричества вырабатывается на АЭС, по этому поводу даже принят специальный закон, запрещающий строительство новых АЭС, если в обозримом будущем не будет решена проблема РАО. Кроме того, безопасность реакторов нового поколения должна базироваться не на многочисленных системах контроля, а на физических законах, которые позволяют исключать аварии типа Чернобыльской в принципе*.

* Алвин Вейнберг, который вместе с Ферми создавал первый реактор, а после его смерти был одним из самых авторитетных специалистов в области ядерной энергии, в 70-х годах прошлого столетия предлагал объявить мораторий на строительство новых АЭС, пока не будет создан реактор, удовлетворяющий этим условиям. С тех пор прошло полвека, но такой реактор до сих пор не построен.



Рис. 8. Динамика роста мощностей АЭС в мире. На сегодня в 30 странах мира работают 438 АЭС с суммарной мощностью 372 ГВт [8].

Но главное — в другом: современная ядерная энергетика не обеспечена долгосрочными топливными ресурсами, поскольку использует только ^{235}U , коммерческие ресурсы которого на Земле, по официальным оценкам, не превышают 30 тыс. т. Легко видеть, что при прогнозируемой мощности энергетики в середине XXI в. (~ $3 \cdot 10^4$ ГВт) и электрической мощности АЭС ~ 10^3 ГВт (эл.) необходимо расходовать ~1 тыс. т ^{235}U в год, т.е. эти запасы ^{235}U будут исчерпаны за 30–50 лет (в настоящее время расходуется ~600 т ^{235}U в год).

Наконец, экономика нынешней ядерной энергетики тоже неудовлетворительна по ряду причин. Прежде всего, хотя себестоимость электроэнергии, производимой на работающих АЭС, примерно в два-три раза ниже стоимости электричества тепловых электростанций (ТЭС), стоимость и длительность сооружения АЭС много больше, чем ТЭС. Кроме того, возросшие требования к безопасности АЭС еще больше увеличили их стоимость и их строительство стало экономически невыгодным, войдя в противоречие с основным принципом рыночной экономики: максимально быстрая прибыль. Именно это обстоятельство в сочетании с Чернобыльской аварией привело к замедлению темпов развития АЭС (рис. 8). Ядерная энергетика возникла при мощной поддержке государства (примеры: США, СССР, Франция). Будущую ядерную энергетику тоже не создать без государственной поддержки, поскольку устойчивая энергетика — такой же важный элемент развития и стабильности общества, как образование, наука, медицина и социальная защита.

Их решение

Как ученые и инженеры намерены решать все перечисленные проблемы: ресурсы, безопасность, экология, экономика? Прежде всего, надо пре-

одолеть ресурсное ограничение по ^{235}U , и как это сделать — известно давно: надо перейти от нынешних тепловых реакторов к **быстрым реакторам**. В этих реакторах отсутствует замедлитель, а быстрые нейтроны, как уже отмечалось, способны делить также и ядра ^{238}U . Но, главное, ^{239}Pu , который нарабатывается в реакторе, в быстром спектре нейтронов значительно эффективнее, чем в тепловом: для него среднее число вторичных нейтронов на деление ($\nu = 2.89$) больше, чем для урана ($\nu = 2.42$), а кроме того, заметный вклад вносит деление ядер ^{238}U . Все это вместе обеспечивает в быстром реакторе существенный избыток нейтронов, который позволяет сделать его работу более устойчивой. Если исходную смесь изотопов урана обогатить ^{235}U до ~15%, то в реакторе устанавливается равновесный режим работы: ^{239}Pu , образующийся в нем из ^{238}U , компенсирует выгорание ^{235}U , и реактор не требует подпитки этим изотопом, т.е. работает только за счет деления ^{238}U и ^{239}Pu . Тем самым топливные ресурсы современной ядерной энергетики возрастают по крайней мере в 200 раз, срок их исчерпания отодвигается на 5—10 тыс. лет, а с учетом запасов урана в океане и в бедных рудах, непригодных для тепловых реакторов, ядерного топлива хватит на миллионы лет.

Запасы ядерного топлива можно уподобить заготовке дров, из которых только 0.72% сухих, остальные же — сырые. Рачительный хозяин использует сухие дрова только на растопку, а топит печь сырыми дровами. В противовес этому сегодня ядерное топливо расходуют крайне расточительно: «ядерную печь» топят лишь сухими дровами (^{235}U), а когда они закончатся (довольно скоро), станет невозможно использовать и все остальные (^{238}U и ^{232}Th). Таким образом, существует реальная угроза, что главный источник энергии на Земле, заключенный в ядрах урана и тория и освобожденный в XX в., станет недоступен нашим потомкам.

Эту проблему понимал уже Энрико Ферми [13]. Вскоре после запуска первого реактора он выдвинул концепцию «бридинга» (расширенного воспроизводства) ядерного топлива, суть которой сводилась к следующему. В отличие от теплового, в быстром реакторе существует избыток нейтронов (~2 избыточных нейтрона на деление вместо ~1 в тепловом), который позволяет нарабатывать избыточный ^{239}Pu и затем использовать его для запуска других быстрых реакторов. (При специальных условиях один такой реактор-бридер за 6—8 лет может нарабатывать топливо еще для одного быстрого реактора.)

Ферми при этом понимал, что столь громоздкой многоступенчатой схемы можно избежать, если вместо ^{239}Pu для начальной загрузки быстрого реактора использовать ^{235}U , но в то время (1944) промышленное разделение изотопов урана еще не было освоено (это произошло позже).

К сожалению, сразу же после окончания войны Ферми отошел от реакторных дел и вскоре умер (1954), а стереотип, созданный им, остался на долгие годы*. Разделение изотопов урана ^{235}U и ^{238}U — сложный и трудоемкий процесс, но теперь он полностью освоен, и сегодня 15%-е обогащение 1 т природного урана в несколько раз дешевле производства 100 кг ^{239}Pu , необходимого для эквивалентной замены 150 кг ^{235}U , поэтому имеет смысл обсуждать только ресурсные ограничения по ^{235}U .

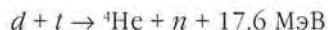
Для запуска быстрого реактора мощностью 1 ГВт (эл.) в него надо загрузить ~70 т урана, обогащенного ^{235}U до ~15%, т.е. ~10 т ^{235}U , и при работе в равновесном режиме такой реактор в дальнейшем не требует подпитки ^{235}U . Во всех разведанных месторождениях содержится $5.4 \cdot 10^{16}$ т урана, или $\sim 3 \cdot 10^4$ т ^{235}U [7]; это позволяет запустить $3 \cdot 10^3$ быстрых реакторов общей мощностью ~3 · 10³ ГВт (эл.), что примерно в три раза превышает ранее полученную оценку (~10³ ГВт) мощности атомной электроэнергетики будущего. Но переход к быстрым реакторам возможен не ранее середины века, поскольку сейчас такой реактор еще не создан и не готова технология его замкнутого ядерного топливного цикла. Эта задержка может оказаться фатальной: современные тепловые реакторы при ожидаемой к середине XXI в. мощности ~10³ ГВт сожгут за оставшиеся 40 лет почти весь ресурс ^{235}U . Из этого следует, что разработку технологии быстрых реакторов надо ускорить и начинать их вводить уже через 20—30 лет.

Дополнительным источником ядерного топлива может служить ^{235}U и ^{239}Pu , накопленный в ОЯТ за 60 лет существования ядерной энергетики: к настоящему времени в мире накоплено ~250 тыс. т ОЯТ [14], в котором содержится ~3 · 10³ т ^{235}U и ~2 · 10³ т ^{239}Pu , т.е. всего ~5 · 10³ т делящихся изотопов. В следующие 40 лет из тепловых реакторов будет выгружено еще ~5 · 10⁵ т ОЯТ, содержащих ~8 · 10³ т ^{235}U и ^{239}Pu , т.е. всего к середине века в ОЯТ будет накоплено $1.3 \cdot 10^4$ т делящихся изотопов, что позволяет запустить $1.3 \cdot 10^3$ ГВт (эл.) мощностей быстрых реакторов — даже больше, чем планируется. При максимальном сценарии развития энергетики (~10⁵ ГВт) и 30-процентном вкладе ядерной энергетики (0.3 · 10⁵ ГВт или 10⁴ ГВт (эл.)), для запуска быстрых реакторов потребуется ~10⁵ т ^{235}U или ~20 млн т природного урана. Согласно экспертным оценкам, такое количество урана уже сегодня доступно [15]. Кроме того, только в морской

* Сам Ферми скептически относился к будущему ядерной энергетики: он опасался, что ядерные материалы «могут попасть не в те руки»: «Мы, к сожалению, не можем ожидать особенно плодотворных результатов для человечества от мирного использования атомной энергии, если не будет найдено удовлетворительного решения многочисленных проблем предотвращения разрушительного использования ее военных возможностей» [13]. По-видимому, поэтому он не писал работ по атомной энергетике, сохранились лишь записи двух его выступлений в дискуссиях.

воде содержится еще 4 млрд т урана — ресурс ядерного топлива на миллионы лет.

Сегодня обсуждаются и другие источники ядерного топлива, например термоядерные установки, в которых в реакции термоядерного синтеза



рождаются нейтроны с энергий 14.1 МэВ. Такие нейтроны в окружающем урановом «бланкете» способны вызвать 0.85 деления ядра урана и произвести около 2.7 ядра ${}^{239}\text{Pu}$ [16] и тем самым обеспечить наработку ядерного топлива. (Эти нейтроны можно было бы использовать также и для решения проблемы ядерных отходов, а именно для трансмутации трансурановых элементов.) С момента появления идеи термоядерного синтеза прошло уже 60 лет, и хотя его промышленная реализация отодвигается теперь еще лет на 30–40, эта мечта настолько красива, что ученые не оставляют надежды когда-либо ее осуществить (напомним, что первый промышленный ядерный реактор был построен уже через пять лет после открытия деления ядер урана).

Комплексное решение проблемы ресурсного обеспечения ядерной энергетики и обращения с ядерными отходами невозможно без организации замкнутого ядерного топливного цикла. Сегодня практически повсеместно бытует открытый цикл: ядерное топливо при этом используется однократно, и после извлечения из реактора ОЯТ помещают в долговременные хранилища (из 340 тыс. т ОЯТ, накопленных за все время существования ядерной энергетики, переработано только 90 тыс. т) [14]. Фактически тем самым создаются искусственные месторождения урана, в которых концентрация делящихся изотопов увеличена примерно в 2.5 раза по сравнению с природным ураном и в десятки раз — по сравнению с их содержанием в урановых рудах. Эти хранилища — кладовая ядерного топлива для быстрых реакторов, если мы научимся использовать ОЯТ многократно. Для этого необходимо выделить из ОЯТ продукты деления, в первую очередь лантаниды (Gd, Sm, Pm, Eu) и короткоживущие продукты деления (Cs, Sr, I, ...) — все остальное (включая актиниды) «сгорит» в нейтронном потоке быстрого реактора. Чтобы сократить время такого замкнутого ядерного топливного цикла, необходимо научиться работать с высокоактивным ОЯТ, а это потребует разработки автоматизированных линий и робототехники. Такой цикл еще не создан, но сомнений в его осуществимости нет.

Следует отметить, что замкнутый цикл имеет смысл только для быстрых реакторов, поскольку повторное использование ОЯТ в тепловых реакторах неэффективно, так как изотопы U и Pu, в больших количествах присутствующие в ОЯТ, подобно лантанидам, активно поглощают медленные нейтроны. Точно так же неэффективно сжигание в тепловых реакторах ${}^{239}\text{Pu}$ (так называ-

емое МОХ-топливо), хотя и по другой причине: в тепловом спектре значение $\alpha = 0.36$ для ${}^{239}\text{Pu}$ в два раза больше, чем в быстром, поэтому в тепловом реакторе только 74% ядер ${}^{239}\text{Pu}$ делится, а 26% ${}^{239}\text{Pu}$ переводится в мусор — трансурановые элементы. Сегодня переработка ОЯТ намного дороже, чем его хранение, и такое положение, по видимому, сохранится до тех пор, пока не будет создана масштабная ядерная энергетика на быстрых нейтронах, позволяющая эффективно использовать ${}^{238}\text{U}$, ${}^{236}\text{U}$, ${}^{237}\text{Np}$ и все изотопы Pu.

По большому счету, задача создания будущей ядерной энергетики сводится к двум: созданию безопасного экономичного быстрого реактора и разработке его замкнутого топливного цикла. Первый промышленный быстрый реактор БН-350 мощностью 350 МВт был построен в Советском Союзе в 1972 г. на берегу Каспийского моря и проработал 25 лет, снабжая энергией и пресной водой г.Шевченко (сегодня — Актау). В настоящее время в мире работает несколько быстрых исследовательских реакторов и единственный промышленный (реактор БН-600 в России, рис.9). Все они в качестве теплоносителя используют металл натрия. Как хорошо известно, он воспламеняется при соприкосновении с водой и воздухом, поэтому даже мелкая авария может привести к крупномасштабному пожару. Однако сегодня альтернатив ему немного: сплав свинец-висмут и чистый свинец, которые так же мало поглощают нейтроны, а замедляют — меньше. Температура плавления сплава Pb-Bi равна 124°C, на его основе в нашей стране было построено несколько реакторов для атомных подводных лодок, которые вошли в книгу рекордов: эти лодки ходили быстрее торпеды. Однако и сплав Pb-Bi не свободен от недостатков: в потоке нейтронов в реакции $n + \text{Bi} \rightarrow \text{Po}$ образуется ядовитый, радиоактивный и к тому же летучий полоний, а кроме того, висмут редок и дорог. Свинец лишен этих недостатков, но его температура плавления составляет 327°C, что мо-

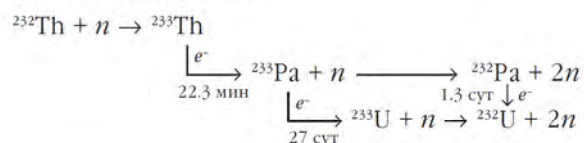


Рис.9. Общий вид промышленного быстрого реактора БН-600.

жет осложнить эксплуатацию такого реактора (хотя это еще и не доказано: он пока не построен). В настоящее время в большинстве национальных программ в качестве основы будущей энергетики выбран быстрый реактор с натриевым теплоносителем (температура плавления 98°C), несмотря на все его очевидные недостатки. Однако окончательное решение еще не принято, и оно зависит от правильного понимания конечных целей ядерной энергетики.

Остается неясной также судьба РАО, наработанных в предыдущие 60 лет ядерной энергетики, и особенно пути ликвидации трансуранов. Обсуждаются различные способы их уничтожения, в частности, предлагается создать специальные реакторы-пережигатели изотопов Np, Pu, Am и Cm и наиболее долгоживущих изотопов РАО (⁹⁹Tc, ¹⁵¹Sm, ¹²⁶Sn, ¹²⁹I, ...). В качестве одного из возможных кандидатов на эту роль рассматриваются ускорительно-бланкетные системы, т.е. подкритические реакторы, управляемые ускорителем.

До сих пор мы не обсуждали ториевый ядерный цикл. Ресурсы тория (²³²Th) на Земле в три раза превышают ресурсы урана, но у него нет делящихся изотопов, подобных ²³⁵U. Однако в потоке нейтронов идут реакции



с образованием делящегося изотопа ²³³U. Но вместе с этим образуется и ²³²U, один из продуктов распада которого (²⁰⁸Tl) испускает очень жесткие γ-кванты, что затрудняет переработку ОЯТ ториевого реактора. Однако вместе с неизбежным переходом к робототехнике при переработке ОЯТ это обстоятельство становится несущественным.

В тепловых реакторах ²³³U эффективнее ²³⁵U (для него α = 0.085 вместо α = 0.167 для ²³⁵U), однако в природе его нет и его надо предварительно наработать. В Индии (где запасы тория в монацитовых песках огромны) принята программа строительства реакторов на тории, в которых ²³³U для начальной загрузки нарабатывается в ториевых бланкетах быстрых реакторов или заменяется на ²³⁵U и ²³⁹Pu [17].

В 60-х годах прошлого столетия в США ториевый реактор был построен и проработал несколько лет, но продолжения этот опыт не получил. В целом, однако, ториевый цикл пока слабо изучен и его будущее зависит от достижений в разработке быстрых реакторов.

Из трех изотопов, которые делятся медленными нейтронами, в природе встречается только ²³⁵U. Но его очень мало, и вместо того чтобы бездумно сжигать его в современных тепловых реакторах, надо развивать атомную энергетику на быстрых нейтронах.

Ядерная экономика, психология, политика

Важнейшим условием развития ядерной энергетики является ее экономичность и конкурентоспособность с другими источниками энергии. Эта проблема выходит за рамки чисто научной: она зависит от социальной и экономической структуры общества. Ощущение неизбежности расширения роли ядерной энергетики заметно уже сейчас: если в 2008 г. во всем мире не было построено ни одного реактора (впервые за всю ее историю), то сейчас во многих странах объявлены широкомасштабные планы строительства АЭС* — не дожидаясь того момента, когда ученые создадут новый реактор и все противники ядерной энергетики убедятся в ее необходимости (рис.10).

Однако основная проблема ядерной энергетики сегодня — даже не оппозиция «зеленых», а отсутствие четкой стратегии ее развития при обилии мнений различных влиятельных групп ученых и инженеров. Здесь уместно напомнить историю возделывания картофеля в России. Его привезли в Европу из Америки, и долгое время к этому экзотическому растению относились настороженно, несмотря на то что правители государств всячески поощряли его возделывание (например, Наполеон учредил специальные награды). В России Екатерина II начала культивировать картофель еще в 1765 г., ее начинание продолжили и Павел, и Александр I, но без особого

* К 2050 г. планируется ввести новые АЭС мощностью ~800 ГВт, в частности в Китае — 240 ГВт, в Индии — 470 ГВт, в России — 40 ГВт [15]. Эти планы поспешили назвать ренессансом атомной энергетики, но это тревожный знак для ее будущего: тепловые реакторы сожгут значительную часть запасов ²³⁵U, необходимого для запуска быстрых реакторов. Еще более тревожно отсутствие целенаправленной работы по созданию быстрого реактора, способного решить встающие перед миром задачи уже в XXI в.

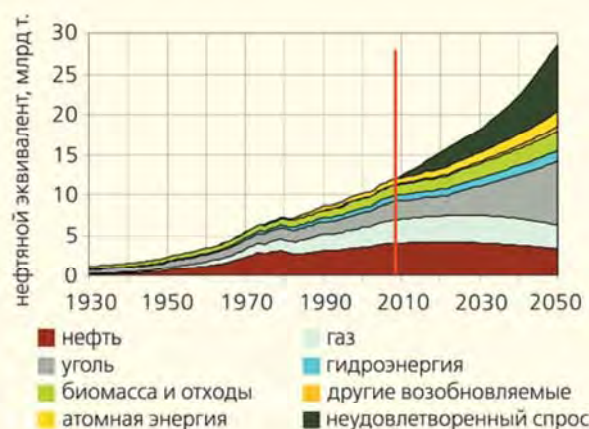


Рис.10. Структура производства энергии в мире и прогноз ее роста в будущем.

успеха. Только после двух неурожаев хлеба подряд в 1839 и 1840 гг., под угрозой голода, Николай I издал высочайшее повеление энергично и повсеместно внедрять в России «второй хлеб» — картофель, для чего раздать крестьянам казенные семена, снабдить их наставлениями по возделыванию, хранению и употреблению картофеля, а также учредил премии и награды особо отличившимся на этом поприще. Царский рескрипт вызвал всеобщее неудовольствие крестьян и в 1842 г. в некоторых губерниях вспыхнули «картофельные бунты», которые пришлось усмирять при содействии военных команд, а местами — даже картечью. К началу XX в. доля посевов картофеля в некоторых губерниях России достигла 20%.

Император Николай I был отнюдь не демократ (в советское время он был известен как Николай Палкин), но о благе отечества заботился и советам ученых людей внимал. Если бы ему вместо этого пришла в голову мысль провести всенародный «картофельный референдум», результат его предугадать нетрудно. Современные либеральные идеи о референдуме по вопросу об атомной энергии мало чем отличаются от идеи «картофельного референдума», и в новых условиях они столь же несвоевременны и опасны, а их инициаторы — преступно недалководивны.

Энергия — это очень серьезно: ее нехватка сродни недостатку воды или лекарств для тяжелобольного, когда мы готовы платить любые деньги, чтобы необходимое лекарство добыть. Овладение энергией ядра — самое великое деяние человека за всю его историю. Невозможно отрешиться от чувства изумления при виде огромных сооружений атомных станций, в которых извлекают энергию из невидимых глазу ядер. Однако гипноз этого величия препятствует пониманию того, что на самом деле сегодня завершился только период ученичества: практически доказано, что энергию из ядра можно извлекать. Но пока не создан безопасный и экономичный быстрый реактор и соответствующий ему замкнутый топливный цикл, ядерная энергетика не имеет длительных перспектив. За прошедшие полстолетия мы действительно много узнали и еще больше сделали. Однако главная задача еще не решена, и она сложнее (и много важнее), чем создание атомного оружия. Для ее решения потребуются не только личности масштаба Ферми и Курчатова, но и политическая воля государств, которые мыслят не только категориями прибыли, но и благом граждан в исторической перспективе. И если человечество справится с этой задачей, закончится его предыстория и начнется новая история, свободная от ежедневной борьбы за источники энергии. ■

Литература

1. Вернадский В.И. Очерки и речи. Вып. I. Пг., 1922.
2. Филин К. Энергетический отчет // Известия, 17 июня 2010 г.
3. Иванов К.П. Энергетические проблемы жизни // Вестник РАН. 2010. Т.80. №8.
4. 2010 Key World Energy Statistics // OECD/NEA. 2010 (www.ica.org); International Energy Outlook 2010, DOE/EIA-0484(2010).
5. Мировые демографические тенденции: Доклад комиссии по народонаселению ООН. 2009 (<http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N09/210/54/PDF/N0921054.pdf>).
6. Физические величины / Ред. И.С.Григорьев, Е.З.Мейлихов. М., 1991.
7. OECD/NEA&IAEA, Uranium 2009, Production and Demand; WNA, Supply of Uranium, 2010 (<http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html>).
8. Energy, electricity and nuclear power estimates for the Period up to 2050. IAEA, Vienna, 2010.
9. Technology roadmap. Solar photovoltaic energy. IEA, France, 2010 (www.ica.org).
10. Абрамова В.Н., Абрамов А.И. А нужна ли нам ядерная энергетика? М., 1992.
11. Чернобыль: истинные масштабы аварии: Совместный пресс-релиз ВОЗ/МАГАТЭ/ ПР ООН (<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/ru.html>).
12. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. М., 2000 (<http://reactors.ru/pub/strat/stategy.html>); Белая книга атомной энергетики. М., 2001.
13. Ферми Э. Научные труды Т. II. М., 1972.
14. Spent fuel reprocessing options. IAEA-TECDOC-1587. Vienna, 2008.
15. Обзор ядерных технологий-2010. Доклад генерального директора МАГАТЭ // <http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC54/Agenda/index.html>
16. Петров Ю.В. // Атомная энергия. 1987. Т.63. №333.
17. Towards an alternative nuclear future; ThorEA Association (www.thorEA.org).