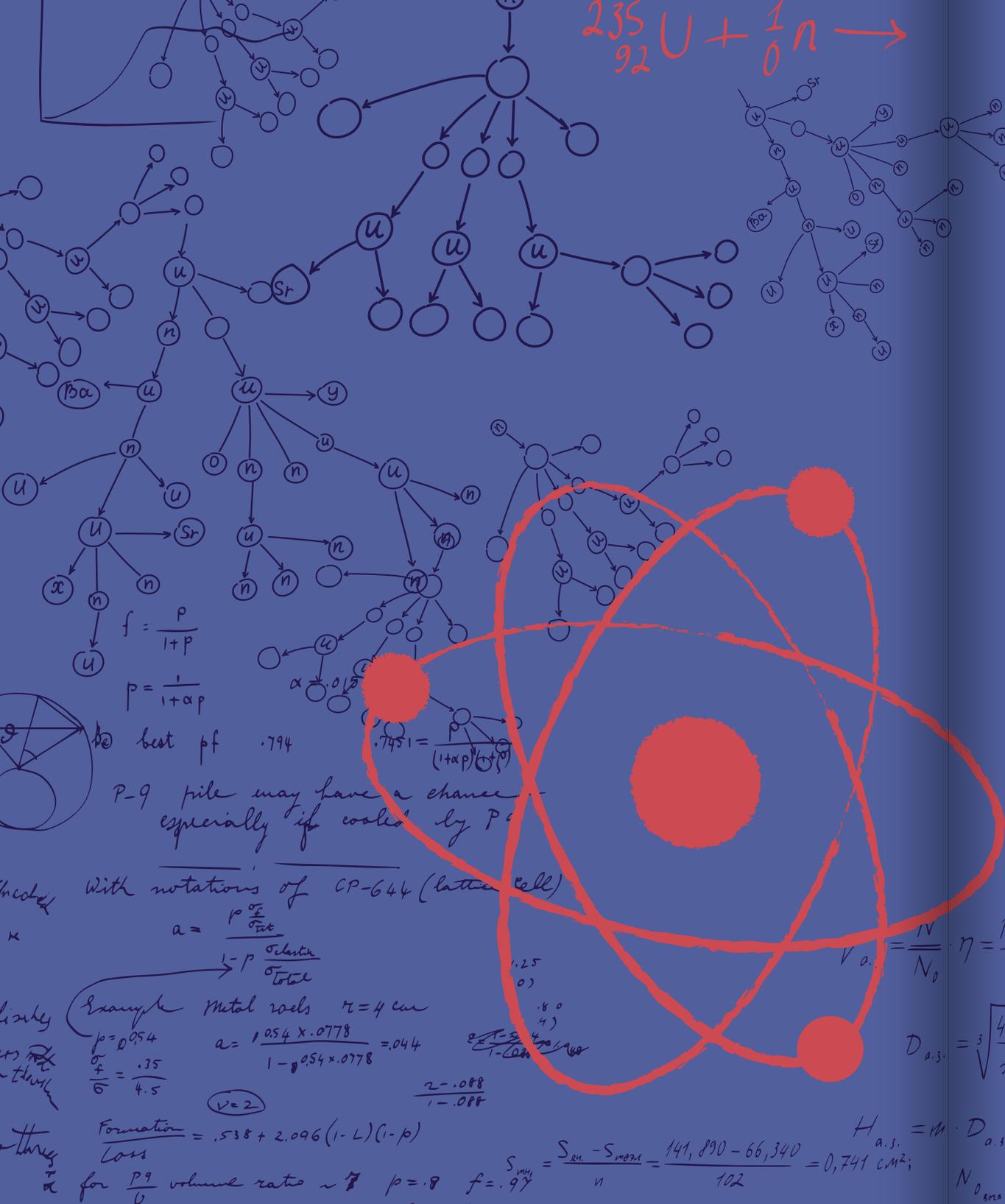




**75 ЛЕТ
АТОМНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

ОПЕРЕЖАЯ
ВРЕМЯ

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ ПЕРВОЕ ЗНАКОМСТВО

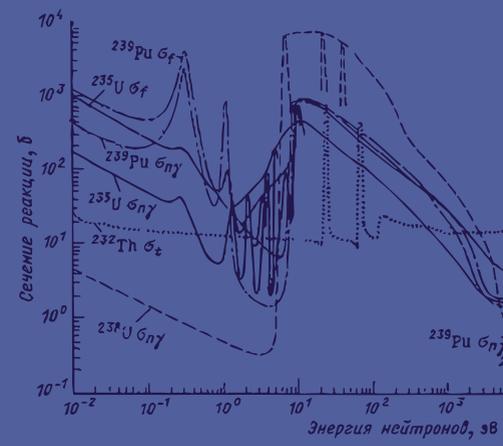


$$\eta = \frac{175 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{85 \cdot 10^{-3}} = 2,471 \cdot 10^6 \text{ cm}^3$$

$$D_{a.s.} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{a.s.}}{\pi \cdot \eta}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 2,47 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 0,975}} = 161,269 \text{ см.}$$



РОСАТОМ



With notations of CP-644 (latter cell)

$$a = \frac{p \cdot \sigma_{scat}}{\sigma_{tot}}$$

Example Metal rods $\kappa = 4 \text{ cm}$

$$a = \frac{0,054 \times 0,0778}{1 - 0,054 \times 0,0778} = 0,04$$

$$f = \frac{p}{1+p} = \frac{0,35}{4,5} = 0,0778$$

$$S_{min} = \frac{S_{235} - S_{238}}{\eta - 1} = \frac{141,890 - 66,340}{102} = 0,741 \text{ cm}^2$$

$$D_{a.s.} = 0,75 \cdot 147,764 = 120,951 \text{ см.}$$

$$N_0 = N_0 \cdot K_V = 85 \cdot 10^{-3} \cdot 3 = 255 \cdot 10^{-3} \text{ кВТ/см}^3$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{r \in \phi.б.} S_i = \frac{\sum_{r \in \phi.б.} S_{r,mon} + \sum_{r \in \phi.б.} S_{r,sh.}}{S_{\phi.б.}}$$

$$\sum_{i=1}^m S_i = \frac{2696 \cdot 0,594 + 1,460 \cdot 0,205}{1} = 2,590 \text{ см}^{-1}$$

За большую помощь и неизменную поддержку при работе над этой книгой я считаю приятным долгом поблагодарить друзей и коллег по атомной отрасли — сотрудников Департамента коммуникаций госкорпорации «Росатом»:
руководителя Департамента
А. В. Черемисинова,
заместителя руководителя
К. В. Кошкина,
главного специалиста
Т. А. Шаповалову,
главного редактора
газеты «Страна Росатом»
Ю. А. Гилёву, —
а также дизайнера М. А. Миллер.

ОБРАЩЕНИЕ К ЧИТАТЕЛЯМ 7

ГЛАВА 1. НЕМНОГО ОБ ЭНЕРГИИ ВООБЩЕ 11

От костра до ресурса прямого жизнеобеспечения.....	13
О формах энергии и единицах ее измерения.....	17
Энерготехнологии — прогулка на машине времени.....	21
Краткий толковый словарь энерготехнологий.....	25
Критерии энерготехнологий.....	30
В мире: как обстоят дела и надолго ли хватит?.....	36
На сцену выходит атомная энергия.....	39
Что лучше?.....	42

ГЛАВА 2. НЕМНОГО ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ДЛЯ ПЕРВОГО ЗНАКОМСТВА С АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКОЙ 45

Атом и атомное ядро: основные понятия и характеристики.....	47
Кандидаты на ядерное топливо — где их искать?.....	54
Барьер деления, или Приключения саночника.....	57

УРАН, ТОРИЙ И ИХ СВОЙСТВА. ЯДЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	60
Осколки деления и их свойства	64
ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР И АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ	68
ЯДЕРНЫЙ ЭНЕРГБЛОК: ЧТО ТАМ ВНУТРИ?	71
А ВЕДЬ БЫЛИ И ПРИРОДНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ	75

ГЛАВА 3. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ.....79

РАДИАЦИЯ КАК АТРИБУТ ДЬЯВОЛА.....	81
ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	82
РАДИОНУКЛИДЫ И ИХ СВОЙСТВА	86
ПРИРОДНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ.....	89
ДОЗА — ОСНОВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	90
РАДИАЦИЯ В ОКРУЖАЮЩЕМ МИРЕ: ОТКУДА ЧТО БЕРЕТСЯ?	96
РАДОН И ВОКРУГ НЕГО.....	99
РАДИАЦИОННОЕ АССОРТИ С ЙОДОМ НА ЗАКУСКУ	104

ГЛАВА 4. ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ. ОБЩЕСТВО И АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА — СРЕЗ НЕПРОСТЫХ ОТНОШЕНИЙ 111

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ, ДОРОГИЕ ДРУЗЬЯ!

Обязательным условием того, что научно-популярную книгу (а именно такая книга перед вами) вы будете читать, является наличие в ней ответов на вопросы, интересующие вас — реально сформулированные, а не взятые с потолка. Но для этого необходимо, чтобы написанию книги предшествовала практика прямого диалогового общения по ее проблематике с вами же — школьной и студенческой молодежью.

Такую практику мне и посчастливилось получить на лекциях, встречах и беседах в Информационных центрах по атомной энергии (ИЦАЭ) госкорпорации «Росатом», на программах дополнительного образования в школах и лицеях и на встречах со школьниками разных возрастов на «Университетских субботах» в НИЯУ МИФИ.

Меня всегда радовали вопросы юных собеседников. Чувствовалась и живой интерес к атомной проблематике, и неподдельное желание сформировать собственное отношение к ней. И было особенно приятно, когда встреча переходила в режим свободной дискуссии. Ведь так не только составлялся перечень наиболее интересных для молодежи вопросов (по принципу их повторяемости на различных встречах), но и становилось понятным, какие пробелы в знании и понимании физических и инженерных явлений и закономерностей, лежащих в основе современной энергетики (в том числе атомной), подлежат устранению в первую очередь. И где корни опасений и страхов, которые до сих пор мешают объективности восприятия обществом ядерных технологий.

Вот на эти вопросы я и попытался ответить в книге, которую вы открыли.

Глава 1 — это рассказ об общей истории энерготехнологий и об их роли в цивилизационном развитии человечества. Это ответ на вопросы: зачем это было нужно людям в прошлом, зачем требуется сейчас, в каком виде понадобится в будущем, как история и перспективы энергетики связаны с эволюцией общества в целом? Кроме того, изложены элементы метрологии энергии — в тесной увязке с понятиями о формах энергии как фундаментальной физической величины, их взаимосвязи и физическом смысле. Кратко рассказано и об основных инженерных понятиях энергетики — энергоресурсах и энергоносителях, сравнительных достоинствах и недостатках энерготехнологий наших дней. Не могли остаться в стороне и актуальные экологические проблемы современной энергетики — во всяком случае, наиболее важные из них. И наконец, вы узнаете, почему мировые закономерности ее развития вызвали к жизни энергетику атомную.

Но атомная энергетика, которая подробно рассматривается в главе 2, — энергетика все же особая. И не только потому, что ей, собственно, и посвящена наша книга. У нее все свое — и физика, и техника, и ресурсное обеспечение, и метрология... Тут и вопросов на встречах со школьниками было больше всего, да и сами вопросы иногда приятно удивляли. В них чувствовалось желание лучше понять атомную энергетику, с уровня «прогулки по выставке», которая отвечает на вопрос, как это выглядит, подняться до ответа на совсем другой вопрос: что там внутри, почему и как это все работает.

Понятно, что в главе 2 этому уделено особое внимание. Как и удивительной истории, развенчивающей квазифилософский миф о принципиальной несовместимости природы нашей планеты и атомной энергетики. Оказывается, ядерные реакторы работали на Земле задолго до появления человека, а мастерству природы как их «конструктора» позавидовали бы многие современные инженеры...

Но в этой книге обязательно должна быть затронута и еще одна тема — что и сделано в главе 3. Ее постановка в ваших вопросах и обсуждение в этой книге связаны с тем общеизвестным фактом, что использование атомной энергии во многих случаях связано с возникновением значительного количества радиоактивных материалов и веществ. И необходимо учитывать возможное технологическое и биологическое воздействие их ионизирующих излучений, в обиходе называемых радиацией.

Почему это слово стало не только одним из главных ужасиков современной эпохи, но и, пожалуй, чемпионом по неадекватности массового восприятия? Что она такое, эта радиация, какова физическая расшифровка этого понятия? В чем причина негативного влияния интенсивных потоков ионизирующего излучения на организм человека? Каковы основы его метрологии? Какие законы управляют радиоактивным распадом? Что такое радиоактивность внешней среды? Какова средняя радиационная нагрузка на организм человека и какой вклад в нее вносят естественные и техногенные факторы, в частности проживание вблизи АЭС? Может ли близость АЭС повлечь дополнительные риски для здоровья людей и насколько можно доверять мнениям и слухам, что это именно так, а не иначе?

И далее, в главе 4, обсуждается именно этот последний вопрос — проблема, о которой очень точно сказал ныне покойный бывший генеральный директор МАГАТЭ Ю. Аmano: «Главное для атомной энергетики — обретение общественного доверия». Сейчас такого доверия у большинства людей пока еще нет. Оттого и вопросы, отражающие степень этого доверия, иногда носят тревожный оттенок, а ведь они во многом есть следствие того, о чем вы слышали, что и где читали, с кем и как общались.

Пройти в книге мимо этой темы я не мог. И не только потому, что ваших вопросов по ней было много, — проблема гораздо шире. Она в том, что само слово «доверие» происходит от слова «верить». И в том, что в нашем узкоспециализированном мире, где нет и никогда больше не будет универсалов, равно компетентных во всех вопросах науки и техники, верить кому-то все равно придется. Хотим мы этого или нет, но мы поступаем (и, несомненно, будем поступать и далее) именно так, а не иначе. И атомная энергетика здесь не исключение.

А отсюда и главные вопросы главы 4: кому верить, а кому нет — профессионалу или дилетанту с луженой глоткой. Каковы реальные и надуманные технологические риски современности. И какие смысловые фильтры должен поставить перед своим сознанием человек нашего времени, чтобы не стать в своих настроениях, решениях и действиях паяцем, жалкой марионеткой в чужих руках.

Теперь несколько просьб к вам, дорогие читатели.

Во-первых, я прошу понимания и у тех из вас, кому какие-то фрагменты книги показались излишне сложными, и у тех, кто счел

НЕМНОГО ОБ ЭНЕРГИИ ВООБЩЕ

их вполне банальными. Эта книга для всех, кому интересны судьбы и перспективы отечественной атомной отрасли, и я с самого начала не собирался как-то фрагментировать состав ее читателей. Поэтому я при ее написании руководствовался бессмертным советом великого Эйнштейна: «Любой вопрос должен быть изложен так просто, как только можно, но не проще».

Во-вторых, эта книга не «ядерная энциклопедия». С моей стороны было бы свержнаивно пытаться утрамбовать в издание такого объема и жанра многие, даже весьма значимые и очень интересные, вопросы состояния и развития атомной энергетики и ядерной техники. Скрепя сердце пришлось оставить за пределами книги реакторы на быстрых нейтронах, обращение с облученным ядерным топливом и радиоактивными отходами, структуры ядерных топливных циклов, проблемы преодоления последствий ядерных аварий, радионуклидные технологии, ядерную медицину и многое, многое другое. Прекрасно осознаю, что каждая из этих тем заслуживает отдельного издания подобного рода, и прошу как моих коллег в атомной отрасли, так и вас, дорогие читатели, отнестись к этому с пониманием. Как и к тому, что мне при работе над книгой все время приходилось удерживаться на тонкой грани между исчерпывающей аргументацией и научной строгостью приводимых в ней доводов, мыслей и тезисов (к чему я так привык за многие годы научной работы) с одной стороны и доступностью изложения с другой. Прошу поверить мне: иногда это было очень непросто.

В-третьих, овладение ядерными технологиями и прочтение этой книги – вещи совершенно разные. Профессиональное обучение физике и энергетике, радиационной безопасности и ядерным технологиям – это многолетний, тяжелый, хотя и очень интересный, труд. Поэтому эта книга ни в коем случае не может заменить учебник, она на это и не рассчитана. Это лишь приоткрытая дверь в захватывающий мир атомной энергетики, ядерных и радиационных технологий.

И если кто-то из читателей будет после прочтения этой книги относиться к атомной технике и энергетике с большей степенью понимания и внутреннего доверия, то для меня это уже будет удачей. Но если прочитавший ее будет считать профессиональную работу в этой области своим жизненным путем, то мне больше нечего и желать.

ГЛАВА 1



пожаром, извержением вулкана), научился сначала этот огонь сохранять, а потом и получать самостоятельно. И дело здесь не только в обогреве и получении пищи. Для человека огонь стал важным цивилизационным фактором жизни — символом тепла и уюта, способом защиты от диких хищных собратьев (рис. 1.1). Огонь пользовался у него высшим уважением, иногда обожествлялся. Со временем люди поняли, насколько удобней и комфортней может быть жизнь, если использовать управляемый огонь. Наступала эпоха энерготехнологий.



Рисунок 1.1. Первая «энерготехнология»



Энерготехнологии — это звено для передачи энергии от некоторого ее источника (неважно какого — мускульного, огневого, ядерного, использующего энергию воды, ветра и др.) для улучшения качества жизни людей и общества в целом.

И вот что очень важно. На современном этапе развития человеческой цивилизации они, в отличие от многих других технологий, являются технологиями прямого жизнеобеспечения. Попросту говоря, жить человеку XXI века без, например, самолета, автомобиля, интернета и прочего, разумеется, очень скучно, неудобно, неуютно — в общем, плохо. Плохо, но, исходя из критерия выживания человечества как биологической популяции, можно. А вот без энерготехнологий нельзя. И не только потому, что без них невозможны ни самолет, ни интернет. Ведь становятся элементарно невозможными ни современное земледелие (а значит, еда), ни современное водоснабжение (а значит, и вода). Невозможны химия и металлургия (значит, прощай решительно все сколько-нибудь искусственное, что нас окружает). Невозможны фармацевтика и медицина (значит, уже забытые человечеством губительные эпидемии снова будут выкашивать сотни тысяч и миллионы людей). Наконец, в условиях современных мегаполисов невозможными становятся обогрев жилища, приготовление пищи...

Жалкое зрелище будет являть собой лишенное энерготехнологий человечество (точнее, немногочисленные его остатки), отброшенное, будто кошмарной машиной времени, в эпоху пещер и каменных топоров.

На рис. 1.2 средняя продолжительность жизни граждан различных стран и регионов мира показана как функция удельного в пересчете на одного жителя страны или региона годового энергопотребления — в мегаватт-часах на человека в год (МВт·час/чел. в год). Видно, что эта зависимость имеет логариф-



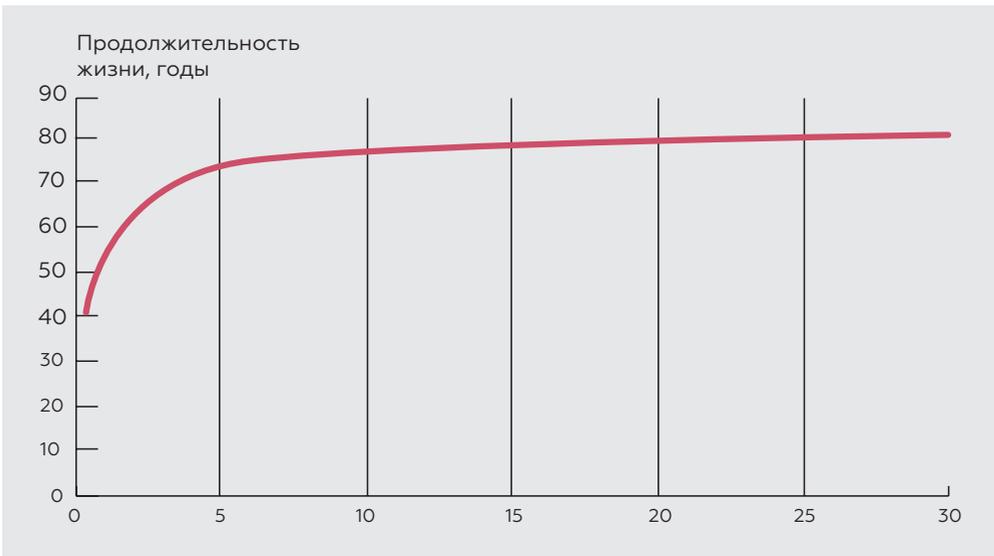


Рисунок 1.2. Потребление энергии, МВт·час/чел. в год

мический характер — при удельном энергопотреблении свыше 5–6 МВт·час/чел. в год она выходит на плато, то есть продолжительность жизни начинает определяться естественным старением и другими факторами (структурой и уровнем социального совершенства общества, качеством окружающей среды, наличием или отсутствием вредных привычек и др.). Получается, что увеличивать удельное энергопотребление сверх некоторого критического уровня не имеет особого смысла. В таких условиях становятся возможными развитие энергосберегающих технологий, оптимизация структуры топливно-энергетического комплекса страны и региона и т. п. Позже мы будем рассматривать эти вопросы. Сейчас лишь отметим, что надо очень внимательно отслеживать процесс замещения выбывающих энергетических мощностей, не допуская падения удельного годового энергопотребления ниже указанного критического.

Мораль, в общем, проста: не надо всегда безоглядно стремиться к неограниченному наращиванию производства энергии. Здесь полная аналогия с человеком, вкушающим сытную еду. Утолил голод — и хватит. Дальнейшее же поглощение пищи не сулит ничего хорошего.

О ФОРМАХ ЭНЕРГИИ И ЕДИНИЦАХ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Но один из главных вопросов, возникающих при этом, как эту энергию измерять?

Что вообще такое «измерять»? Это значит количественно определять (в этом смысле неважно, экспериментально или расчетным путем) величину чего-либо относительно некоторой величины той же размерности, согласованно принятой за единицу. Энергия не исключение. Анализируя рис. 1.2, мы уже, незаметно для себя, такую величину ввели — мегаватт (МВт). Что она означает?

Здесь мы вторгаемся, пусть и вскользь, во владения интереснейшей и важнейшей науки современности — метрологии. Это наука в том числе об установлении общепринятых единиц измерений физических величин и воспроизведении их эталонов. Понятно, что без системы таких единиц физики и инженеры всех стран оказались бы в положении строителей Вавилонской башни.

Когда на заре земледелия человек использовал мускульную силу (свою и животных) для обработки земли, мера затрачиваемой энергии определялась соответствующе — работа двух быков, трех рабов и т. д. Конечно, возникали проблемы при использовании других животных — ну как, например, было поступать со слонами при переноске бревен? При стандартизации других физических величин дело обстояло похожим образом. Например, в качестве меры длины использовалась ширина ячменного зерна,



толщина волоска с ослиной морды и прочая экзотика. Между прочим, отголоски этого метрологического разнообразия сохранились до сих пор: в качестве меры длины используется фут (длина ступни), мощности – лошадиная сила, есть и другие примеры. Но ступни у людей бывают разные, среди лошадей встречаются и беговые рысаки, и тягловые битюги. Поэтому все же нужно было выбрать универсальную, понятную для всех единицу энергии, которая характеризовала бы все возможные виды ее получения и потребления.

Такой единицей во всем мире стал джоуль (Дж), названный в честь великого английского физика Джеймса Джоуля. С введением этой единицы энергии, признаваемой Международной системой единиц (СИ) в качестве безальтернативной, все физики и инженеры мира заговорили на одном языке.

Для знакомства с миром энергии и энерготехнологий часто требуется еще одна величина, в которой измеряется энергия, полученная или потребленная в единицу времени, – мощность. Ее системной единицей является ватт (Вт), названный так в честь изобретателя-механика, создателя универсальной паровой машины Джеймса Уатта (Ватта). $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$.

Часто используются также кратные и дробные величины энергии и мощности, например кДж (1000 Дж), МВт (1 000 000 Вт) и др. Вот откуда наши мегаватты.

Но 1 Дж определяется как работа, совершаемая при перемещении точки приложения силы, равной 1 ньютону (Н), на расстояние 1 м в направлении действия силы, то есть $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \times \text{м} = 1 \text{ кг} \times \text{м}^2/\text{с}^2$. Следовательно, речь идет о чисто механической величине. А как же тогда источник теплоты – костер, с которого мы начинали наше повествование?

В науке столетиями господствовало представление о теплоте как особом веществе, содержащемся в теле. Даже и меру количества такого вещества придумали – калория (кал). Но о том, что теплота и работа как-то связаны, интуитивно догадывались и наши пращурь, добывавшие огонь трением (рис. 1.1).

Как именно связаны?

Ответ на этот вопрос дает принцип вивалентности теплоты и работы, сформулированный Р. Майером и Дж. Джоулем в 1824 году. Его

основной смысл: нет работы и нет теплоты, есть лишь разные формы одной сущности – энергии. Она не исчезает и не возникает вновь, она только переходит из одной формы в другую. При этом огромной заслугой Майера и Джоуля было экспериментальное (что очень важно!) установление количественного соотношения между работой и теплотой. Его величина оказалась очень близка к современному значению (1 Дж соответствует примерно 0,24 кал).

Значение работ Майера и Джоуля было очень велико. Мало того, что после них термодинамика как фундаментальная наука впервые обрела свое «первое правило» (взаимосвязь работы и теплоты). Именно тогда общефилософские формулировки закона сохранения энергии (а их уже тогда было много) сменились на точные количественные эквиваленты различных ее форм.

Здесь, кстати, самое время сказать, что безальтернативность джоуля как единицы энергии вовсе не тождественна запрету на использование других ее единиц. Их выбор – это вопрос целесообразности и удобства применительно к решаемой задаче, и очень скоро мы в этом убедимся. Но при этом необходимо, чтобы эти единицы могли быть однозначно сопоставлены именно с джоулем. С одной из таких единиц нам при знакомстве с атомной энергетикой придется сталкиваться очень часто.

Дело в том, что в мире атомов и ядер использовать джоуль как единицу энергии неудобно – уж очень различны масштабы объектов

и процессов. По аналогии: ведь никто не измеряет расстояния до звезд и галактик в системных (по СИ) единицах — метрах, хотя в принципе это, конечно, и возможно. Но тут в ходу иные единицы измерений (световой год, парсек), хотя с метрами они, разумеется, могут быть однозначно сопоставлены ($9,46 \times 10^{15}$ м и $3,09 \times 10^{16}$ м соответственно). И важно вот еще что. Это именно физические единицы, они имеют собственное смысловое наполнение. Световой год есть расстояние, проходимое светом за год, парсек — расстояние до условного астрономического объекта, имеющего параллакс в одну угловую секунду. Их не надо путать с кратными и дробными величинами.

Такова и новая для нас «атомно-ядерная» единица энергии — электрон-вольт (эВ). 1 эВ — это энергия, необходимая для переноса одного элементарного заряда в электростатическом поле между точками с разностью потенциалов в 1 В. 1 эВ соответствует $1,6 \times 10^{-19}$ Дж. По обиходным понятиям очень маленькая величина: энергия 10^{12} (тысяча миллиардов) эВ примерно соответствует кинетической энергии летящего комара. Но в мире атомов и ядер это как раз то, что надо, хотя и здесь могут понадобиться кратные величины: кэВ (1000 эВ), МэВ (1 000 000 эВ), иногда и другие.

А теперь вернемся к разговору о формах энергии. Вспомним определение джоуля как ее единицы: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \times \text{м} = 1 \text{ кг} \times \text{м}^2/\text{с}^2$. Но ведь кг — это масса, а $\text{м}^2/\text{с}^2$ — квадрат (вторая степень) скорости.

Скорость, конечно, разная бывает, да и зависит от многого — от выбора системы отсчета в первую очередь. Но нет ли среди скоростей какой-то великой, неизменной, фундаментальной величины, которая не зависит ни от чего и никак?

Спасибо гению Эйнштейна — есть! Это скорость света в вакууме, $2,998 \times 10^8$ м/с, — всем константам константа! И теперь перед нами новая форма энергии — масса. Ведь квадрат скорости света в великой формуле $E = mc^2$ начинает играть роль универсального, не зависящего ни от чего коэффициента пересчета!

Принцип эквивалентности массы и энергии стал подлинной революцией в естествознании, без него современная физика просто немыслима. В частности ядерная физика, а следовательно, и ядерная энергетика. Этот принцип, как мы увидим, и лег в основу ее универсального языка как отрасли науки и инженерии.

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ — ПРОГУЛКА НА МАШИНЕ ВРЕМЕНИ

Но вернемся к истории освоения человечеством энерготехнологий.

И энергия огня, и использование мускульных сил напрямую вписываются в только что сформулированные рассуждения. Огонь (ко-стер) — это высвобождение энергии, накопленной Солнцем, реализуемое через высвобождение горючих материалов и веществ с другими веществами и элементами экосферы планеты (прежде всего с кислородом). Мускульная сила — это снова высвобождение энергии, накопленной живыми организмами вследствие протекания биохимических реакций, обусловленных генетикой. Не являются исключением и другие энерготехнологии. Энергия ветра, тепла земли, приливов — все это результаты взаимодействия в общей природной системе, охватывающей не только Землю, но и космос.

В энергетике традиционно применяются два ключевых понятия — производство энергии и потребление энергии. Производство — это использование первичных источников энергии для получения необходимых потребителю ее форм: механической энергии, электроэнергии, холода или тепла — и их преобразование в промежуточные энергоносители: моторные, котельно-печные топлива, горячую воду и пар, водород и пр. Здесь надо помнить вот что. Накопленная и высвобождаемая энергия сама по себе никуда не девается — эти процессы формируют энергетический баланс в экосфере планеты, подчиняясь величайшему закону природы — закону сохранения энергии.

Если бы мы провели «сверхучет» производства и потребления энергии, то не обнаружили бы ни малейших отклонений от этого закона.

Отсюда — важнейшее следствие. Высвобождая каким-либо образом энергию и используя ее, люди должны очень внимательно следить за тем, чтобы образующиеся нарушения природного баланса не нанесли значимого ущерба экосфере планеты и условиям жизни на ней. К сожалению, уровень цивилизационного развития современного человечества, далеко ушедшего от костра и пахоты на быках (или рабах), вызывает в этом смысле очень серьезные опасения. Но об этом позже.

Долгое время список используемых человечеством энерготехнологий был очень ограниченным. Наряду с костром (во всех его модификациях) это были энергия ветра (как мы помним, с ветряными мельницами воевал еще Дон Кихот, а они существовали и раньше, как и парусный флот) и примитивных устройств, использующих энергию падающей воды (те же водяные мельницы, вроде той, на которой прятались от шайки де Брильи отважные гардемарины, водяные подъемники и еще кое-что). В энергетическом арсенале человечества ничего другого по большому счету и не имелось. Так было, хотя иногда эффективнейшее энергетическое сырье буквально падало в руки. Известно, например, что до середины XIX века нефть — кровь современных энерготехнологий — использовалась в основном как... экзотическое лекарство и смазка для колес телег, влеко- мых теми же быками.

Перелом наступил в конце XVIII века. Причины его понятны: первые паровые машины, паровозы и пароходы стремительно выдвинули на первый план новую базовую энерготехнологию — получение и использование горячего пара в качестве носителя энергии. А для этого энергии, накопленной в сухом растительном топливе (дрова), с очевидностью не хватало. Превращение энергии топлива в механическую изменило жизнь человека, превратило мир мускульной силы в мир работающих машин.

Наступила эра угля, а с ней — эпоха массового использования ископаемых топлив. Человек стал менее зависим от капризов природы, появились новые производства и стимулы к знаниям. Ведь машинист паровой машины — это не погонщик волов.

Запасов угля на нашей планете значительно больше запасов всех других органических ископаемых топлив, вместе взятых. Хотя бы уже поэтому «эпоха угля» в значительной мере продолжается и в наши дни. Во многих странах (и далеко не самых отсталых) уголь обеспечивает более половины выработки электричества, а в целом в мире — около 40%.

Но тут самое время вспомнить то, о чем мы уже говорили. Экологический баланс уже сейчас заметно нарушен из-за побочных, но неминуемых эффектов, обусловленных сжиганием угля, и это ограничивает его дальнейшее использование. Здесь и выбросы

парниковых газов, и масштабное загрязнение земных экосистем продуктами горения. Тем более что на первое место в списке важнейших ископаемых энергоисточников с конца XIX века стала выдвигаться «горючая кровь земли» — нефть.

Нефть — это энергетическое обеспечение (в основном через производные перегонки) всей современной индустрии, сердцем которой еще и поныне являются двигатель внутреннего сгорания и паровая турбина. С начала XX века нефть лихорадочно ищут по всему миру, а географическая неравномерность ее запасов и значительно различающиеся по сложности освоения месторождения уже стали (не исключено, что станут и еще) причиной многочисленных политических, а иногда и военных конфликтов. Нам хорошо известно, что именно нефть во многом определяет и финансово-экономическое положение очень многих стран и регионов.

К середине XX века стало, однако, ясно, что во многих случаях (например, для промышленного производства тепла) гораздо удобнее другое горючее органическое ископаемое — газ. С точки зрения геологии газ (в основном это метан, CH_4) является прямым родственником нефти, он часто залегают и добывается вместе с ней (попутный газ). География нефтяных и газовых месторождений обычно совпадает — страны, богатые нефтью, очень редко жалуются на отсутствие запасов газа.

В наши дни нефть и газ суммарно удовлетворяют почти 60% мировых энергетических потребностей. Однако, заводя в очередной раз бензиновый или дизельный двигатель автомобиля и ставя на газовую плиту чайник, можно было бы и задуматься: а надолго ли всего этого хватит и как долго это можно использовать? К этому вопросу мы еще вернемся.

Конечно, есть и другие виды ископаемого топлива: торф, горючие сланцы, те же дрова, — а как, вы думали, отапливаются дома и котельные небольших городов и селений в изолированных от энергосистем регионах той же Сибири? Но их роль в современном глобальном энергоснабжении весьма незначительна.

Вступив в эру техногенной цивилизации, человечество фактически целиком построило ее энергообеспечение на использовании ископаемых горючих топлив. По оценкам экспертов, сегодня

каждый человек на Земле в среднем потребляет в год энергию, которая заключена примерно в двух тоннах нефти. Если сравнить эту цифру с запасами ископаемого топлива на Земле, то с учетом прогнозов по общему развитию технологий можно приблизительно оценить время, на которое его хватит человечеству.

Например, общепланетные запасы нефти, по разным данным, составляют примерно 350–450 миллиардов тонн. Это означает, что если нынешняя структура энергопотребления на обозримое время приблизительно сохранится, то нефти хватит лишь на несколько десятилетий.

Попытаемся в дальней исторической ретроспективе и перспективе оценить роль ископаемых (литосферных) горючих топлив, основы так называемой огневой энергетики (рис. 1.3). Получим весьма впечатляющую картину: за пять тысяч исторически датированных лет истории человечества и на неограниченное будущее (начиная приблизительно с 2050 года) «эра ископаемой органи-

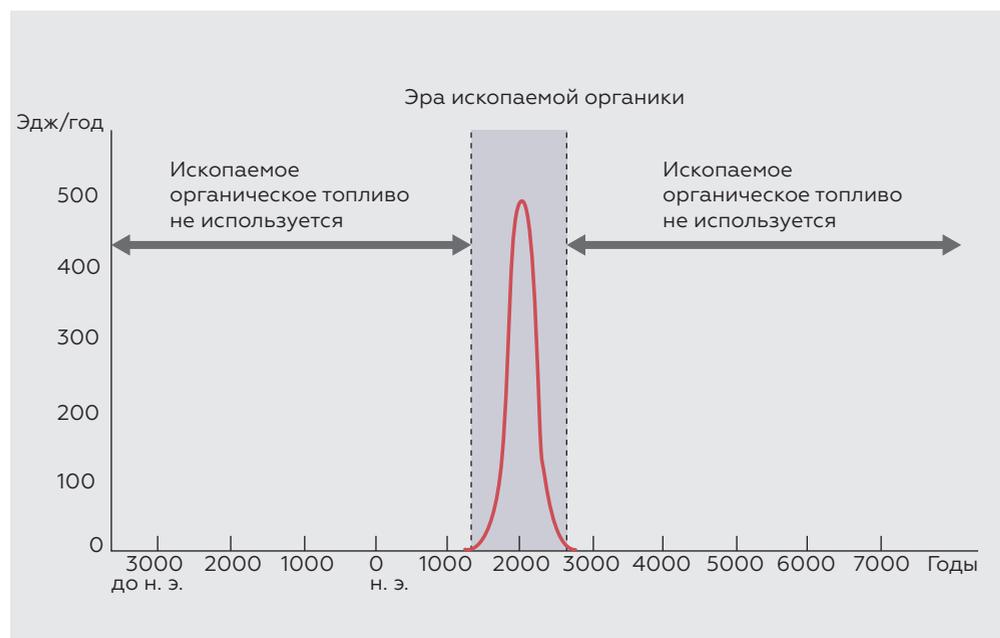


Рисунок 1.3. Органическое топливо в настоящем и будущем

ки» представляет собой узкий пик, охватывающий около пятисот лет. А что дальше? Дальше — всё, органического топлива больше нет. К тому же мы должны понимать, что человеческая инерционность, которая часто перерастает в инерционность общества, может сделать осознание этого поистине грустного факта весьма неожиданным.

И на это накладываются экологические ограничения, связанные с деградацией среды обитания из-за массового использования накопленной энергии ископаемых топлив — так называемой огневой энергетики.

КРАТКИЙ ТОЛКОВЫЙ СЛОВАРЬ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ

Что же, продолжим наше путешествие по миру энерготехнологий.

Нам пора ввести какую-то систему определений и базовых понятий, относящихся к нему. Ведь, обсуждая что-то, надо говорить на одном языке. Иначе нельзя — вспомним бессмертное высказывание Декарта: «Если сойдемся в определениях, мы избежим половины разногласий».

Сразу оговоримся, что полной, строгой однозначности в такой системе к настоящему времени нет — как нет и единого физического и технического толкования некоторых (иногда и довольно важных) терминов. Поэтому, вводя для себя понятия современной энергетики, мы будем ориентироваться на их наиболее часто встречающиеся определения.

Прежде всего введем понятия первичных энергоисточников (источников энергии) и энергоносителей. Главными отличительными чертами энергоносителей являются, во-первых, отсутствие в природе в форме, пригодной для непосредственного использования, и, во-вторых, отсутствие технологий накопления в промышленных количествах при сохранении необходимых функциональных свойств.

Классическим примером энергоносителя является электричество — это самый удобный для полезного использования энергоноситель. Но в природе в свободном виде его нет. Научиться непосредственно

использовать, например, его атмосферные проявления (приводящие к грозам) люди пока не научились, хотя попытки такого рода, обычно очень наивные, истории энергетики известны. И, к сожалению, электроэнергию пока не удастся хранить в промышленных количествах достаточно длительное время. Поэтому в каждый период производство электрической энергии, за вычетом затрат на потери при транспортировке и распределении, должно равняться ее потреблению. Это ставит задачу разработать методы и средства разумной организации и оптимального управления производством, транспортировкой, распределением и потреблением электроэнергии, что в идеале требует применения соответствующих цифровых интеллектуальных систем (типа Smart Grid).

Важнейшим достоинством электроэнергии является ее универсальность и адаптируемость практически ко всем современным технологиям, ко всем техническим комплексам, устройствам и модулям. Где было бы без электричества громадное большинство современных машин? Где были бы компьютеры? Где были бы системы связи и информатики? Говорить без надежного электрообеспечения о новом экономическом укладе, о цифровом мире, о достойном качестве жизни — это глупая сказка.

Вот почему производство электричества, или электрогенерация (иногда просто генерация), как и надежная, построенная логично и с умом система электроснабжения, является обязательным критерием нормального экономического, технологического и социального развития любой современной страны, обязательным решительно во всех смыслах. Но вот как тогда относиться к тому, что в нашем мире сейчас не менее миллиарда людей вообще не имеют доступа к электричеству? К тому, что при существующей тенденции к росту численности населения планеты к 2050 году это количество может вырасти до пяти миллиардов? Это как они будут жить-то вообще?!

А политики многих развитых стран из образующих так называемый золотой миллиард (около 12% населения Земли, потребляющих ныне около трех четвертей всей получаемой человечеством энергии) наивно удивляются: откуда берется массовая миграция? Почему эти нищие полуголодные люди, бросая все, с громадным риском для жизни рвутся к ним?

Другим классическим примером энергоносителя является важнейшая энергетическая субстанция — горячий пар под давлением. И его изначально в природе нет, и хранить его в промышленных количествах не удастся. Но именно неразлучная пара — паровая турбина и электрогенератор — во многом определяет лицо современной энергетики, а при использовании пара различаются лишь способы его получения.



Еще раз подчеркнем, что ни электричество, ни пар сами по себе энергоресурсами не являются. Это лишь энергоносители, и век электричества ни в коей мере не отменил огромной значимости первичных энергоисточников.

В энергетике часто используется также понятие «промежуточных энергоносителей». Обычно так называют некоторые вещества и материалы, которых в природе нет, но они могут быть получены из некоторого первичного естественного энергоресурса — как правило, ценой определенных затрат энергии, а иногда и смены ее формы. При этом, что очень важно, они должны храниться в любом требуемом количестве. Примером является бензин. Месторождений бензина пока никто нигде не находил (хотя, стоя на бензоколонке, иногда и хотелось бы найти). Однако, используя технологии нефтепереработки (в общем, достаточно энергозатратные), его нетрудно получить и накопить. Другим примером такого рода являются так называемые «вторичные» ядерные материалы (плутоний-239 и уран-233), отсутствующие в природе и получаемые искусственным путем. Но к ним мы вернемся позже, в главе 2.

А теперь от энергоносителей перейдем к первичным источникам энергии, которые принято делить на невозобновляемые и возобновляемые. Из них невозобновляемые имеют три характерных признака.

Во-первых, они основываются на использовании принципиально ограниченного по количеству природного энергоресурса как некоторого материального вещества. В нем и «запасена» энергия, что обеспечивает возможность ее освобождения и требуемого преобразования в соответствии с принципами эквивалентности ее форм.

Во-вторых, энергетика, основанная на использовании невозобновляемых источников, непременно нуждается в технологиях такого освобождения и преобразования. Ведь дрова, уголь, нефть, газ, уран, дейтерий сами по себе энергией не являются — для ее высвобождения им нужен костер, печь, котел, форсунка, реактор.

В-третьих (может быть, это и есть самое главное), такая энергетика обязательно предполагает адекватную оценку ее ресурсного обеспечения. Она должна отвечать на следующие вопросы:

- надолго ли хватит людям соответствующего природного энергоресурса с учетом его известных и прогнозируемых запасов, развития технологий, изменения численности населения планеты и условий жизни на ней и многих других факторов?
- каков его современный и предполагаемый вклад в общий энергетический потенциал, исходя из технологических реалий наших дней и прогнозов на ближайшее будущее?

Говоря о невозобновляемых энергоресурсах, надо иметь в виду два важных обстоятельства. Во-первых, они бывают, в общем, двух сортов. Запасы органического топлива, основы огневой энергетике (угля, нефти, газа, торфа), являются своеобразной «кладовой Солнца», формой долгосрочного хранения энергии, переданной Земле нашим светилом за сотни миллионов лет. Процесс этой передачи никогда не прекращался — он продолжается и в наши дни. Понятно, что тепловой баланс внешней среды нашей планеты существенно зависит от относительных скоростей перевода части солнечной энергии в накопленную

энергию органического топлива и обратного процесса (ее преобразования в иные формы энергии в ходе сжигания этого топлива). Надо ли говорить, что сейчас скорость техногенного освобождения накопленной солнечной энергии при сжигании органического топлива гораздо выше скорости ее естественного накопления при образовании нового, что сдвигает тепловой баланс во внешней среде в сторону дополнительного нагрева.

По-иному обстоит дело с «ядерными» природными энергоресурсами — ураном, торием и в перспективе дейтерием. Здесь мы имеем дело только с теми их запасами, которые получила наша планета в ходе своего формирования — около 4,5 миллиарда лет назад, и с тех пор они лишь уменьшались в силу естественного радиоактивного распада урана и тория. А каково здесь техногенное влияние атомной энергетике — об этом разговор еще впереди, как и вообще об экологических аспектах энергетике.

Теперь о возобновляемых источниках энергии. Их, в общем, достаточно много: энергия ветра, солнца, стока рек, приливов, земных недр, волнения морей и океанов.

Эти источники также имеют три отличительных черты. Первая напрямую следует из их названия: говорить о ресурсном обеспечении энерготехнологий, основанных на их использовании (да и вообще о ресурсах), вообще бессмысленно — оно бесконечно в том же смысле, в каком более или менее неизменны условия жизни на нашей планете.

Во-вторых, возобновляемые источники энергии не нуждаются в специальных технологиях ее получения. Например, ветер или солнечное излучение сами по себе есть энергия, готовая для использования. Тут не нужны ни котел, ни форсунка, ни реактор. Так же обстоит дело и с другими возобновляемыми источниками. Взаимное преобразование форм энергии, конечно, есть и у этих энерготехнологий, но его не надо путать с получением первичной энергии.

В-третьих, для возобновляемых источников энергии в ходе эксплуатации (это очень важное замечание!) практически отсутствуют материальные выбросы. Это вовсе не тождественно отсутствию загрязнения внешней среды вообще (оно может быть не только материальным), но вот от углекислого газа, сажи, летучих окис-

лов серы и азота, других токсичных выбросов возобновляемая энергетика по существу свободна.

Достаточно ли только этого для того, чтобы сделать решительный выбор в пользу возобновляемых источников энергии, объявив войну невозобновляемым? Поговорим об этом чуть позже.

Ясно, однако, и другое: нужен долгосрочный, обоснованный, осознанный план действий в области энергетике. И начать надо с того, чтобы определить базовые, главные энерготехнологии современности и обозримого будущего. Выбрать по триединому критерию: их совокупность должна обеспечить по меньшей мере сохранение (а лучше увеличение) достигнутого уровня энергопотребления, иметь значимое (как минимум в пределах сотен лет) ресурсное обеспечение и гарантированные возможности практической реализации.

КРИТЕРИИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ

Что же, поищем вместе. Но для этого нам надо расшифровать физико-технический смысл сформулированных выше требований. В особенности первого из них.

Прежде всего давайте нарисует энергетический портрет современного мира. Довольно удобной характеристикой для этого является вклад различных технологий в общую мировую электрогенерацию (в процентах). С учетом данных из разных источников, к 2017 году получилась вот такая картина: уголь — 38,5; природный газ — 23; нефть — 3,3; атомная энергетика — 10,3; гидроэнергетика — 15,9; возобновляемые энергоисточники и сжигание мусора вместе — около 9.

Следует заметить, что в различных странах этот вклад может сильно отличаться от среднемировых в пользу той или иной энерготехнологии. Например, в нашей стране для угля он гораздо меньше мирового (17,5%), и это очень хорошо, так как сжигание угля — очень грязная в экологическом смысле процедура. Зато в России гораздо выше среднемировой доля экологически чистой технологии генерации — атомной энергетике (18,3%).

Другая важная характеристика энергетике — это так называемый

топливно-энергетический баланс (ТЭБ). Его смысл и структура гораздо сложнее, чем у электрогенерации, а главным различием по существу (с некоторым упрощением) является учет, помимо генерации, и энерготехнологий, которые не предусматривают непосредственного системного перевода получаемой первичной энергии в электрическую. В основном это транспорт, получение промышленного тепла и теплоснабжение населения.

Понятно, что в структуре ТЭБ, по сравнению с генерацией, резко возрастает доля нефти и ее производных, а также газа. Например, в мировом ТЭБ доля нефти составляет 40% против 3,3% в мировой генерации, в российском — 21% против 1,2%. Кстати, в информационном пространстве путаницы на этот счет хватает — как при обсуждении понятий электрогенерации и ТЭБ по существу, так и по соответствующим показателям.

А теперь поставим себя на место инженера-энергетика, выбирающего перспективную энерготехнологию настоящего и в ближайшей перспективе будущего, исходя из упомянутого нами ранее триединого критерия. Понятно, что здесь просто слов мало. Нужно учесть огромное количество тесно взаимосвязанных важнейших физико-технических характеристик, а также экономических, экологических, социальных, политических и других факторов. Сколько-нибудь подробное их рассмотрение выходит за пределы нашей книги, и здесь мы обратим внимание прежде всего на две характеристики нашей энергоустановки — плотность передачи энергии и коэффициент готовности.



Плотность передачи энергии — это мощность, снимаемая с единицы площади приемника в ходе работы установки.

Таким приемником является, например, поверхность теплообменника угольного или газового котла, рабочая площадь лопастей ветрового генератора или водяной турбины, внутренняя поверхность тепловыделяющего элемента ядерного реактора, площадь солнечной батареи. Понятно, что чем плотность передачи энергии выше, тем лучше. Ведь она определяет площадь, необходимую для сооружения электростанции или теплоцентрали заданной мощности.

Коэффициент готовности, с некоторым упрощением, — это безразмерная величина, равная отношению числа дней за некоторый (достаточно длительный, не менее года) период, в течение которого технически возможна работа установки на номинальной мощности, к общему числу дней в этом периоде. Он всегда меньше единицы, но чем ближе к ней, тем лучше. Мало кому нужна энергоустановка, которая в процессе эксплуатации больше стоит, чем работает. Кроме того, очень важно, является ли коэффициент готовности управляемым — иными словами, чем обусловлено его отличие от единицы. Если мероприятиями, заранее запланированными по началу и длительности (ремонтно-профилактические работы, регламентные технологические паузы), то в этих случаях всегда предусматривается (и реализуется) маневр оставшимися мощностями, позволяющими избежать сбоев в энергоснабжении. Но вот если эти технологические паузы установка выбирает себе сама, то это никуда не годится. Самая плохая технология — это непрогнозируемая технология.

В контексте выполнения всех этих требований мы и рассмотрим основные энерготехнологии настоящего и будущего — без анализа за частности, широкими мазками.

Огневая энергетика, основанная на сжигании ископаемой органики, способна обеспечить как минимум достигнутый уровень энергопотребления — как мы видели, она-то его и определяет. Реализующие ее установки характеризуются довольно высокими значениями плотности передачи энергии (десятки и сотни кВт/м²) и управляемого коэффициента готовности (в среднем около 0,8). Но уже известные нам ее ресурсные ограничения и экологическая, мягко говоря, небезупречность (о чем разговор еще впереди) ставят определенные пределы ее дальнейшему развитию.

Вот теперь обратимся к возобновляемым источникам. Мы уже знаем, что за их ресурсное обеспечение беспокоиться не надо — его можно с чистой совестью считать бесконечным. Это очень хорошо: выполнение второго требования (из трех сформулированных нами ранее) налицо. Как и третьего (гарантированность технической реализуемости). Ведь полезное использование, например, энергии ветра, солнца и падающей воды известно людям с незапамятных времен, и соответствующие технологии с тех пор на месте тоже, разумеется, не стояли.

А вот выполнение первого требования (техническая возможность обеспечить хотя бы существующий уровень мирового энергопотребления) для энергетики на возобновляемых источниках является большой проблемой. Тут в полной мере проявляются ее врожденные пороки.

Первый (вероятно, главный) — чрезвычайно низкая плотность передачи энергии, ее «рассеянность». Вместо десятков и сотен кВт/м², типичных, как мы знаем, для огневой энергетики, — десятые (для средних широт и нормальных погодных условий) доли кВт/м² для ветровой и солнечной, тысячные доли — для приливной, сотысячные — для геотермальной и т. д. Исключением является гидроэнергетика: для нее характерна достаточно высокая плотность передачи энергии (порядка 100 кВт/м²), о чем разговор далее.

Прямым следствием этого является резкое возрастание производственных площадей электростанций и, соответственно, площадей отчуждаемых земель (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Площади отчуждаемых земель (в среднем) для выработки одинакового количества электроэнергии (относительно АЭС)

Тип электростанции	АЭС	ТЭС			ГЭС	Солнечная	Ветровая
		мазут	газ	уголь			
Площадь, га	1	1,4	2,4	3,8	420	160	270

Используя данные табл. 1.1, нетрудно оценить, например, гипотетические последствия полного замещения ветровыми электростанциями всех генерирующих мощностей Франции. Это атомная страна, там доля ядерной генерации очень велика (около 70% – против 10,3% в мире и 18,3% в России). И если все французские АЭС виртуально заменить ветряками, это потребует энергетического отчуждения порядка одной десятой территории страны – включая Альпы и Лазурный Берег!

Вынужденно огромные площади энергостанций на возобновляемых источниках влекут за собой резкое увеличение удельных (на единицу произведенной энергии) натуральных и стоимостных затрат на материалы и оборудование при их сооружении и эксплуатации. Например, для сооружения всего лишь 1 км² простейших солнечных коллекторов требуется около 10 000 тонн алюминия и примерно столько же железа. А ведь их еще получить надо – естественно, тоже затратив на это энергию, и немалую!

Очень скверно у возобновляемой энергетики обстоит дело и с коэффициентом готовности. Он и вообще низок (для ветровой и солнечной энергетики лежит в интервале 0,2–0,4), однако печальнее всего, что, в отличие от огневой энергетики, он не является управляемым. Это и понятно: например, эффективность ветрового генератора в основном определяется направлением ветра и его силой, а они человеком не контролируются. В этом смысле с солнечными электростанциями и то лучше, поскольку всем заранее понятно, что по ночам они работать не будут. Хотя от трудно прогнозируемой и неуправляемой облачности их эффективность тоже зависит очень сильно.

Вывод: жаль, конечно, но реальная значимость, да и обозримые перспективы ветровой, солнечной, приливной, геотермальной и прочих возобновляемых энергетик абсолютно несоизмеримы с надеждами, которые возлагают на них политики и экологические активисты и шумно представляют в средствах массовой информации. Несοизмеримы не по технологическим, а по фундаментальным физическим причинам и природным условиям. В одиночку с ролью энергетического спасителя человечества они, с очевидностью, не справятся.

Некоторое исключение здесь составляет гидроэнергетика: для нее коэффициент готовности выше (0,5–0,6) и в основном управляем. В совокупности с высокой плотностью передачи энергии на ГЭС это обуславливает особую роль гидроэнергетических ресурсов среди возобновляемых источников: на их долю, как мы знаем, в мировой энергетической корзине приходится почти шестая часть, а это довольно много.

Физическая причина этого ясна сразу: носитель гидроэнергии (вода) относительно просто концентрируется в значительном объеме с большим энергетическим эквивалентом накопленной массы. Для освобождения этой энергии достаточно с помощью плотины создать пороговую разность уровней реки выше и ниже ГЭС (напор) и направить падающий поток на турбину через специальные тоннели. Для сравнения: попробуйте, например, сконцентрировать ветер...

Можно добавить, что рекордные показатели удельного энергопотребления (свыше 20 МВт·час/чел. в год) в скандинавских странах, а также в Австрии и Швейцарии во многом объясняются производством значительных количеств дешевой гидроэнергии.

Увы... Главной проблемой, резко ограничивающей глобальные перспективы гидроэнергетики, являются побочные экономические и экологические, а иногда и социальные последствия создания разности уровней реки выше и ниже плотины ГЭС как условия накопления необходимого энергетического потенциала.

Вовсе не случайно гидроэнергетика в Скандинавии, Австрии и Швейцарии базируется на значительном количестве сравнительно небольших ГЭС, сооруженных на горных реках (что соответствует общему природному рельефу этих стран). Ущелистые русла таких рек позволяют добиться значительного напора при минимальной внешней площади водохранилища, образуемого при сооружении плотины. Соответственно, не слишком большой будет и площадь затопляемых при этом земель, что делает такие ГЭС приемлемыми экономически и экологически.

Совсем иная картина на равнинных реках. Здесь для обеспечения необходимого напора используются хорошо известные россиянам циклопические масштабы. И при сооружении плотин (что резко ухудшает инвестиционную привлекательность про-

ектов), и при образовании искусственных морей происходит затопление громадных площадей выше по течению реки (с неизбежными как экономическими, так и в особенности экологическими потерями). Отсюда и очень неблагоприятный общий показатель мировой гидроэнергетики по площади отчуждаемых земель (табл. 1.1).

А ведь именно равнинными являются крупнейшие ГЭС мира – в частности, в России, для которой гористый рельеф, в общем, нехарактерен. И уж кому-кому, а россиянам хорошо известна цена побед над природой, одерживаемых при сооружении таких ГЭС. Безвозвратная потеря земель, не только представляющих огромную экономическую ценность, но и имеющих ни с чем не сравнимую социальную значимость. Деградация водных и прибрежных экосистем, исчезновение десятков биологических видов. Климатические, гидрологические и литосферные изменения – как минимум регионального масштаба...

Поэтому у гидроэнергетики как энергии будущего весьма скромные перспективы. При естественных различиях в частностях прогнозов на этот счет все они совпадают в главном: возрастания ее доли ни в электрогенерации, ни в общей структуре ТЭБ ожидать не приходится. Напротив, более вероятным представляется ее уменьшение.

В МИРЕ: КАК ОБСТОЯТ ДЕЛА И НАДОЛГО ЛИ ХВАТИТ?



Вернемся теперь к рис. 1.2. К населению стран, лежащих на плато кривой годового энергопотребления на душу населения, членов «клуба энергетического изобилия», относятся (по данным на 2018 год) жители большинства стран Западной, Средней и Северной Европы, Японии, США, Канады, стран Персидского залива. К нашему счастью, попала в этот список и Россия. Именно жители этих (и немногих других) стран формируют упомянутый выше энергетический золотой миллиард.

А что же дальше? Как долго будут сохраняться такие различия в удельном энергопотреблении, в кругу специалистов получившие вы-

разительное название «энергетический империализм»? Каковы в этой связи прогнозы на величину общего мирового энергопотребления? За счет чего его обеспечивать? Хватит ли для этого ресурсов и технологических возможностей, хватит ли запаса экологической прочности нашей планеты? И самое главное: как сделать так, чтобы хватило?

Начнем с различий в удельном энергопотреблении. Нет никаких сомнений: они будут уменьшаться. Наивно предполагать, что на нынешнем «нищенском» уровне по этому важнейшему показателю останутся, например, Индия и Индонезия (по 1 МВт на человека в год), Китай (4,8). Ведь речь идет о «странах-драконах» – крупнейших государствах современности со стремительно развивающейся экономикой. Но в наше время развивать экономику практически невозможно без адекватного развития и социальной сферы. И никакие прямые или косвенные призывы и требования к этим государствам со стороны политиков золотого миллиарда и его же экологов вроде Греты Тунберг любыми способами ограничить рост удельного энергопотребления услышаны не будут. Ответом, и вполне логичным, станет: «На себя оборотись». А численность населения этих стран составляет свыше трети общепланетного и продолжает быстро расти и в наши дни. К тому же есть и другие развивающиеся страны...

Вывод очевиден: производство энергии в мире в обозримое время будет возрастать. За последние полвека оно увеличилось почти вчетверо, и эта тенденция, несомненно, сохранится. Остается понять: за счет чего можно обеспечить этот рост?

Если на возобновляемую энергетику здесь, как мы видели, большой надежды нет, то настало, наверное, время провести инвентаризацию всех ископаемых топливно-энергетических запасов нашей планеты – и не только горючей органики.

Результаты такой «инвентаризации», по данным из различных источников, показаны на рис. 1.4. В ней учитывались лишь те ископаемые ресурсы, целевое применение которых находится в пределах практически освоенных технологий, готовых к инженерной реализации. По факту это означает, что мы исключаем из рассмотрения природный дейтерий, так как потенциально исполь-



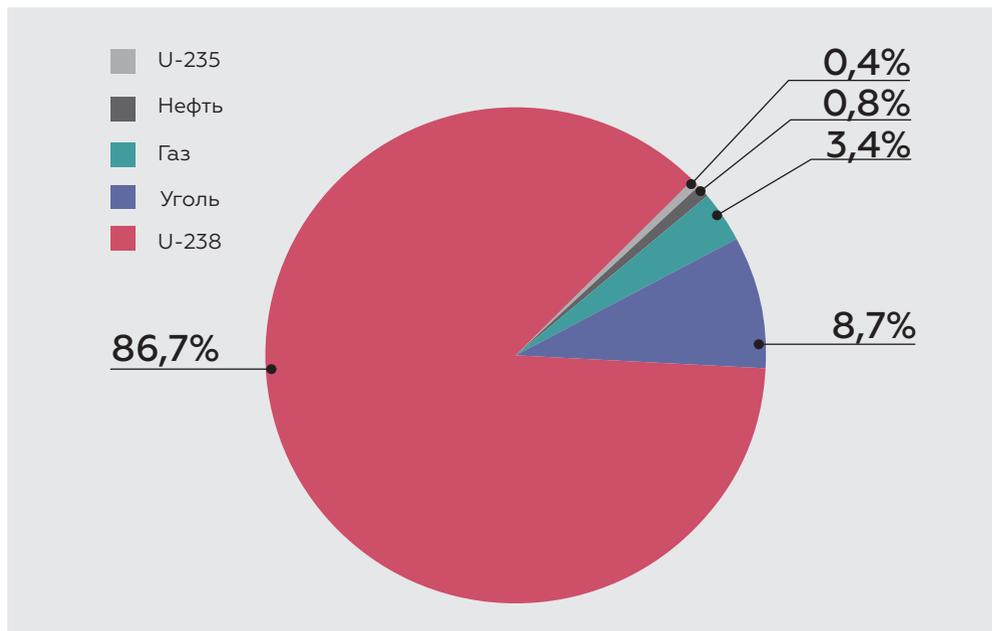


Рисунок 1.4. Относительное содержание энергии в различных топливных ресурсах

зующая его термоядерная энергетика таковой пока не является, и неизвестно, когда будет являться.

Результат инвентаризации оказывается довольно неожиданным. Почти 87% от всей «ископаемой» энергии на нашей планете содержится в одном единственном веществе – уране! Но вот как технически использовать его, мы пока не обсуждали.

Мы уже знаем, что, в отличие от органических горючих ископаемых, уран «накопленным даром Солнца» не является. Его наличие на нашей планете – следствие процессов, происходивших в начальное время формирования Земли, и все время существования человеческой цивилизации уран покорно «стоял в очереди» на разумное энергетическое использование.

Вот мы и переходим к атомной энергии. Рассмотрение ее физических и инженерных основ у нас впереди, в главе 2. Здесь же ограничимся общими предварительными замечаниями.

НА СЦЕНУ ВЫХОДИТ АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Мы начинаем изучать принципиально новый источник энергии, овладение которым является, может быть, важнейшей технологической революцией на нашей планете после «изобретения» костра.

Прежде всего давайте рассмотрим современную атомную энергию с позиции сформулированных нами ранее требований инженера-энергетика. Плотность передачи энергии рекордная: от топлива к теплоносителю через оболочку тепловыделяющего элемента ядерного реактора – около 1000 кВт/м²! Коэффициент готовности атомной энергетика очень высок (в среднем приблизительно 0,8) и практически полностью управляем, его зависимость от суточных и погодных-климатических факторов отсутствует. О ее практической реализуемости речь, понятно, вообще не идет: современная атомная энергетика – вполне реальная часть индустриально-технологического пейзажа нашего времени, обеспечивающая, как нам известно, около 10% мировой выработки электроэнергии и 18,3% российской. А на вопрос о ее ресурсном обеспечении вполне наглядно отвечает [рис. 1.4](#).

Но есть здесь и еще одна проблема, ставящая скорейшее развитие атомной энергетика в число главных технологических приоритетов современности. Сразу отметим как факт, что практическая реализация этой проблемы не предполагает и не предусматривает каких-либо материальных выбросов во внешнюю среду – ни в какой форме.

Высвобождаемая человеком энергия, как и побочные продукты ее получения, сами по себе никуда не деваются – они влияют на параметры многочисленных балансов в экосфере Земли. Поэтому, высвобождая каким-либо образом энергию и используя ее, необходимо очень внимательно следить за тем, чтобы возникающие из-за этого изменения этих параметров не нанесли значимого ущерба экосфере нашей планеты и условиям жизни на ней. К сожалению, в этом вопросе уровень цивилизационного развития современного человечества, далеко ушедшего в технологическом развитии от костра и пахоты на быках (или рабах), часто вызывает серьезные опасения.

Одно из основных правил фундаментальной экологии – правило одного процента – гласит: отклонения значимых параметров естественных процессов за пределами одного процента от долговременных равновесных значений вызывают качественные изменения систем, где эти процессы происходят, – вплоть до разрушения этих систем.

Одним из главных процессов, обеспечивающих людям (да и вообще всему живому) саму возможность жить на нашей планете, является круговорот углерода в природе, а важнейшим его звеном – выделение и поглощение углекислого газа (CO_2) в атмосферу. Непременное условие устойчивости экосферы Земли – равновесие между этими процессами. Иными словами, годовые количества выделившегося в атмосферу и поглощенного из нее CO_2 должны приблизительно совпадать, формируя некоторую равновесную величину. Ее современное значение экологам хорошо известно – это $5,5 \times 10^{11}$ тонн CO_2 в год. Применяя правило одного процента, получим, что относительно безопасным дополнительным выбросом CO_2 будет величина около $0,5 \times 10^{10}$ т/год. На деле же только огневая энергетика выбрасывает сейчас приблизительно $5,5 \times 10^{10}$ тонн год – в семь раз больше! А ведь именно она, как мы знаем, определяет лицо современного энергетического хозяйства человечества!

Так, хорошо известна роль дополнительных выбросов CO_2 при возникновении так называемого техногенного парникового эффекта, который может привести к изменению температурного режима планеты. Про выбросы мы уже знаем. А вот теперь немного о температурном режиме. Год 2018-й, по оценке климатологов, входит в число четырех самых теплых лет за всю историю метеонаблюдений, а остальные три теплых года – это 2015, 2016 и 2017-й. В целом же наиболее интенсивный рост средней температуры на поверхности Земли наблюдается именно в последние 50–60 лет (рис. 1.5) и обнаруживает корреляцию с динамикой развития мощностей огневой энергетики.

В сфере энергетики немедленные выводы и действия недопустимы в принципе – вспомним об уже известной нам роли промышленных способов получения энергии как технологий прямого жизнеобеспечения. Но каменный век закончился не потому, что ис-

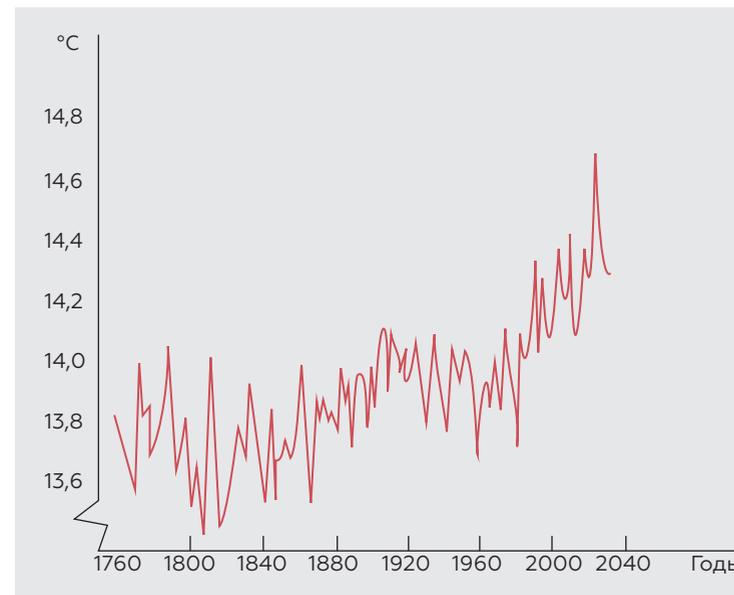


Рисунок 1.5. Рост средней температуры на поверхности Земли в течение последних 250 лет

чезли камни. Огневая энергетика должна понемногу уменьшать свой вклад в энергообеспечение общества не потому, что станут иссякать ее топливные ресурсы. И надо как можно быстрее, без паники, но и без промедлений, научно и технологически обеспечить этот процесс, надо искать пути промышленного развития «большой» энергетике, свободной от масштабного сжигания органического топлива – и от сопутствующих этому выбросов. Где искать эти пути? Мы знаем, что технологии возобновляемой энергетики таких выбросов не дают, но и создать лишь на их основе современную систему надежного энергоснабжения общества не получится. И в наши дни, и на обозримое время вперед существует единственная реализуемая на практике технология, обеспечивающая совместное выполнение только что сформулированных требований. Это атомная энергетика. Никаких иных по-настоящему масштабных энерготехнологий, позволяющих, не снижая достигнутый уровень энергообеспечения человечества, предотвратить дальнейшую деградацию экосферы планеты, просто не существует.



Но только ли физико-технические и экологические вопросы ставит перед человечеством развитие атомной энергетики? Нет. Ведь человечество должно ясно осознавать, что овладение ядерной энергией освобождает совершенно фантастические по масштабу силы микромира и Вселенной, а с ними шутить нельзя. Вот почему эта новая энерготехнология требовала (и требует) для своей реализации не только техники, сложность и уровень которой совершенно не сопоставимы ни с чем из того, что было известно до этого людям, но и нового цивилизационного взгляда на мир — и на место в этом мире людей. Они должны ясно понимать, что, овладев ядерной энергией, человечество не только обретает более комфортные условия существования, но и берет на себя дополнительную технологическую и социальную ответственность.

Впрочем, разговор об этом еще впереди. А сейчас о другом.

ЧТО ЛУЧШЕ?

Меня всегда удивляет вопрос, часто задаваемый применительно к энерготехнологиям, — какая из них лучше?

Удивляет бессмысленность постановки этого вопроса. Надо же понимать, что энерготехнологии — способы получения, преобразования и использования энергии, о которых я рассказывал вам, — это одно. А вот энергетика — это нечто иное. Она гораздо шире и включает в себя не только энерготехнологии как таковые, но и показатели потребления энергии, сети для ее передачи и распределения, особенности энергоустановок и обеспечивающих их инфраструктур, экономические критерии и т. д. А здесь требуется одновременный учет огромного множества факторов и тенденций их развития. Здесь и физика, и инженерия, и экономика, и политика, и географические, климатические и промышленно-производственные характеристики регионов, и экологические обстоятельства, и распределение населения по областям и в стране в целом, и уровень его образованности и культурного развития, и многое другое.

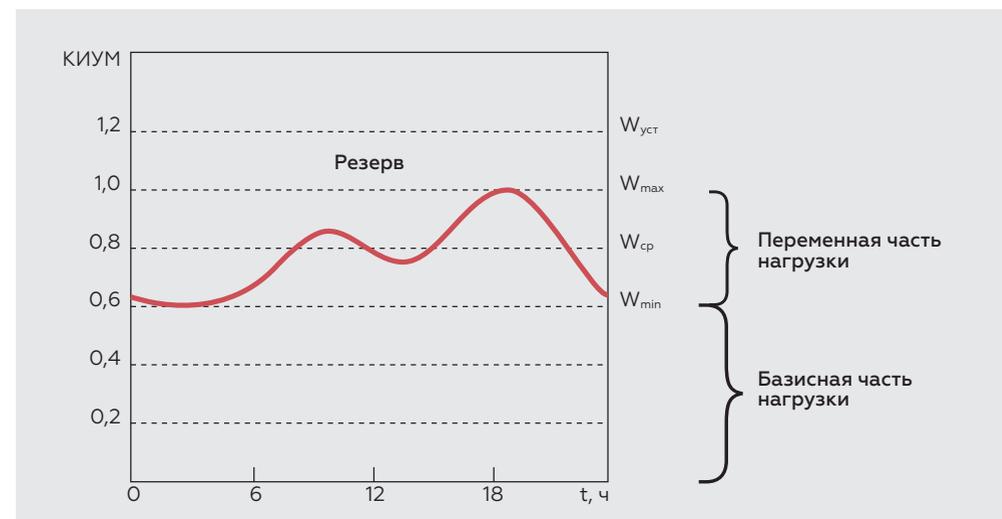


Рисунок 1.6. Суточный график использования электроэнергии

Вот вам простейший пример. Хорошо известно, что потребление электричества в течение суток неоднородно (рис. 1.6): оно сильно возрастает в дневные часы и уменьшается в ночные. Почему — понять несложно. Ночью работают в основном лишь производства непрерывного цикла и службы жизнеобеспечения. Другие же предприятия и учреждения по ночам не работают, а люди и вовсе спят. С другой стороны, большинство современных АЭС эксплуатируются в режиме постоянной выдаваемой мощности, близкой к номинальной. Иной режим работы (так называемое. суточное маневрирование мощностью) для современных реакторов, в общем, технологически неблагоприятен.

Решение в данном случае напрашивается само собой: АЭС должны обеспечить базовую часть суточного графика потребления, а его пиковые участки должны лечь на иные энерготехнологии, где изменение выдаваемой мощности обеспечивается «меньшей кровью». Это могут быть и газ, и возобновляемая энергетика. Тут всем энерготехнологиям может найтись место. Такие решения в теории принятия решений называются ситуативными.

Конечно, приведенный пример — один из наиболее простых при анализе функционирования структуры энергетике. Но он хорошо иллю-

стрирует непреложную истину: при решении задач энергетики какие-либо однозначные категорические призывы – в особенности начинающиеся со слова «долой» (вроде «Долой атомную энергетику!») – должны быть совершенно исключены.

Здесь решения должны быть в высшей степени взвешены и ситуативны, без каких-либо криков и митингов.

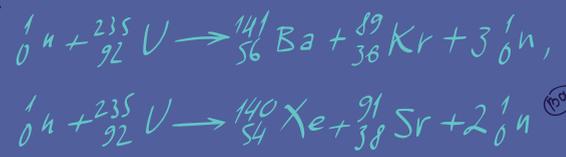


Нельзя забывать мудрые слова академика Л. Д. Ландау: «Энергетика – это не наука, а, скорее, здравый смысл».

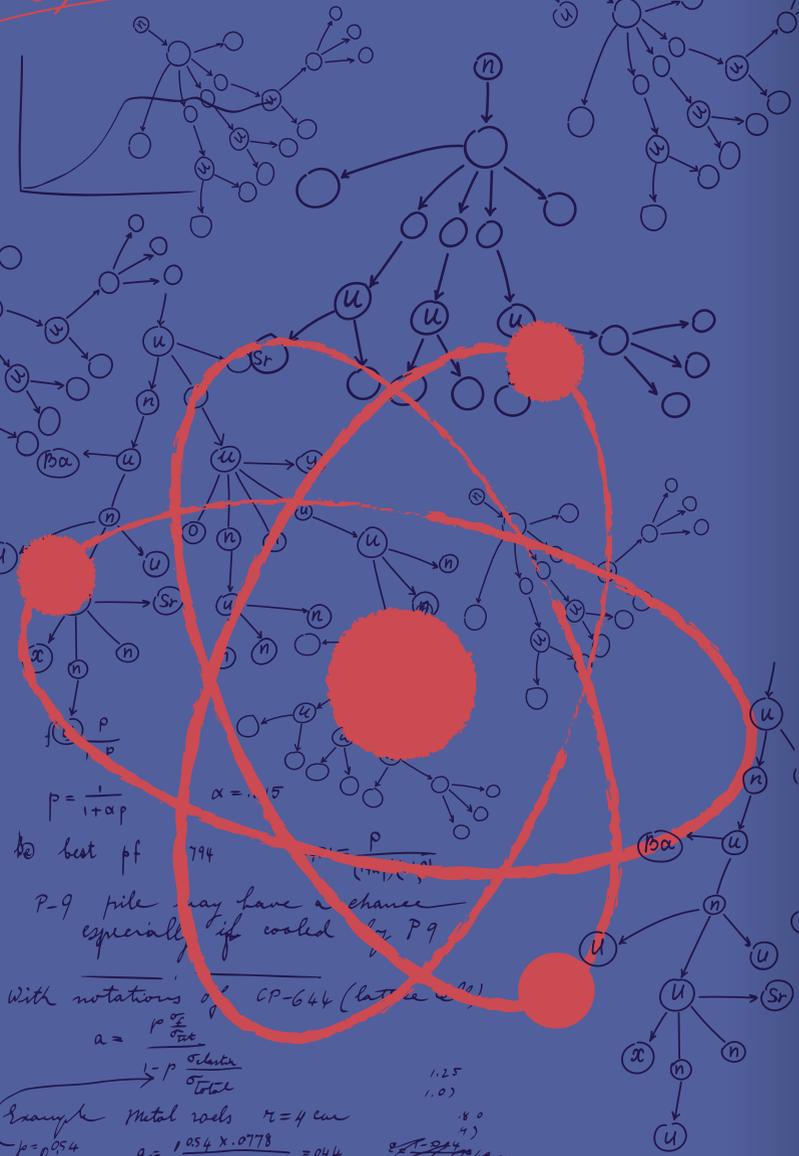
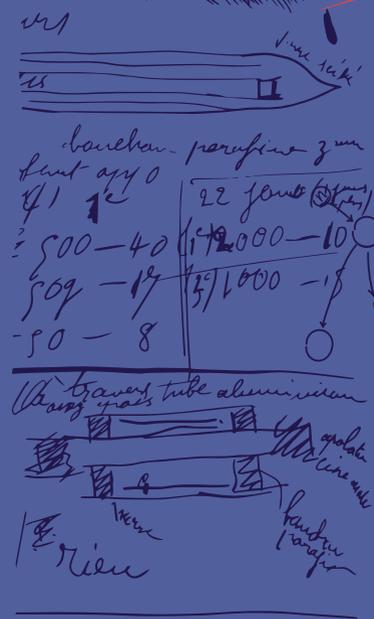
Вот этими словами мы и закончим общий обзор современных энерго-технологий.

НЕМНОГО ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ДЛЯ ПЕРВОГО ЗНАКОМСТВА С АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКОЙ

Глава 2



W. B. Rutherford



$\frac{1}{L} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho^2 - \rho}{2m} - \frac{Z e^2}{r}$
 $\alpha = \frac{h^2}{2m c^2}$
 $\rho = \frac{1}{1 + \alpha p}$
 $\alpha = 1.15$
 best pf 794
 P-9 pile may have a chance especially if cooled by P9
 With notations of CP-644 (late 1940s)
 $a = \frac{\rho_{\text{react}}}{\rho_{\text{total}}}$
 Example metal rods $\kappa = 4 \text{ cm}$
 $\rho = 0.954$
 $\sigma = 0.35$
 $\frac{\sigma}{\Sigma} = \frac{0.35}{4.5}$
 $\nu = 2$
 $\text{Formation} = .538 + 2.096(1-L)(1-P)$
 Loss
 for P9 volume ratio ~ 7 $\rho = 8$ $f = .97$
 $\nu^2 (1 - 0.97) = 2.17$ $E = 1.068$



АТОМ И АТОМНОЕ ЯДРО: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Итак, мы приступаем к рассмотрению физических основ ядерной энергетики. Но перед этим нам надо понять, с какими объектами приходится иметь дело в микромире.

Атом – основа материи нашего мира. Это электрически нейтральная структура, в состав которой входит положительно заряженное ядро и отрицательно заряженные электроны, сгруппированные на определенных электронных оболочках. Заряд ядра атома в точности равен суммарному заряду всех его электронов. Отрицательный заряд каждого электрона и положительный заряд каждого из его носителей в ядре (протона) является так называемым единичным, или элементарным (меньших зарядов в природе не существует). Поэтому общие заряды ядра атома и его электронов – всегда целые числа, характеризующие тот или иной элемент Периодической системы Менделеева (в которой для каждого элемента предусмотрен индивидуальный символ). Состав и структура электронных оболочек определяют химические свойства элементов.

Типичные размеры атома – порядка 10^{-8} см. При рассмотрении атомов и состоящих из них молекул обычно вводится особая величина – ангстрем (Å). $1 \text{ Å} = 10^{-8}$ см. Например, размер молекулы воды составляет около 2 Å. Ангстрем не имеет какого-либо самостоятельного физического смысла – это условная величина, вводимая лишь для удобства.

Характерный порядок энергии атома как структуры материи – единицы/десятки электронвольт (эВ) для электронов на внешних (валентных) оболочках, единицы/десятки кэВ – для электронов на внутренних. Типичная энергия, выделяемая в атомно-молекулярных превращениях, того же порядка, что и энергия связи валентных электронов, – единицы/десятки эВ. Например, при экзотермическом окислении атома углерода до молекулы углекислого газа (эта реакция является основой подавляющего большинства процессов огневой энергетики) выделяется около 4 эВ энергии.

Атомным ядром (нуклидом) называется положительно заряженный объект, находящийся в центре атома и содержащий в себе практически всю его массу. В его состав входят протоны — элементарные частицы с единичным положительным зарядом и нейтроны — электрически нейтральные элементарные частицы. Массы протонов и нейтронов очень близки. Общий заряд ядра (всегда целая величина) численно равен сумме всех протонов в нем.

Характерный размер ядра — примерно 10^{-13} см. Например, диаметр протона — около $1,5 \times 10^{-13}$ см. Для описания столь малых величин часто используется специальная единица — ферми (фм), $1 \text{ фм} = 10^{-13}$ см. Как и ангстрем, ферми как единица не имеет самостоятельного физического смысла и вводится лишь для удобства. Нетрудно видеть, что объем ядра в сравнении с объемом атома ничтожно мал (порядка $10^{-13}\%$).

Следует заметить, что величины, характеризующие размеры атомов и ядер, являются условными в том смысле, что господствующие в микромире законы квантовой механики вообще исключают понятие точных геометрических величин — там действуют вероятностные принципы. Например, понятие «электронной орбиты» как точного соответствия координаты электрона и определенного времени не имеет в квантовой механике физического смысла.

Нуклиды, сохраняющие нуклонный состав и энергетическое состояние в течение неограниченно долгого времени, называются

стабильными; в противном случае речь идет о радиоактивных нуклидах, или о радионуклидах.

Для краткости написания все нуклиды обозначаются в соответствии с общепринятой символикой. С левой стороны от химического знака (символа) нуклида сверху ставится суммарное количество протонов и нейтронов в его ядре (A), называемое массовым числом. Снизу слева ставится заряд ядра нуклида Z в единицах элементарного заряда, соответствующий числу содержащихся в нем одних лишь протонов. На практике это число в символьных обозначениях часто опускается, поскольку заряд ядра однозначно определяется его положением в таблице Менделеева и, следовательно, выбранным для этого ядра химическим символом. Так, например, символ «U» (уран, 92-й по счету элемент в таблице Менделеева) соответствует числу $Z = 92$ и никакому иному. Число нейтронов (N) в символьном обозначении нуклида обычно отсутствует, так как $N = A - Z$. Конечно, все эти числа целые.

Приведем для примера символьное обозначение урана-235 — ^{235}U . В текстовом изложении массовое число часто пишется через дефис после языкового названия элемента (как в нашем примере) или после его символа (U-235). По смыслу все эти обозначения одинаковы.

Радионуклиды часто называют изотопами. Это неверно: таким понятием определяется совокупность нуклидов (как стабильных, так и радиоактивных), обладающих одинаковым числом протонов Z (и вследствие этого тождественных химически, поскольку эти нуклиды имеют, естественно, одинаковый атомный номер, принадлежащий одному и тому же элементу), однако разным количеством нейтронов N . Например, водород имеет три изотопа, все ядра которых имеют по одному протону, но обычный водород (^1H , протий) не имеет нейтронов вообще, водород-2 (^2H , дейтерий) имеет один нейтрон, и водород-3 (^3H , тритий) — два нейтрона. Протий и дейтерий стабильны, тритий радиоактивен. Инертный газ ксенон (Xe) имеет 36 изотопов, из которых 9 стабильны и 27 радиоактивны. У многих существующих в природе элементов имеется лишь по одному стабильному изотопу. Таковы, например, фтор (стабилен лишь ^19F), алюминий (^{27}Al), йод (^{127}I), золото (^{197}Au); такие эле-

менты часто называют моноизотопными. Элементы с атомными номерами более 83 (начиная с полония — Po), а также два элемента середины таблицы Менделеева (технеций, Tc, $Z = 99$, и прометий, Pm, $Z = 61$) стабильных изотопов не имеют вовсе. Ядра с зарядом $Z > 92$ (уран) и массовым числом $A > 238$ в природе отсутствуют, все они получены искусственным путем. Понятие изотопа отдельно от соответствующего элемента лишено смысла.

Помимо ядер с одинаковым зарядом (изотопов), можно выделить также группы нуклидов, имеющих одинаковое массовое число (изобары) и одинаковое число нейтронов (изотоны).

Несколько примеров:

- изотопы (водорода; $Z = 1$): ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{H}$;
- изобары ($A = 12$): ${}^{12}\text{N}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{12}\text{B}$, ${}^{12}\text{Be}$;
- изотоны ($N = 6$): ${}^8\text{He}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{N}$.

Вернемся на некоторое время к радионуклидам. Важнейшей характеристикой каждого из них является величина так называемого периода полураспада ($T_{1/2}$). Это время, требующееся для распада половины некоторого начального количества его ядер.

Например, хорошо известно, что радиоактивное загрязнение территорий и объектов после тяжелой аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году в настоящее время определяется в основном излучением цезия-137. В природе его нет — эти ядра образовались искусственным путем как осколки деления урана-235 в ядерном топливе. Что это такое, мы скоро узнаем. А сейчас лишь скажем, что $T_{1/2}$ цезия-137 составляет тридцать лет. То есть через тридцать лет останется половина от его начального количества, через шестьдесят лет — половина из оставшейся половины ($1/4$), через девяносто — $1/8$ и т. д. Временная динамика радиоактивного распада цезия-137 показана на рис. 2.1. Такой закон называется экспоненциальным. Так что к 2016 году начальное количество этого радионуклида, попавшее во внешнюю среду, уменьшилось наполовину, к 2046 году от него останется четверть, и этот процесс продолжится и далее — его нельзя ни ускорить, ни замедлить. Потому что период полураспада для каждого радионуклида строго индивидуален, искусственно изменить его нельзя никакими способами.

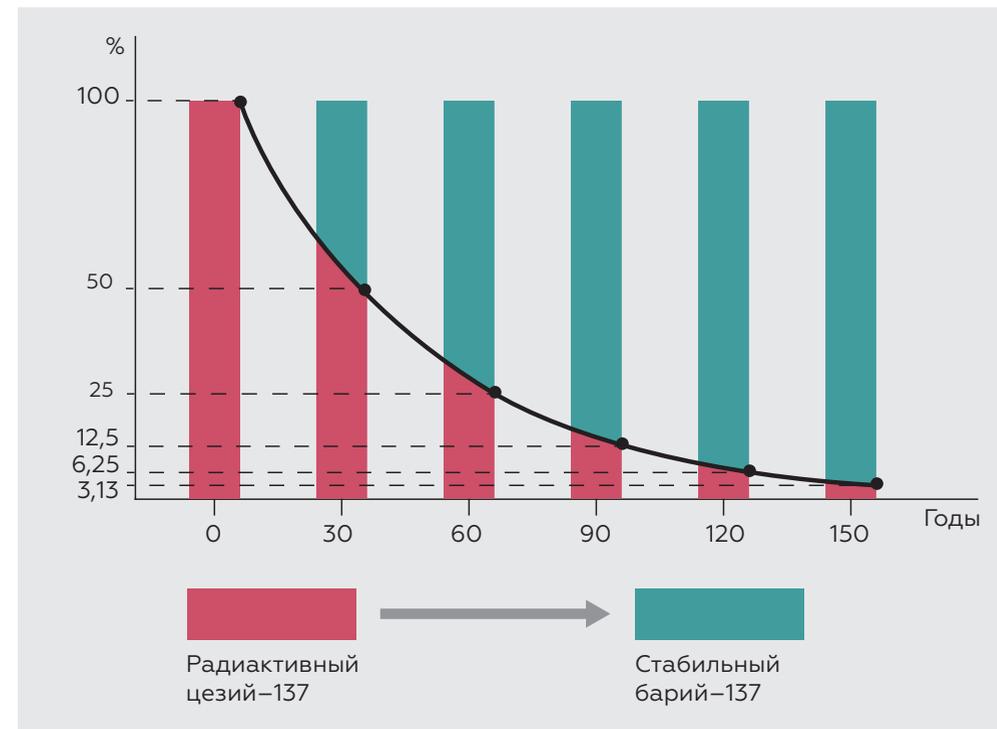


Рисунок 2.1. Радиоактивный распад цезия-137 (период полураспада — 30 лет)

Нетрудно понять, что если время, прошедшее с начала измерения количества радиоактивного вещества, совпадает с целым числом n периодов полураспада, то количество его ядер N может быть определено по простой формуле: $N(t = n \times T_{1/2}) = N(t_0)/2^n$, где N_0 — количество ядер в начальный момент времени $t = t_0$.

Для известных в настоящее время радиоактивных ядер его значения различаются на многие порядки величин — от долей секунды до сотен миллиардов лет. К последним и принадлежат три главных героя нашего рассказа — чрезвычайно долгоживущие радионуклиды актинидной группы таблицы Менделеева: торий-232, уран-235 и уран-238. Их периоды полураспада ($1,4 \times 10^{10}$, $7,1 \times 10^8$ и $4,5 \times 10^9$ лет соответственно) сравнимы с возрастом Земли (около $4,5 \times 10^9$ лет), и они, несомненно, ровесники нашей планеты. Для понимания многих вопросов и проблем атомной энергетики это обстоятельство является ключевым.

А теперь вернемся к некоторым базовым физическим характеристикам атомных ядер.

Массы протона и нейтрона (а только эти частицы и входят в состав ядер, ничего другого там нет) приблизительно равны: $1,6726 \times 10^{-24}$ г и $1,67501 \times 10^{-24}$ г. В тех случаях, когда различие между массой протона и нейтрона несущественно, они объединяются понятием «нуклон».

Как и для других объектов микромира, для масс нуклонов и ядер вводится специальная единица — атомная единица массы (а. е. м.). Она принята равной $1/12$ массы атома углерода ^{12}C . Поскольку масса электронов в сравнении с массой ядер пренебрежимо мала, в этих величинах масса ядра углерода ^{12}C составляет точно 12 а. е. м., масса протона — 1,0073, нейтрона — 1,0087. С округлением до целого числа масса ядра в а. е. м. всегда совпадает с массовым числом ядра, $A = Z + N$ (конечно, всегда целой величиной). Но лишь с округлением — в точности эти величины никогда не совпадают (кроме, понятно, «эталонного» ядра ^{12}C). Это несоответствие и является основой физики атомного ядра.

Как и многие рассмотренные ранее единицы микромира, а. е. м. является величиной условной, вводимой лишь для удобства. А теперь рассмотрим иную шкалу масс ядер, имеющую глубочайший физический смысл. Лишь с ее введением будет ясен смысл атомной энергии как физической науки.

Ранее, когда мы рассматривали энергетические эквиваленты физических понятий, мы ввели принцип эквивалентности массы и энергии ($E = mc^2$). Применять эту формулу для описания привычных нам бытовых явлений макромира неудобно — значения энергетических эквивалентов масс оказываются чудовищно огромными. Но вот для описания процессов, происходящих в ядрах атомов, это как раз то, что нужно. В такой системе единиц энергетический эквивалент массы нуклона равен примерно 931 МэВ. Как мы увидим, эта энергия вполне сопоставима с той, которая выделяется в ходе внутриядерных процессов.

Рассмотрение этих процессов мы начнем с того, что обратим внимание на несоответствие массы ядра углерода ^{12}C (12 а. е. м.) и суммарной массы входящих в него 6 протонов и 6 нейтронов. Эта по-

следняя оказывается заметно больше 12 — примерно 12,1 а. е. м. Неужели мы ошиблись?

Нет, никакой ошибки нет. Вот вам иллюстрация: предположим, что некий школьный коллектив собрался после уроков в кино, для чего каждый участвующий выделил некоторую часть денег, выданных родителями на еду. После этого оставшаяся у каждого часть денег, естественно, будет меньше первоначальной, но зато та их часть, которая предназначена для похода в кино, превращает разрозненных до этого тинейджеров в коллектив, объединенный одной целью (походом в кино). Так же и с нуклонами в ядре: чтобы создать ядро как единую, связанную систему (для чего, естественно, нужна энергия связи $E_{\text{св}}$), они жертвуют частью своей массы. Для ядра углерода ^{12}C



соединяются в ядро как единую, связанную систему (для чего, естественно, нужна энергия связи $E_{\text{св}}$), они жертвуют частью своей массы. Для ядра углерода ^{12}C



эту жертву несложно оценить — получается около 93,1 МэВ. Значит, на каждый нуклон ядра приходится $93,1/12 = 7,76$ МэВ от общей энергии связи $E_{св}$. Эта величина ($E_{св}/A$), называемая удельной энергией связи на нуклон, является основной характеристикой меры устойчивости ядра.

Характерная энергия, выделяющаяся в экзотермических процессах, всегда составляет величину порядка энергии связи системы, где происходит событие. Для химических реакций эта величина составляет единицы/десятки эВ — такова типичная энергия связи валентных электронов. А ведь для ядер энергия связи в миллион раз больше!

Чтобы закончить наше краткое физическое описание атомных ядер, ответим на вопрос, который у внимательного читателя уже наверняка на языке: ведь ядро — очень компактная система, в состав которой входят, кроме электрически нейтральных нейтронов, только положительно заряженные протоны. С учетом малых расстояний силы кулоновского отталкивания должны были, казалось бы, в считанные мгновения разорвать ядро на части. Почему этого не происходит? Потому что силы, которые связывают нуклоны в ядре, так называемые силы ядерного взаимодействия, на много порядков сильнее, чем электростатические силы отталкивания протонов. Впрочем, электростатическое взаимодействие в ядерной энергетике тоже приходится учитывать, с этим мы еще столкнемся.

КАНДИДАТЫ НА ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО — ГДЕ ИХ ИСКАТЬ?

А теперь вот о чем. Что для атомной энергетике нужен уран в качестве основы ядерного топлива, в наше время известно всем. Но вот вопрос — почему именно уран? Автор не раз задавал этот вопрос школьникам и почти всегда слышал в ответ: «Потому что он радиоактивен». Но ведь в природе и радиоактивный торий-232 есть, и радиоактивный калий-40, и еще кое-что радиоактивное (но об этом далее). А все это для атомной энергетике не годится — нужен уран. Почему?

Ну, во-первых, к атомной энергетике радиоактивность урана как таковая не имеет ни малейшего отношения. А во-вторых, если радиоактивность тут ни при чем, то почему нельзя использовать в качестве основы ядерного топлива... да мало ли что? Железо, медь, что-то еще?

Нам снова предстоит погрузиться в физику. И начнем мы с великого физического принципа, исключений не знающего, — принципа минимума потенциальной энергии. Он гласит: из возможных состояний системы, выражаемых некоторым параметром, наиболее устойчиво то, в котором ее потенциальная энергия минимальна.

Попробуем применить этот принцип к существующим в природе ядрам — от самых легких до урана-238 (ядер с большими массовыми числами A , как мы уже знаем, в природе нет). В качестве же параметра ядра как меры его устойчивости логично выбрать уже известную нам удельную энергию связи на нуклон — $E_{св}/A$. Чем выше эта величина, тем крепче связано ядро как единая система, тем сложнее инициировать какие-либо процессы с его участием — что и соответствует в нашем случае принципу минимума потенциальной энергии системы.

Зависимость $E_{св}/A$ от A показана на [рис. 2.2](#). Она-то и является главной при обосновании возможных направлений развития ядерной энергетике. Ведь для достижения наиболее выгодных, по принципу минимума потенциальной энергии, состояний с наибольшими величинами $E_{св}/A$ (то есть для элементов от Cr до Zn), для более легких ядер энергетически выгодны процессы слияния двух ядер в одно, более тяжелое. Такой процесс называется термоядерным синтезом. Для тяжелых же ядер энергетически выгодны превращения, уменьшающие их массу. Наиболее эффективным из реально существующих в природе превращением такого рода является деление ядер на две примерно равные части. Именно этот процесс, открытый О. Ганом и Ф. Штрассманом в 1939 году, является физической основой современной ядерной энергетике.

Тем не менее следует сказать несколько слов и об энергетике ядерного синтеза (термоядерной энергетике). Она вполне способна, хотя бы в рамках рассматриваемых к настоящему времени технических подходов, обеспечить всему человечеству энергетическое изобилие. Это обусловлено приемлемыми ожи-



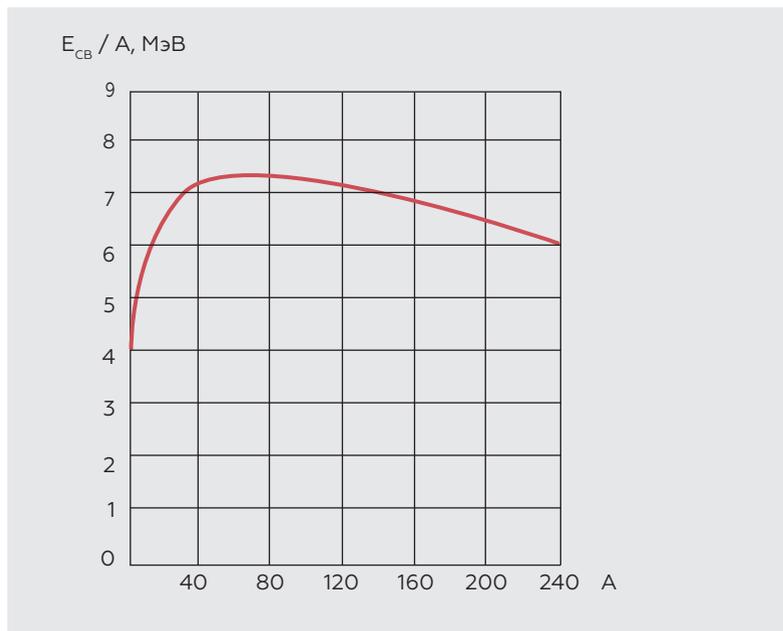


Рисунок 2.2. Зависимость удельной энергии связи ядра от его массового числа

даемыми значениями плотности передачи энергии (порядка сотен кВт/м²) и заведомо высокими величинами коэффициента готовности — при практически неограниченном (в случае реализации D-D-цикла, основанного на слиянии ядер дейтерия) ресурсном обеспечении. Ведь дейтерий есть в обычной воде, пусть и в малом количестве (0,015% по числу ядер от всего водорода). А потенциал его громаден — расчетное количество энергии, запасенное лишь в одном литре воды, эквивалентно, при полном протекании термоядерных реакций D-D-цикла, сжиганию примерно 400 л нефти или около 600 кг высококачественного угля.

Но... весь вопрос в том, когда термоядерная энергетика станет практической реальностью, — сейчас она таковой не является. Добиться масштабного протекания термоядерных процессов к настоящему времени удалось лишь в режиме неконтролируемого выделения энергии в наиболее разрушительном оружии за всю историю человечества — водородной бомбе. А вот освоение «управляемо-

го термояда» оказалось невероятно трудным делом. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в этом направлении, промышленная реализация термоядерной энергетики отодвигается, вероятно, на десятки лет.

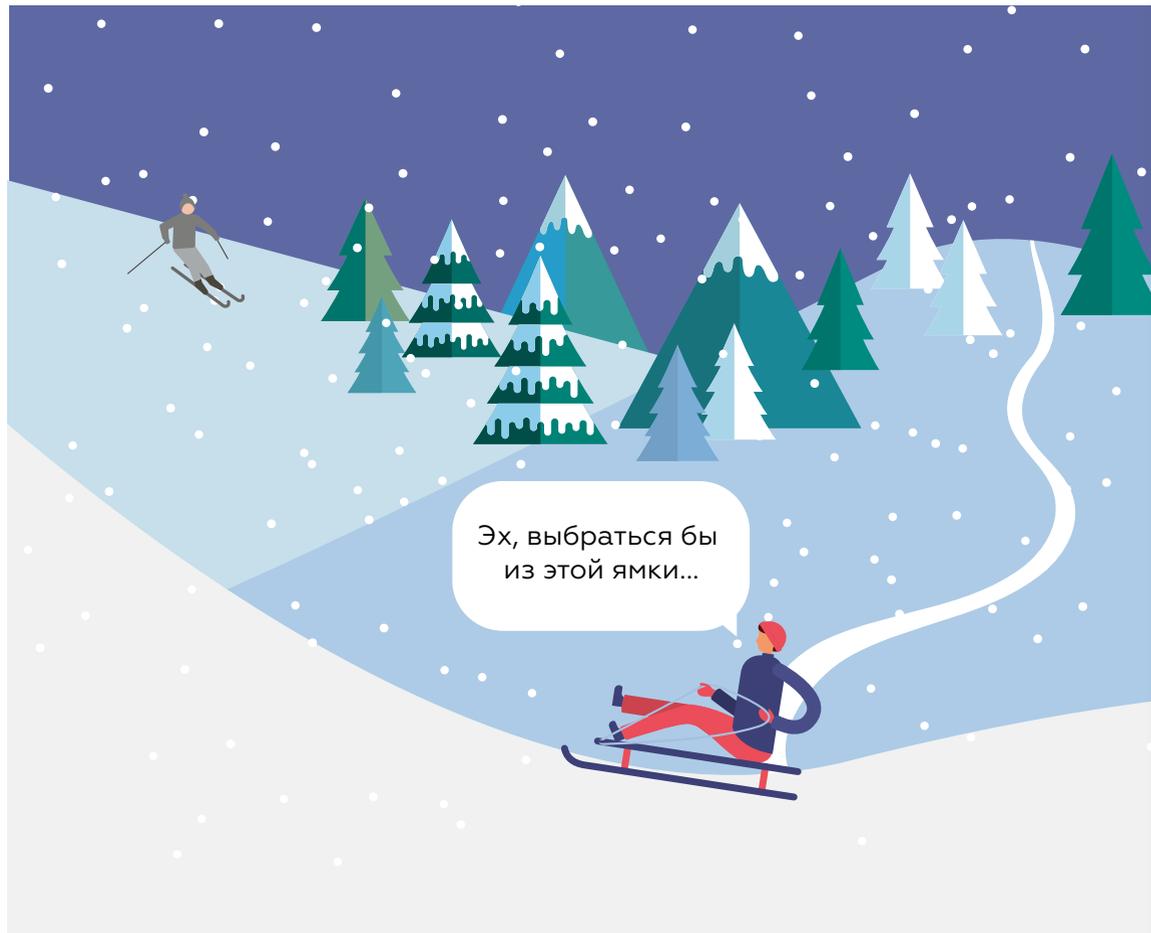
Но благодаря термоядерным исследованиям были разработаны по-настоящему революционные технологии в самых разных областях науки и техники, и этот процесс продолжается и в наши дни. Поэтому такие исследования ни в коем случае нельзя прекращать — напротив, надо всемерно развивать их.

БАРЬЕР ДЕЛЕНИЯ, ИЛИ ПРИКЛЮЧЕНИЯ САНОЧНИКА

Вернемся к процессу, который является физической основой современной атомной энергетики, — делению тяжелых ядер на два приблизительно одинаковых осколка. У внимательных читателей при знакомстве с рис. 2.2. тут же возникает следующий вопрос: если процесс ядерного деления действительно энергетически выгоден для всех тяжелых ядер, то как же существуют в природе такие тяжелые ядра, как, например, золото и свинец? А то, что они на свете есть и при этом никогда не делятся, золотые украшения и свинцовые грузила доказывают вполне наглядно.

Вопрос не так прост. Представим себе длинный склон, съехав с которого на санках можно приобрести, как мы убедимся чуть далее, огромную кинетическую энергию (конечно, ценой потери энергии потенциальной). Но перед началом спуска, перед самой вершиной склона, находится ямка, в которой и сидит наш саночник. Чтобы попасть в точку начала спуска, на вершину склона, ему надо сначала выбраться из этой ямки. А для этого нужна энергия. Пусть она и очень мала в сравнении с той, которую получит саночник в конце спуска со склона, но без ее приложения сам спуск не состоится.

Так же обстоит дело и с тяжелыми ядрами. В ходе деления они испытывают ряд изменений формы и внутренней структуры, для которых нужна дополнительная энергия (совокупность этих процессов и явлений называется барьером деления). Чтобы его преодо-



леть, ядру надо сообщить некоторую дополнительную внутреннюю энергию, или, как говорят физики, «возбудить» его, заставив присоединить какую-либо частицу. Лучшее всего — нейтрон. Дело в том, что он электрически нейтрален, и при взаимодействии с ядром для него отсутствует сила кулоновского отталкивания, которая неминуемо проявилась бы, если бы мы попытались возбудить тяжелое ядро с помощью заряженной частицы. Мы будем рассматривать взаимодействие ядер лишь с медленными нейтронами, кинетическая энергия которых соответствует температуре внешней среды (вот, кстати, еще один пример взаимосвязи различных форм энергии). Такие нейтроны называются

«тепловыми», и именно их использование лежит в основе работы практически всех современных энергетических ядерных реакторов (они так и называются — реакторы на тепловых нейтронах). Почему это так — узнаем дальше. Здесь же лишь отметим, что собственную, очень малую, кинетическую энергию теплового нейтрона мы в наших рассуждениях учитывать не будем. А в этом случае энергия возбуждения нового тяжелого ядра, которое образовалось при захвате нейтрона исходным, всегда равна энергии связи нейтрона в этом новом ядре. Это хорошо известная нам величина $E_{св}/A$. На рис. 2.2 хорошо видно, что для всех тяжелых ядер (в том числе золота, свинца и урана) она довольно близка — около 7,5 МэВ. Так что тут все почти на равных (впрочем, это «почти», как мы скоро убедимся, играет очень важную роль).

Вот теперь посмотрим, кто кого. Судьба тяжелого ядра (в том смысле, будет оно делиться после захвата нейтрона или нет) определяется тем, как соотносятся между собой величины двух энергий — уже известной нам энергии возбуждения после такого захвата (примерно 7,5 МэВ) и высоты барьера деления в энергетических единицах (или, говоря языком нашего саночника, глубиной ямки перед вершиной склона, где он находится). Если больше первая — ядро разделится, вторая — нет.

Но если, как мы уже знаем, значения энергии возбуждения для тяжелых ядер в довольно широком интервале масс в общем близки, то энергетическая высота барьера деления зависит от массы тяжелого ядра очень сильно. Например, для золота-197 (других стабильных изотопов золото, как мы знаем, не имеет) она превышает 15 МэВ (против 7,5 МэВ энергии возбуждения после захвата теплового нейтрона), и никаких шансов на деление это ядро не имеет. Из «золотой ямки» нашему саночнику на вершину склона выбраться не удастся. Вот почему для финансистов и модниц золото интересно, а вот для атомной энергетики — нет. Для свинца ситуация в общем сходная.

Простейшие оценки показывают: из всех элементов, встречающихся в природе в значительных количествах (и поэтому представляющих интерес в качестве потенциального энергоресурса), лишь у двух, с наибольшими массовыми числами их ядер, величины энергетической высоты барьера деления и энергии возбуждения

после захвата теплового нейтрона оказываются очень близкими, и их разность может, в принципе, иметь разные знаки. Это тяжелые актиниды, торий (Th, $Z = 90$) и уран (U, $Z = 92$). Но для атомной энергетики, при всей схожести многих их свойств, они представляют совершенно различную ценность. Почему?

УРАН, ТОРИЙ И ИХ СВОЙСТВА. ЯДЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Вот тут в дело вступают частности. То самое «почти», о котором мы упоминали чуть раньше.

Природный торий моноизотопен, он состоит только из тория-232, а вот природный уран состоит из двух изотопов: уран-235 и уран-238. С точки зрения физики деления главный вопрос здесь состоит в том, какую ядерную систему образуют такие ядра при захвате возбуждающего нейтрона. Нетрудно увидеть, что при этом атомные номера Z (у обоих элементов четные) останутся без изменений (ведь они соответствуют числу протонов), а вот количества нейтронов N (и массовые числа A) увеличатся на единицу. Таким образом, мы получаем возбужденные состояния ядер тория-233, урана-236 и урана-239 с количеством нейтронов 143, 144 и 147 соответственно.

Чрезвычайно важным, ключевым является тот факт, что из наших трех природных актинидов лишь уран-235 образует при захвате нейтрона так называемое четно-четное возбужденное ядро, в котором количество и протонов, и нейтронов четное.

А для таких тяжелых ядер, во-первых, энергетическая высота барьера деления (глубина ямки для саночника, нам надо, чтобы она была поменьше) всегда несколько ниже, чем у соседних ядер. Немного — на 1 МэВ или около того, но тем не менее. И во-вторых, энергия возбуждения такого ядра оказывается чуть выше, чем у соседей, тоже в пределах 1 МэВ. Совокупность этих обстоятельств оказывается в данном случае решающей — заветная разность между энергией возбуждения и барьером деления оказывается положительной, и благодаря этому уран-235 будет хорошо делиться нейтронами любой, даже самой малой, энергии. А вот торий-232 и уран-238 такими нейтронами делиться не будут — там эта разность, увы, отрицательна.

Вот почему уран-235 играет в атомной энергетике совершенно особую роль и несравним ни с каким другим веществом. Его относительно немного: в естественном уране урана-235 — лишь 0,71%, остальное — гораздо менее ценный уран-238. Но уран-235 — единственный существующий в природе материал, ядра которого делятся тепловыми (очень медленными) нейтронами, а только такие нейтроны в реакторе и есть. Поэтому уран-235 энергетиками-ядерщиками называется первичным ядерным материалом. И даже если нет ничего другого, то, используя его в качестве физической основы ядерного топлива, можно построить, запустить и успешно эксплуатировать ядерный реактор — что делалось и делается.

А вот тут и выясняется, что уран-238 и торий-232 тоже на многое годны. До сих пор мы, хотя бы на уровне предварительных рассуждений, упоминали ядерный реактор как устройство в общем утилитарное, предназначенное лишь для производства электроэнергии на АЭС. Как он работает в этом качестве, мы скоро узнаем.

Но теперь посмотрим, что он такое с позиции ядерщика. Прежде всего ядерный реактор является мощнейшим источником нейтронов. Откуда они берутся, нам тоже будет скоро понятно, а пока отметим лишь, что их интенсивные потоки не только взаимодействуют в ядерном топливе с ядрами урана-235, вызывая их деление (без этого реактор — не реактор). Ведь в реакторе можно, конструктивно и технически, организовать такое взаимодействие и с ураном-238 (к слову, он всегда есть в топливном уране), и с торием-232.

Делиться, конечно, эти ядра не будут — разница между энергией возбуждения ядра и барьером деления, как мы знаем, в этом случае отрицательна. Но после облучения в реакторе и последовательного применения ряда иных ядерных технологий из них можно получить соответственно плутоний-239 и уран-233.

И вот тут самое главное. Эти тяжелые ядра при захвате нейтронов также образуют заветные четно-четные возбужденные системы — уран-234 и плутоний-240. Поэтому плутоний-239 и уран-233 должны, как и уран-235, прекрасно делиться нейтронами малых энергий (так оно и есть в действительности) и могут поэтому быть эффективной основой ядерного топлива. Вот только в природе этих ядер нет.

Подвели периоды полураспада. Уран-235 потому и является первичным ядерным материалом, что он, наряду с уникальными свойствами делимости из-за огромной величины $T_{1/2}$, ровесник Земли, он есть в природе. А вот плутоний-239 и уран-233, с периодами полураспада 24 100 лет и $1,6 \times 10^5$ лет соответственно, даже если в силу каких-то космологических процессов и возникли одновременно с нашей планетой, сейчас полностью распались.

А что, если нам с помощью реакторных технологий удастся искусственно накопить значительные количества плутония-239 (из урана-238) и/или урана-233 (из тория-232)? Ведь их периоды полураспада малы лишь при сопоставлении с возрастом Земли, но в сравнении с характерными технологическими временами развития общества (соответственно, и энергетики) они громадны!

Если это получится, то плутоний-239 и уран-233 тоже можно использовать в качестве основы для ядерного топлива — они станут полноценными ядерными материалами. Их принято называть вторичными, ведь чтобы запустить реакторы в начале их наработки, все же нужен уран-235 в составе первичного уранового топлива. А уж дальше мы можем переводить реакторы на вторичное топливо с плутонием-239 и ураном-233.

Тогда это будет революцией в энергетике — и не только атомной. Дело в том, что, используя плутоний-239 как основу ядерного топлива в энергетических ядерных реакторах на быстрых нейтронах, мы сможем, облучая в них уран-238 и в дальнейшем перерабатывая

его, получить (кроме, разумеется, и электроэнергии) больше плутония, чем изначально потратили, — при этом драгоценный уран-235 уже не нужен! Такой режим работы реактора на быстрых нейтронах называется бридерным (от англ. breeder — наработчик).

 На такое способна только ядерная энергетика — представьте себе автомобиль, в бензобаке которого после поездки оказывается больше топлива, чем мы изначально залили...

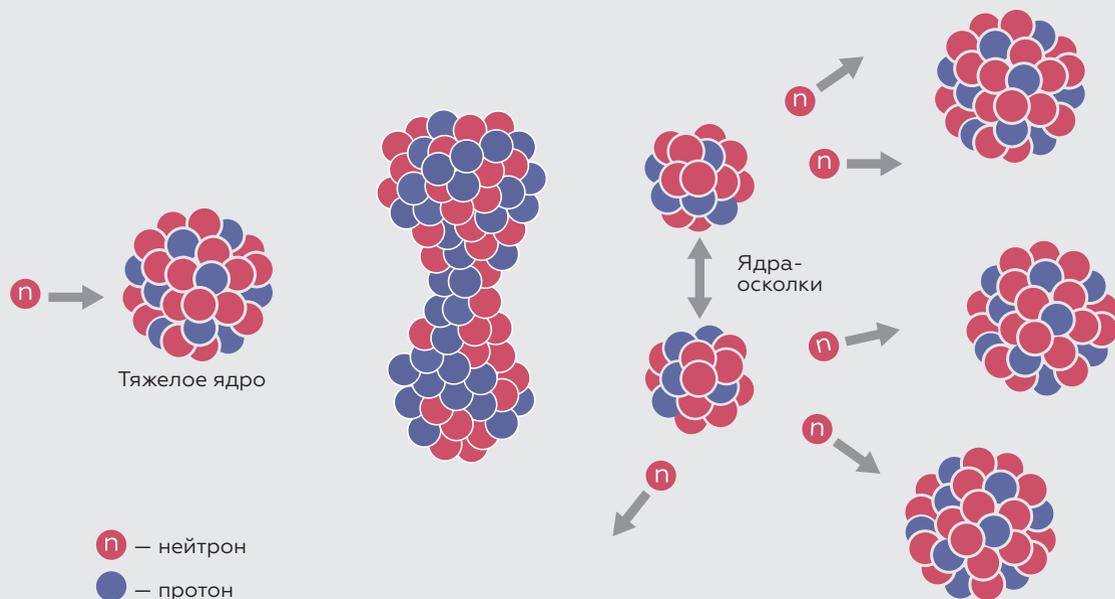
Вот теперь вспомним, что в естественном уране урана-238 — 99,29%, а бридерная технология, в принципе, может полностью полезно его использовать! При этом топливный ресурс ядерной энергетики возрастает в сотни раз, до 3000 лет и даже более. Формально невозобновляемый источник энергии (ископаемый уран) фактически становится источником вечным — вспомним [рис. 1.4!](#)

Очень важно, что бридерная технология с использованием реакторов на быстрых нейтронах давно уже вышла из стадии научно-исследовательских работ. Она может быть за короткое время реализована в промышленных масштабах — принципиальных трудностей здесь нет. К слову говоря, российская наука и атомная индустрия обладают в этой области технологий общепризнанным мировым приоритетом. Упускать его мы не должны. Но вот когда эти технологии станут основой мировой и отечественной ядерной энергетики, сказать пока сложно. Здесь надо учитывать огромное множество сложнейших вопросов — в первую очередь экономических, да и других вполне достаточно. Их рассмотрение выходит за пределы этой книги.

ОСКОЛКИ ДЕЛЕНИЯ И ИХ СВОЙСТВА



А теперь проследим, что происходит с ядром урана-235, когда оно после захвата нейтрона начинает делиться (рис. 2.3). После прохождения некоторых изменений формы (они называются делительными конфигурациями) ядро разваливается на два новых, суммарное массовое число которых совпадает с массовым числом делящегося. Ядерные силы после образования этих новых ядер (их называют осколками деления) между ними более уже не действуют, зато всю действуют силы электростатического (кулоновского) отталкивания. Это и понятно: ядра-осколки пред-



**За 10 актов деления
в среднем образуется 24 нейтрона**

Рисунок 2.3. Схема цепной реакции деления урана-235 нейтронами

ставляют собой многозарядные положительные ионы (ядра, лишенные электронов). Поэтому они разлетаются в разные стороны, освобождая при этом огромную энергию (наш саночник вылез из «ямки» и спустился со склона).

Попробуем оценить эту энергию. Из рис. 2.2 нетрудно видеть, что энергия связи на нуклон каждого из осколков при делении пополам тяжелого ядра с массовым числом около 240 возросла примерно на 0,8 МэВ. Следовательно, при делении ядра всего освобождается $120 \times 2 \times 0,8 \text{ МэВ} \sim 200 \text{ МэВ}$! А вот при окислении атома углерода до углекислого газа в главной химической реакции огневой энергетики выделяется всего-навсего около 4 эВ! При делении в пересчете на одну реакцию в полмиллиона раз больше. Вот почему отличительной особенностью ядерного топлива является его чрезвычайно высокая энергоемкость. Один килограмм топливного урана для отечественного реактора ВВЭР-1000 при полном делении всех ядер урана-235 в нем по энергетическому эквиваленту соответствует 100 тоннам высококачественного угля или 60 тоннам нефти (рис. 2.4).

А теперь еще несколько слов о ядрах, которые образовались при делении ядра урана, — осколках деления. У них есть и приятные, и неприятные свойства.

Их пробег в ядерном топливе, содержащем делящийся уран-235, очень мал — несколько микрон. Поэтому всю энергию своего разлета (200 МэВ на каждое деление) они теряют в самом топливе, обеспечивая его сильный нагрев. Его остается только снять и полезно использовать. Об этом разговор еще впереди, но этим роль осколков деления не ограничивается.

Обязательным условием использования чего-либо в качестве ископаемого энергоресурса (уран не исключение) является возможность обеспечения самоподдерживающегося процесса. Но чтобы разделить ядро урана-235, нужен нейтрон, а где его взять? На каких-то внешних источниках нейтронов атомную энергетику не построишь.



60 тонн

(2 цистерны)
нефти



100 тонн

(2 вагона)
каменного угля

1 кг энергетического урана
(обогащение 4,4% по урану-235)
для реактора ВВЭР-1000
при полном выгорании

Рисунок 2.4. Эффективность ядерного топлива



И тут выявляется интереснейшая особенность ядер-осколков — физические закономерности протекания реакции деления приводят к тому, что эти ядра перегружены нейтронами и обладают при этом высокой энергией внутреннего возбуждения.

Конечно, делиться далее они не будут, исходя из общих энергетических соображений, — слишком мала масса осколков, вспомним рис. 2.2. Но этой энергии возбуждения хватает, чтобы каждый осколок испустил два-три новых нейтрона (в среднем за 10 делений ядер урана-235 испускается 24 новых нейтрона).

Отсюда сразу две замечательные возможности. Во-первых, эти новые (вторичные) нейтроны можно использовать для деления других ядер урана-235. Нетрудно понять, что перед нами открывается возможность запустить самоподдерживающийся процесс, называемый цепной реакцией деления. И во-вторых, регулируя количество этих нейтронов (для чего существуют специальные материалы-поглотители), этой цепной реакцией можно управлять, добываясь в каждый момент требуемого уровня мощности, что и происходит в ядерном реакторе.

К сожалению, есть у осколков деления и неприятная особенность — очень высокая искусственная радиоактивность. Именно с ней связано большинство негативных последствий ядерных и радиационных аварий. Среди осколков деления есть такие, действие которых на организм человека может вызвать тяжелые поражения. Чтобы избежать этого, требуется обеспечить гарантированное отсутствие их попадания во внешнюю среду. Это важнейшее требование безопасности ядерных технологий, которое выполняется строжайшим образом.



ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР И АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

А теперь посмотрим, как организована техническая реализация получения ядерной энергии. Мы переходим к краткому описанию ядерного реактора и АЭС, сердцем которой он является.

Существует огромное множество типов и конструкций ядерных реакторов. Но подавляющее большинство энергетических реакторов, действующих на современных АЭС, имеет много общих, функциональных по своему назначению, систем и устройств. Их рассмотрением мы и ограничимся.

Количество реакторов (их обычно называют ядерными энергоблоками) на АЭС бывает различным — от одного до восьми. Все эти реакторы имеют активную зону — конструктивно выделенную область, в которой происходит уже известная нам управляемая цепная реакция ядерного деления. При этом выделяется огромное количество тепла — оно-то нам и требуется. Тепло отводится из активной зоны специальным веществом (жидким или газообразным) — теплоносителем. В качестве теплоносителя чаще всего используется вода, реже — тяжелая вода или углекислый газ. В энергетических реакторах на быстрых нейтронах теплоносителями являются расплавы металлов (натрий, свинец). Однако этот класс реакторов здесь мы не рассматриваем. Для атомной энергетики они очень перспективны (об этом мы уже знаем), но их пока слишком мало: из действующих в мире по состоянию на май 2020 года 441 ядерного энергоблока АЭС всего лишь два — на быстрых нейтронах с единичной электрической мощностью свыше 50 МВт (на Белоярской АЭС в России).

Энергетические ядерные реакторы имеют типовые аббревиатурные обозначения, обычно отражающие физико-технические особенности их принципа действия и конструкции. Например, большинство реакторов российской атомной энергетики принадлежат к линейке ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор). Мощность единичных энергоблоков ВВЭР с годами возрастала, их наиболее современная модификация — ВВЭР-1200, а ранее массово строились ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Цифра за аббревиатурой обычно означает электрическую мощность энергоблока.

Подавляющее большинство современных энергетических реакторов использует в качестве ядерного топлива спеченную двуокись урана в виде так называемых топливных таблеток (рис. 2.5). Ими снаряжаются длинные узкие трубки, называемые тепловыделяющими элементами (ТВЭЛы). ТВЭЛы объединяются в жесткие конструкции, называемые тепловыделяющими, или топливными, сборками (рис. 2.6). Наиболее часто ТВЭЛы и топливные сборки выполняются из цирконий-ниобиевого сплава или специальных сортов нержавеющей стали.



Рисунок 2.5. Топливные таблетки



Рисунок 2.6. Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы)

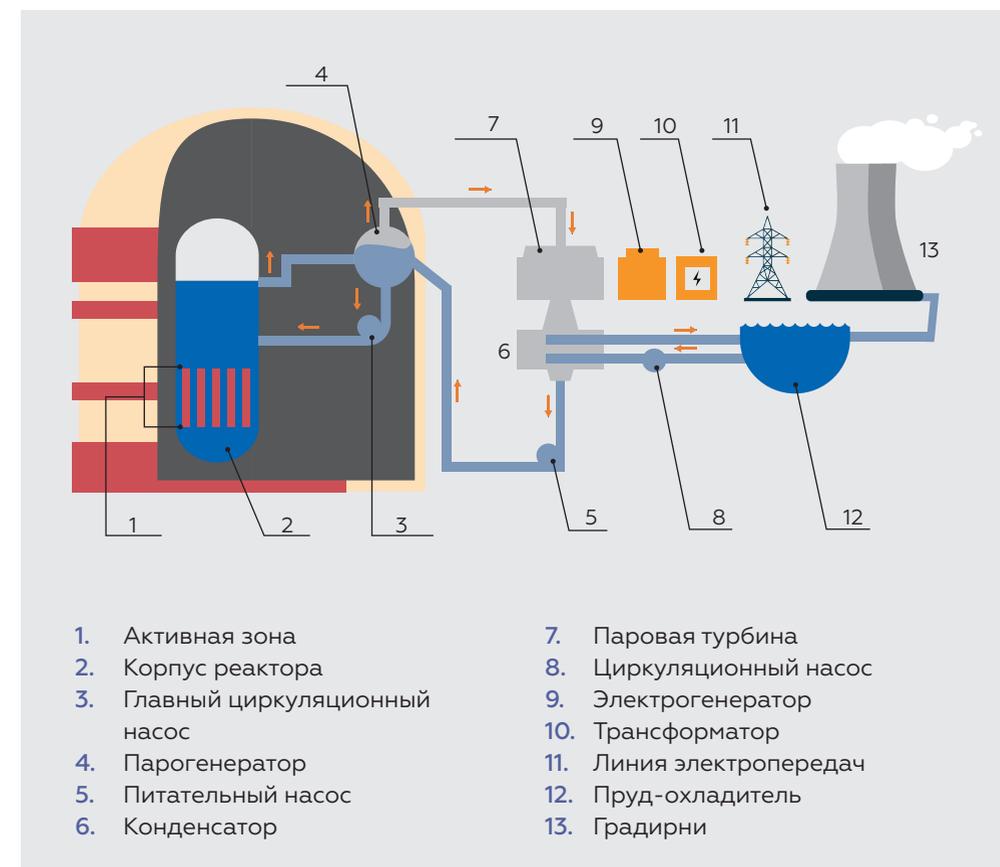
В конструкциях почти всех энергетических ядерных реакторов приходится учитывать и то обстоятельство, что вероятность захвата нейтронов ядрами урана с последующим делением (что и нужно для протекания цепной реакции) резко возрастает с уменьшением энергии нейтронов. Нейтроны, испускаемые осколками деления, обладают довольно высокой энергией (в среднем около 1,5 МэВ). Поэтому ее надо уменьшать в ходе последовательных столкновений нейтронов с ядрами специального вещества, находящегося в активной зоне, — замедлителя. Для эффективно замедления нейтронов необходимы легкие материалы и вещества, которые к тому же не должны интенсивно поглощать нейтроны, — иначе на осуществление цепной реакции деления в активной зоне нейтронов может попросту не хватить. В конструкциях современных реакторов используется всего три таких материала: обыкновенная вода, тяжелая вода (в молекуле которой легкий водород замещен дейтерием) и графит (химически чистый углерод).

Чаще всего применяется обыкновенная вода. Она хороший замедлитель, у нее прекрасные теплофизические свойства (что существенно, поскольку в таких реакторах она же используется и как теплоноситель), и она гораздо дешевле тяжелой воды и графита. Это очень важно — ведь мировой атомной энергетике нужны сотни тысяч тонн замедляющих веществ. У нее, однако, есть и недостаток — вода довольно сильно поглощает нейтроны. Поэтому, чтобы запустить цепной процесс деления на таких реакторах (поэтому их называют водо-водяными: вода в них — и замедлитель, и теплоноситель), топливный уран приходится дополнительно обогащать по делящемуся урану-235 — с 0,71% в естественном уране до 2,2–4,5%, в зависимости от многих обстоятельств.

Как уже упоминалось, управление мощностью реактора осуществляется дистанционным введением в активную зону материалов и веществ, эффективно поглощающих нейтроны. В качестве таких веществ в современной атомной энергетике чаще всего используется карбид бора (B_4C) в виде так называемых регулирующих стержней. Такие же стержни являются основой системы, обеспечивающей при необходимости быстрое прекращение цепной реакции деления (система аварийной защиты).

ЯДЕРНЫЙ ЭНЕРГОБЛОК: ЧТО ТАМ ВНУТРИ?

Как работает энергетический ядерный реактор, мы теперь знаем. А теперь давайте посмотрим, как происходит на АЭС то, ради чего она, собственно, и создавалась, — генерация горячего пара высокого давления. Именно он нужен, чтобы заработала уже известная нам сладкая парочка — паровая турбина, вращающая электрогенератор. Таким образом, на АЭС происходит три последовательных изменения форм энергии: ядерная энергия переходит в тепловую, тепловая — в механическую (турбина), механическая — в электрическую (генератор). Как же работает вся эта система?



Ранее уже упоминалось, что типов и конструкций ядерных реакторов очень много, но ее основой являются именно водо-водяные реакторы (296 из 441 действующего энергоблока и значительная часть строящихся). А среди водо-водяных реакторов тоже есть ярко выраженная преимущественная конструкция – двухконтурные реакторы с водой под давлением (231 из 296). К этому же типу ядерных энергоблоков в России принадлежат 21 из 38 эксплуатируемых и все без исключения строящиеся сейчас (3). Поэтому именно на примере ВВЭР мы познакомимся с реактором как инженерно-физическим устройством.

Его основой является бак из специальной стали, внутри которого находится активная зона (рис. 2.7). Бак заполнен замедлителем – водой. Вода, поступающая в корпус, проходит через активную зону (теперь вода уже начинает работать и как теплоноситель) и выходит из верхней части бака. Температура поступающей воды – 289 °С, выходящей – 324 °С (данные для отечественного реактора ВВЭР-1200). Для того чтобы обеспечить сохранение воды в жидкой фазе при таких температурах, в баке реактора поддерживается высокое давление – около 160 атмосфер. Поэтому конструкция высокопрочная (толщина стенки бака – 23 см).

Вышедшая из бака вода поступает в особые устройства – парогенераторы. Как и бак реактора, это объемные и массивные конструкции (вес одного парогенератора реактора ВВЭР-1200 – около 640 тонн). В парогенераторах нагретая вода первого контура передает тепловую энергию воде второго контура. Давление в нем существенно меньше – около 65 атмосфер. Там и образуется пар, поступающий на вращающуюся электрогенератор турбину. Энергетический реактор, выполненный по такой схеме, называется двухконтурным.

Пройдя турбину, пар поступает в так называемый холодильник, его еще называют блоком конденсации. Там он отдает остатки тепла так называемому внешнему контуру. Этот блок в режиме циркуляции обеспечивает сброс оставшегося тепла либо в водоем – пруд-отстойник, либо на вход градирни – высокой башни специальной конструкции (рис. 2.8), работающей по принципу охлаждения диспергированной горячей воды встречным потоком воздуха.

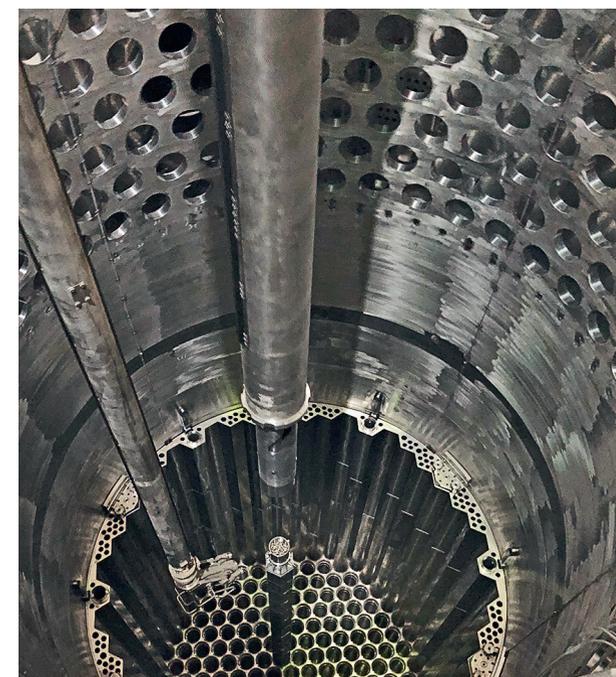


Рисунок 2.7.
Активная зона реактора



Рисунок 2.8. Градирни

Чрезвычайно важно, что между первым и вторым контурами такого реактора отсутствует материальная связь — контакт между ними ограничен лишь передачей тепла, и вода первого контура ни при каких обстоятельствах не может попасть во второй. Это очень существенно для радиационной безопасности АЭС. Дело в том, что, хотя вода первого контура и проходит перед заливкой в реактор процедуру обессоливания, при прохождении активной зоны в ней начинают образовываться радиоактивные вещества (о радиоактивности расскажем ниже). Но во второй контур эти вещества не попадают. Поэтому ни малейшей угрозы внешней среде при штатной работе АЭС ни пруд-отстойник, ни градирня нанести не могут. Радиоактивность внешней среды в современной атомной энергетике очень жестко контролируется — и не только на самих АЭС в ходе

всего производственного цикла, но и в регионах, где они расположены.

Мы коснулись здесь лишь самых основных, наиболее общих аспектов ядерной физики и техники. При этом нельзя забывать, что атомная энергетика — это, конечно, не только собственно АЭС. Это огромный обслуживающий комплекс, включающий подготовку сырья, производство топлива, обеспечение логистических и технологических цепочек, обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами и многое, многое другое. В этом комплексе заняты сотни тысяч высококвалифицированных специалистов — цвет отечественной научной, технической и рабочей интеллигенции. При этом характерной чертой атомной отрасли является высочайший уровень технологической, производственной и исполнительской дисциплины. Это обеспечило атомной отрасли один из самых низких уровней несчастных случаев и производственного травматизма во всей стране.

А ВЕДЬ БЫЛИ И ПРИРОДНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ...

Мне часто задают вопрос: а правда ли, что на Земле существовали природные ядерные реакторы? Отвечаю: существовали.

Хорошо известно, что современное содержание урана-235 в естественном уране составляет 0,71% (остальное — уран-238). С этой величиной мы сталкивались уже не раз — как с некоторой общей для нашей планеты постоянной, которая определяется не только геологической историей Земли, но и обстоятельствами появления во Вселенной урана как химического элемента. Это происходило, вероятно, задолго до формирования нашей планеты (около 4,5 миллиарда лет назад), и об этих процессах мы знаем пока очень мало. Сейчас же для нас важно другое: при такой концентрации урана-235 цепная реакция деления в природных условиях невозможна ни при каких обстоятельствах.

Но давайте теперь вспомним, что оба изотопа естественного урана радиоактивны и при этом их периоды полураспада существенно различаются: у урана-235 он в 6,3 раза меньше, чем у урана-238

($7,1 \times 10^8$ и $4,5 \times 10^9$ лет соответственно). Следовательно, из-за разного темпа их распада относительное содержание урана-235 в естественном уране со временем должно уменьшаться, а урана-238 — возрастать.

Конечно, такой эффект может ощутимо проявиться лишь за огромное время, сравнимое с периодами полураспада этих изотопов урана. Но давайте теперь мысленно перенесемся в эпоху совсем еще юной Земли, на 1,8–2 миллиарда лет назад. Несложный расчет показывает, что относительное содержание урана-235 в природном уране в то время было значительно выше, чем в наши дни, — не 0,71%, а около 3,7%.

Мы уже знаем, что примерно до такой величины искусственно обогащается по урану-235 топливный уран современных водо-водяных реакторов, чтобы в них могла протекать цепная реакция деления. А не могли ли необходимые для этого условия возникнуть на юной Земле естественным образом?

Очевидным свидетельством работы такого природного ядерного реактора стало бы открытие на каком-то урановом месторождении аномалии современного изотопного состава естественного урана — урана-235 в нем должно быть не 0,71%, а меньше. Понятно почему: часть урана-235 в этом случае должна была «выгореть» еще в те далекие времена, и неумолимый радиоактивный распад властвовал бы лишь над оставшейся его долей. А вот урана-238 это выгорание не коснулось бы — он-то, как мы знаем, не делится, и над ним, кроме его собственного периода полураспада, другого хозяина нет.

Эти идеи были сформулированы более чем шестьдесят лет назад, вместе с требованиями к физическим и геологическим условиям, необходимым для протекания цепной реакции ядерного деления в естественной среде. Но только в 1975 году изотопный анализ образцов урана, добытого на нескольких площадках месторождения Окло (Габон, Африка), обнаружил такую аномалию — вместо обычных 0,71% содержание урана-235 в этих образцах составило лишь 0,44%!

Попытки обнаружить ее на других урановых месторождениях нигде в мире успехом не увенчались. Почему? Ответ на этот вопрос мы получаем в ходе совместного рассмотрения особенностей месторождения Окло и упомянутых ранее требований к площадке

природного реактора. Что очень важно, эти требования должны выполняться одновременно.

Итак, во-первых, уран в таких урановых месторождениях должен залегать в водопроницаемых породах. Мы знаем: вода — хороший замедлитель, ее наличие в контакте с ураном создает отличные условия для протекания цепной реакции ядерного деления. С другой стороны, также известное нам огромное тепловыделение при делении приводит, вследствие относительно низкой температуры кипения воды, к ее интенсивному выпариванию из породы при нагреве. Природный реактор лишается замедлителя, реакция деления прекращается, а с ней — и тепловыделение. Водопроницаемая ураносодержащая порода остывает. Но если локализация урана в ней имеет прямой физический контакт со значительным количеством воды за ее пределами, то по мере остывания порода снова заполняется водой. Замедлитель снова на месте, и цикл повторяется. В Окло это так и было: там уран и миллиарды лет назад, и в наши дни залегал и залегает в водопроницаемых песчаниках, лежащих очень близко к горизонтам подземных вод.

Второе обязательное условие: относительное содержание урана в руде должно быть весьма высоким. Иначе вторичные нейтроны, необходимые для развития цепной реакции деления, будут без всякой пользы потеряны в «паразитных» ядерных реакциях с материалами сопутствующей породы. В Окло это условие выполнялось — в силу ряда обстоятельств содержание урана в руде было, по нынешним меркам, почти нереально высоким — 50% по массе и выше. Наконец, третье обязательное условие: руды (соответственно, и урана) при ее компактном залегании должно было быть довольно много по массе и объему, чтобы как можно больше вторичных нейтронов делали свое дело по поддержанию цепной реакции деления ядер урана-235. Выполнение и этого условия мать-природа в Окло обеспечила.

Вот и заработал около двух миллиардов лет на этом месторождении уникальный природный ядерный реактор. Работал он, понятно, в циклическом режиме: цепная реакция деления протекала в нем приблизительно в течение получаса, до нагрева породы на сотни градусов и выкипания воды в ней. Дальше он самостоятельно «заглушался», и следующие два с половиной часа

ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

уходили на охлаждение породы и ее заполнение новой порцией воды. И все повторялось — вновь и вновь, на протяжении примерно полумиллиарда лет, при этом выгорело около пяти тонн урана-235. А дальше это выгорание, высокий, в сравнении с ураном-238, темп радиоактивного распада урана-235 и возможное, вследствие геотектонических процессов на месторождении, уменьшение поступления в пласт воды сделали свое дело: однажды реактор остановился, чтобы не запуститься уже никогда. Ни на одном урановом месторождении в мире, кроме Окло, следов работы природных ядерных реакторов не нашли — хотя и искали. Не исключено, что их нигде и не было: все-таки сочетание всех необходимых для этого условий, которое сложилось в Окло, можно смело назвать уникальным. А может, и были, но изменения на поверхности нашей планеты и в ее недрах, произошедшие за миллиарды лет ее истории, навсегда скрыли от нас эти следы — память об удивительных событиях, которые, увы, никогда больше не повторятся.

А нам здесь очень уместно вспомнить слова великого Леонардо да Винчи: «Одна лишь природа — наставница высших умов».

Глава 3

На одной из встреч с молодежью, организованной Информационным центром по атомной энергии (ИЦАЭ), автору задали вопрос: «Передаётся ли радиация по наследству?» — а на другой — не менее экзотический: «Зачем нам свалки радиации?»

Любые вопросы всегда есть отображение их предмета в сознании, а вот что есть это отображение в упомянутых случаях, автор в ходе дискуссий в ИЦАЭ и пытался понять. И сразу выяснилось, что дело не в физике, технике или радиобиологии. Из туманных объяснений слушателей следовало, что речь идет о каком-то образе дьявола, о котором лишь известно, во-первых, что это очень страшно, а во-вторых, с атомной энергетикой, несомненно, связано. При этом незыблемость «несомненности» обычно выводилась за поле обсуждения — из-за чего ядерные технологии приобретали имидж, сравнимый с таковым для черного кота из средневековых примет: черный кот не потому страшен, что черный, и не потому, что кот, а потому, что дьявола сопровождает. Поэтому начнем, как всегда, с основных определений и базовых понятий. И снова вспомним Декарта: «Если мы сойдемся в определениях, то избежим половины разногласий».

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Итак, радиацией в обиходе называют ионизирующие излучения (ИИ) — потоки частиц достаточно высокой энергии, каждая из которых способна, с некоторой долей вероятности, при взаимодействии с веществом удалить электрон из его атома. Такой процесс и называется ионизацией.

При ионизации электрически нейтральный атом, лишившись электрона, превращается в положительный ион. Выбитый же электрон может на короткое время «прилипнуть» к другому атому, образовав уже отрицательный ион. Именно на ионизацию тратится почти вся энергия частиц ядерного излучения при их взаимодействии с веществом.

Энергетическим порогом ионизации является величина порядка энергии связи в атоме электронов его внешних электронных оболочек, на которых электроны слабее связаны с ядром. Как мы знаем из главы 1, для них энергия связи составляет единицы/десятки электронвольт (эВ) — напомним, $1 \text{ эВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$. С учетом этого энергетического порога ионизирующим является большинство излучений, сопровождающих радиоактивный распад и ядерные реакции, а также жесткое рентгеновское излучение.

А вот радиоволны всех диапазонов и свет в оптическом интервале длин волн к ИИ не относятся. Мне недавно посчастливилось пережить несколько веселых минут при чтении статьи в газете, где к ИИ было отнесено и излучение мобильных телефонов. Наверное, это было написано после того, как автору статьи сказали по мобильнику какую-то гадость...

Ионизированное состояние атомов сохраняется недолго — спустя доли секунды нейтральность вещества восстанавливается. Такой процесс, обратный ионизации, называется рекомбинацией. Но и этих долей секунды хватает, чтобы молекула, в структуру которой входит «небезучий» атом, разрушилась, — ведь целостность молекул обеспечивается электронами именно внешних электронных оболочек. Конечно, это относится и к молекулам, из которых состоит организм человека.

Само по себе разрушение некоторого их количества чем-то ужасным вовсе не является. Оно происходит и при протекании биологических процессов, и под воздействием факторов внешней среды, к которому наш организм в ходе многих веков эволюции успешно адаптировался. К числу этих факторов принадлежит и естественная радиоактивность, с которой мы встретимся позже. А на место разрушившихся молекул приходят образовавшиеся вновь. Этот процесс, непрерывно протекающий в равновесном режиме, и является основой живой жизни.

Но при воздействии на организм мощных потоков ИИ равновесие сдвигается — скорость разрушения молекул живых тканей начинает превосходить скорость образования новых. Все интенсивнее ИИ ломает молекулы биологических структур в организме, не только нарушая при этом его биохимические и биофизические функции, но и образуя биотоксины в виде «осколков» молекул тканей и так называемых свободных радикалов. Этим и обусловлено негативное воздействие интенсивных потоков ИИ на человеческий организм.

Возникает вопрос: что в этом смысле надо считать «интенсивным»? У специалистов по исследованиям радиоактивности внешней среды и оценке радиационной обстановки (а мне пришлось заниматься этим в течение без малого полувека) есть интересный критерий, позволяющий с ходу оценить значимость радиационных рисков. Это так называемое число фонов — отношение измеренной дозы к типичной многолетней фоновой в данной местности. С точки зрения реальной радиационной опасности как таковой для людей «два фона» — ничего особенно страшного, как и три, и четыре. Но совсем другое дело — сама причина быстрого повышения числа фонов. Если такое случается, все причастные министерства, ведомства и службы работают в полную силу, чтобы установить ее и по возможности устранить, — прошу в этом поверить мне на слово.

Давайте рассмотрим, какие виды ядерных частиц значимы при рассмотрении вопросов радиационной безопасности в практическом смысле. Это:

- протоны — ядра легкого изотопа водорода, тяжелые элементарные частицы с единичным положительным электрическим зарядом. Главный их источник — космическое излучение, в технике — ускорители. При распаде радионуклидов протоны не образуются;
- нейтроны — тяжелые электрически нейтральные частицы, входящие, наряду с протонами, в состав всех атомных ядер (других частиц в ядрах, как мы знаем, нет). Источники нейтронов — ядерные и электрофизические установки (реакторы и ускорители).

- альфа(α)-частицы — ионизированные ядра гелия-4. Главный их источник — радиоактивный распад тяжелых элементов как естественного, так и техногенного происхождения (в том числе тория, урана, плутония);
- электроны — легкие заряженные частицы с единичным электрическим зарядом. Они образуются как при радиоактивном распаде (тогда они называются бета(β)-частицами), так и при работе электрофизических установок (электронные ускорители);
- рентгеновские и гамма(γ)-кванты — электромагнитное (квантовое) излучение с очень малой длиной волны. Образуется как при радиоактивном распаде, так и при работе большинства ядерных и электрофизических установок (реакторы, ускорители).

Взаимодействие ИИ с веществом характеризуется двумя главными параметрами: линейной плотностью ионизации (ионизационной способностью) и длиной пробега в веществе (проникающей способностью). Эти параметры тесно взаимосвязаны по обратной зависимости: чем выше ионизационная способность, тем меньше пробег, и наоборот.

Из перечисленных типов ИИ наибольшей ионизационной способностью обладают α -частицы: они отдают всю энергию на ионизацию очень тонких слоев вещества. Поэтому они полностью задерживаются, например, листом бумаги, сантиметровым слоем воздуха или наружным (эпидермальным) слоем кожи.

Проникающая способность β -излучения заметно выше, чем у α -частиц, — чтобы его задержать, необходимы метры воздуха или несколько миллиметров алюминия или оргстекла.

Рентгеновское и (в особенности) γ -излучение обладают очень высокой проникающей способностью: чтобы поглотить его, необходимы десятки сантиметров, а иногда и метры плотных сред. Наиболее эффективны в качестве защиты от него слои металла с высокой физической плотностью — вольфрам, свинец, уран.

Эти особенности взаимодействия ИИ с веществом очень важны при обеспечении радиационной безопасности, о чем далее.

РАДИОНУКЛИДЫ И ИХ СВОЙСТВА

В окружающей жизни сталкиваться с реакторами и ускорителями нам вряд ли придется. Так что для нас источники ИИ – это космическое излучение и радионуклиды.

Здесь обсуждать мы будем в основном радионуклиды, поэтому о космическом излучении скажем лишь несколько слов. Главными его источниками являются наше Солнце и некоторые процессы, связанные с взаимодействием космических частиц с веществом в верхних слоях атмосферы. Но природа подарила нам двойную защиту от космического излучения. Во-первых, это атмосфера, плотность которой резко возрастает по мере приближения из космоса к поверхности планеты, – это наш защитный экран. Во-вторых, магнитное поле Земли, отклоняющее значительную часть космических заряженных частиц от траекторий вхождения в атмосферу.

Совместное воздействие этих факторов приводит к тому, что вклад космической компоненты в фоновое радиационное воздействие на организм человека на высотах до 1 км над уровнем моря относительно невелик – в среднем около 10%. Все остальное обусловлено ИИ различных радионуклидов.

Мы уже знаем, что радионуклидами называются нестабильные ядра, изменяющие во времени нуклонный состав в ходе спонтанной (самопроизвольной) ядерной реакции – радиоактивного распада. А само понятие радиоактивности связано именно с испусканием при протекании этой реакции излучений – как правило, ионизирующих. То, что они могут негативно влиять на здоровье человека, нам уже известно, и это влияние (радиационные риски) надо уметь оценивать.

Понятно, что для такой оценки первым делом надо ввести какую-то величину, характеризующую интенсивность радиоактивных процессов в рассматриваемом источнике. Говоря бытовым языком, ответить на вопрос: насколько он радиоактивен.

Такой величиной является активность источника излучений – количество ядерных превращений, происходящих в нем в единицу времени. Системной (в СИ) единицей активности является беккерель (Бк) – активность такого источника, в котором (в сред-

нем, статистически) происходит одно ядерное превращение в секунду. 1 Бк – это очень маленькая активность (например, активность тела человека равна в среднем около 7500 Бк), поэтому часто используются кратные ему величины – килобеккерель (кБк – 1000, или 10^3 , Бк), мегабеккерель (МБк – 1 000 000, или 10^6 , Бк) и еще более крупные.

До сих пор часто применяется также старая внесистемная единица активности – кюри (Ки). $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$. 1 Ки – на практике часто довольно большая активность. Поэтому при оценках используются дробные части этой единицы – милликюри (мКи – 0,001, или 10^{-3} , Ки), микрокюри (мкКи – 0,000001, или 10^{-6} , Ки) и др.

Величины активностей некоторых веществ в окружающем нас мире показаны в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Активности естественных и техногенных сред и веществ

Объект	Активность, Бк
Воздух на открытой местности	15 (на 1 м ³)
Воздух в помещениях	50–1000 (на 1 м ³)
Тело человека (70 кг)	До 7500
Питьевая вода	0,5–5 (на 1 л)
Вода из минеральных источников (сразу после забора)	До 40 000 (на 1 л)
Продукты питания	40 (на 1 кг)
Строительный фосфогипс	900 (на 1 кг)
Выброс при аварии на ЧАЭС	2×10^{18}
Радиоактивные вещества и материалы на АЭС	$10^{18} - 5 \times 10^{19}$
Радиоактивные вещества и материалы на крупном радиохимическом заводе	$10^{19} - 10^{20}$
Общая активность Мирового океана	10^{23}

В табл. 3.1 бросаются в глаза, во-первых, значительный разброс в величинах удельной активности воздуха в помещениях и, во-вторых, очень большая удельная активность воды из минеральных источников. То и другое имеют сходную причину: резкие различия содержания в этих веществах радиоактивного газа естественного происхождения – радона. Подробнее об этом мы будем говорить чуть позже.

Если речь идет о выделенном (имеющем фиксированное начальное количество) радионуклиде, то его активность, как и количество ядер, уменьшается во времени по известному нам из главы 2 закону радиоактивного распада – в соответствии с периодом полураспада $T_{1/2}$. Но если радионуклид сам является «дочерним» продуктом распада иного («материнского») радионуклида, то вопрос резко усложняется – тут все начинает зависеть от соотношения периодов полураспада «материнского» и «дочернего» ядер. В некоторых случаях его активность может вообще оставаться неизменной, приобретая так называемое равновесное значение. Именно с таким случаем мы встретимся, когда будем знакомиться с естественной радиоактивностью.

При решении задач радиационной безопасности очень важен также ответ на вопрос: какие ионизирующие частицы и в каком количестве испускаются при распаде рассматриваемого радионуклида?

На этот вопрос отвечает так называемая схема распада. Любой радионуклид распадается, испуская только свойственные именно ему ядерные излучения в статистически вполне определенном количестве. Например, при распаде 100 ядер цезия-137 испускается 100 β -частиц, 85 γ -квантов с энергией 662 кэВ и 7 γ -квантов с энергией 32 кэВ. Не могут при распаде этого нуклида образоваться ни α -частица, ни нейтрон, как не могут измениться только что приведенные числа. Так же обстоит дело и со всеми другими радионуклидами. Схема распада и есть совокупность типов, интенсивностей и энергий ядерных излучений, свойственных именно этому радионуклиду.

ПРИРОДНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ

Особого внимания заслуживают радионуклиды, которые оказывают фоновое радиационное воздействие на организм человека.

Это, во-первых, три чрезвычайно долгоживущих актинидных радионуклида: торий-232, уран-235 и уран-238. Мы достаточно подробно рассмотрели их в главе 2. Поэтому здесь лишь отметим, что их огромные периоды полураспада ($1,4 \times 10^{10}$, $7,1 \times 10^8$ и $4,5 \times 10^9$ лет соответственно) сравнимы с возрастом Земли, и они, несомненно, ровесники нашей планеты.

Во-вторых, это гораздо менее стабильные продукты их распада, которые в ходе взаимных превращений образуют так называемые радиоактивные семейства, или ряды. Количество членов рядов тория-232, урана-235 и урана-238 составляет соответственно 13, 20 и 17. Среди них наиболее известны два члена ряда урана-238 (радий-226 и полоний-210), а особое место при оценке фонового радиационного воздействия на организм человека занимает дочерний продукт распада радия-226 – радон-222. В природе радионуклиды этой группы находятся в состоянии радиационного равновесия (сколько атомов в единицу времени возникает, столько и распадается), так что активности всех членов ряда равны. Именно поэтому удельная активность урановой руды всегда гораздо выше, чем у извлеченного из нее урана, – на это обратили внимание еще Пьер и Мария Кюри, которые одними из первых исследовали естественную радиоактивность.

При этом относительное равновесное количество ядер любого члена ряда пропорционально его периоду полураспада, а абсолютное целиком определяется количеством ядер «прародителя» – урана или тория.

Наконец, в-третьих, это вторая группа ровесников Земли – чрезвычайно долгоживущие радионуклиды середины таблицы Менделеева. Из них наибольшую роль в формировании дозы от естественного радиационного фона играют калий-40 (период полураспада – $1,28 \times 10^9$ лет, содержание в естественном калии – около 0,012%) и в меньшей мере рубидий-87 ($4,8 \times 10^{10}$ лет; 27,8%). В частности, калий-40 почти полностью определяет соб-

ственную радиоактивность человеческого тела, а также естественную радиоактивность Мирового океана.

Для нерадионуклидных источников ИИ (например, для космического излучения) понятия схемы распада, активности и периода полураспада не имеют физического смысла. В этом случае основной характеристикой поля излучения является плотность потока — количество частиц, пересекающих единицу площади пространства за единицу времени.

Разумеется, плотность потока частиц может вводиться и как пространственная характеристика радиационного поля от радионуклидного источника (или нескольких источников). Например, для изолированного точечного источника в вакууме она уменьшается по закону «обратного квадрата» расстояния от него. Для протяженных источников в реальных средах картина выглядит гораздо сложнее.

ДОЗА — ОСНОВНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Нас, однако, сейчас интересуют не характеристики радионуклидов и радиационных полей как таковые, а риск возникновения негативных последствий при их воздействии на организм человека. Мерой такого риска является эффективная доза (далее — просто доза). Ее единица в системе СИ — зиверт (Зв). 1 Зв — достаточно большая доза облучения, в обычных условиях человек за всю жизнь получает примерно в пять раз меньше. Поэтому часто используются ее дробные доли: миллизиверт (мЗв — 0,001, или 10^{-3} , Зв), микрозиверт (мкЗв — 0,000001, или 10^{-6} , Зв).

При оценке радиационного воздействия ИИ вплоть до недавних пор использовалась и внесистемная единица — рентген (Р). При воздействии на человека лишь внешних полей гамма-излучения 1 Р соответствует 0,01 Зв.

Доза, отнесенная ко времени ее воздействия, называется мощностью дозы. Мощность дозы является важным качественным показателем: чем больше доза и меньше (при равной дозе) время ее получения, тем выше вероятность возникновения негативных по-

следствий. При нормировании биологического воздействия ИИ базовой величиной является эффективная доза, получаемая за год (мЗв/год).



Эффективная доза по своей структуре и генезису — это сложная, многообразная физико-биологическая величина. Она учитывает не только рассмотренные нами ранее ядерно-физические характеристики источника ИИ, но и характер его воздействия (внешнее, внутреннее), физико-химические особенности радиоактивного вещества в случае попадания внутрь организма человека, параметры миграции во внешней среде, перенос по пищевым цепочкам и многое другое.

При оценке последствий радиационного воздействия очень важны его условия. Если источник (источники) ИИ находится вне организма, то речь идет о внешнем облучении. В этом случае наибольшую реальную опасность представляют мощные источники нейтронов и γ -излучения. Высокая проникающая способность этих частиц обуславливает тяжелые лучевые поражения внутренних органов. Внешнее β -излучение представляет серьезную опасность при нахождении радиоактивного материала непосредственно на по-

верхности кожи (радиоактивное загрязнение кожных покровов). В этом случае на загрязненном участке развивается так называемое местное лучевое поражение (МЛП) — лучевая травма, лучевой ожог. На месте лучевой травмы возникает глубокая, трудно заживающая язва. При значительной площади загрязнения возникает очевидная угроза жизни и здоровью пострадавших — по аналогии с ожогами от открытого пламени. Особо неблагоприятным случаем является воздействие внешнего β -излучения на хрусталик глаза, обладающий очень высокой радиочувствительностью.

Внешнее α -излучение с энергией, характерной для распада естественных радионуклидов (единицы МэВ), вполне безопасно, так как оно поглощается уже тонким слоем воздуха и наружным (эпителиальным) слоем кожи.

Защита от проникающего внешнего излучения всегда есть комбинация трех факторов: материала, расстояния, времени. Со временем все понятно: чем меньше находишься в поле ионизирующего излучения, тем лучше. Несложно и с расстоянием: плотность потока ионизирующего излучения точечного источника убывает пропорционально квадрату расстояния от него.

Что до материала, то для защиты от β -излучения обычно вполне хватает сантиметрового слоя органического стекла или алюминия. Главное — не допустить загрязнения β -излучателями открытой кожи, для чего нельзя пренебрегать спецодеждой. Для защиты от γ -излучения, как мы уже знаем, эффективны слои металла возможно более высокой плотности — железо, свинец, уран (как это ни парадоксально). Однако реальной основой биологической защиты ядерно-технических установок (реакторов, ускорителей и др.) является бетон. Хотя он физически гораздо менее эффективен, чем железо и свинец, но и экономически, и конструктивно толстая стенка из бетона намного предпочтительней.

Защита от нейтронов наиболее эффективна при комбинированном построении. Собственно нейтроны лучше всего поглощаются легкими средами (водой, полиэтиленом, парафином), поэтому они и являются в этом случае основой защитных барьеров. Но в конструкцию обычно вводят и внешние металлические эк-

раны для поглощения β - и γ -излучений, возникающих в материале легкого поглотителя вследствие ядерных реакций, инициируемых нейтронами.

Специальной защиты от внешнего α -излучения не требуется. Вот пример. Природные источники α -излучения (в частности, топливные урановые таблетки для твэлов АЭС) при внешнем облучении тела человека совершенно безопасны — вспомним [рис. 2.5](#) из главы 2. Хотя общая активность урана в топливной таблетке очень велика (там его просто много), почти все α -частицы, испущенные при его распаде (а других чистый уран почти не испускает), полностью поглощаются собственным материалом таблетки и наружу не выходят — пробег α -частицы в веществе таблетки не превышает нескольких микрон. Те же α -частицы, которые были испущены с поверхности таблетки, полностью поглощаются сантиметровым слоем воздуха или внешним «мертвым» (эпидермальным) слоем кожи — это мы уже знаем. Так что на вопрос о судьбе человека, держащего в руках ящик на [рис. 2.5](#), я отвечаю: жив-здоров, чего и нам желает.

Конечно, далеко не все источники внешнего облучения столь безобидны. Работа в условиях внешних радиационных полей β -, γ - и нейтронного излучений с их высокой проникающей способностью требует предельного внимания, а главное, неукоснительного соблюдения жестких норм радиационной безопасности. Иначе и до беды недалеко. Автору, профессиональному инженеру-ядерщику, это, к сожалению, слишком хорошо известно.

Другой способ «поймать дозу» — допустить попадание радионуклидов в усваиваемой форме внутрь организма с воздухом, пищей и водой. Тогда эти радионуклиды начинают облучать организм изнутри, превращаясь в радиотоксины. Это внутреннее облучение. При внутреннем облучении опасны все радионуклиды, но более других, как уже указывалось, α -излучатели. Защита от внутреннего облучения только одна — не допустить попадания радионуклидов в организм, для чего следует пользоваться индивидуальными средствами защиты органов дыхания (фильтрующими респираторами, противогазами с аэрозольной коробкой и т. д.) и контролировать содержание радионуклидов в воздухе, питьевой воде и продуктах питания.



Многие химические элементы вообще и радионуклиды в частности при попадании в организм распределяются в нем неравномерно, сосредотачиваются в отдельных органах вследствие предопределенных строением организма биохимических процессов. Попавший в организм кальций фиксируется в костной ткани, йод – в щитовидной железе и т. д.

К большому сожалению, организм не только не отличает стабильные нуклиды от радиоактивных, запуская последние по привычным биохимическим цепочкам (именно так концентрируется в щитовидной железе опаснейший йод-131, принесший столько несчастий при чернобыльской аварии), но и путает химически сходные элементы. Например, в костную ткань он осаждает не только необходимый для жизни стабильный кальций, но и крайне токсичные радиоактивные изотопы стронция, радия и плутония, что ведет к неминуемому переоблучению одной из наиболее радиочувствительных биосубстанций – красного костного мозга. Такие органы и называют критическими по тому или иному избирательно поглощаемому радионуклиду (рис. 3.1). Есть радионуклиды, которые распределяются в организме более или менее равномерно (калий-40, цезий-137); для них критическим органом является тело в целом.

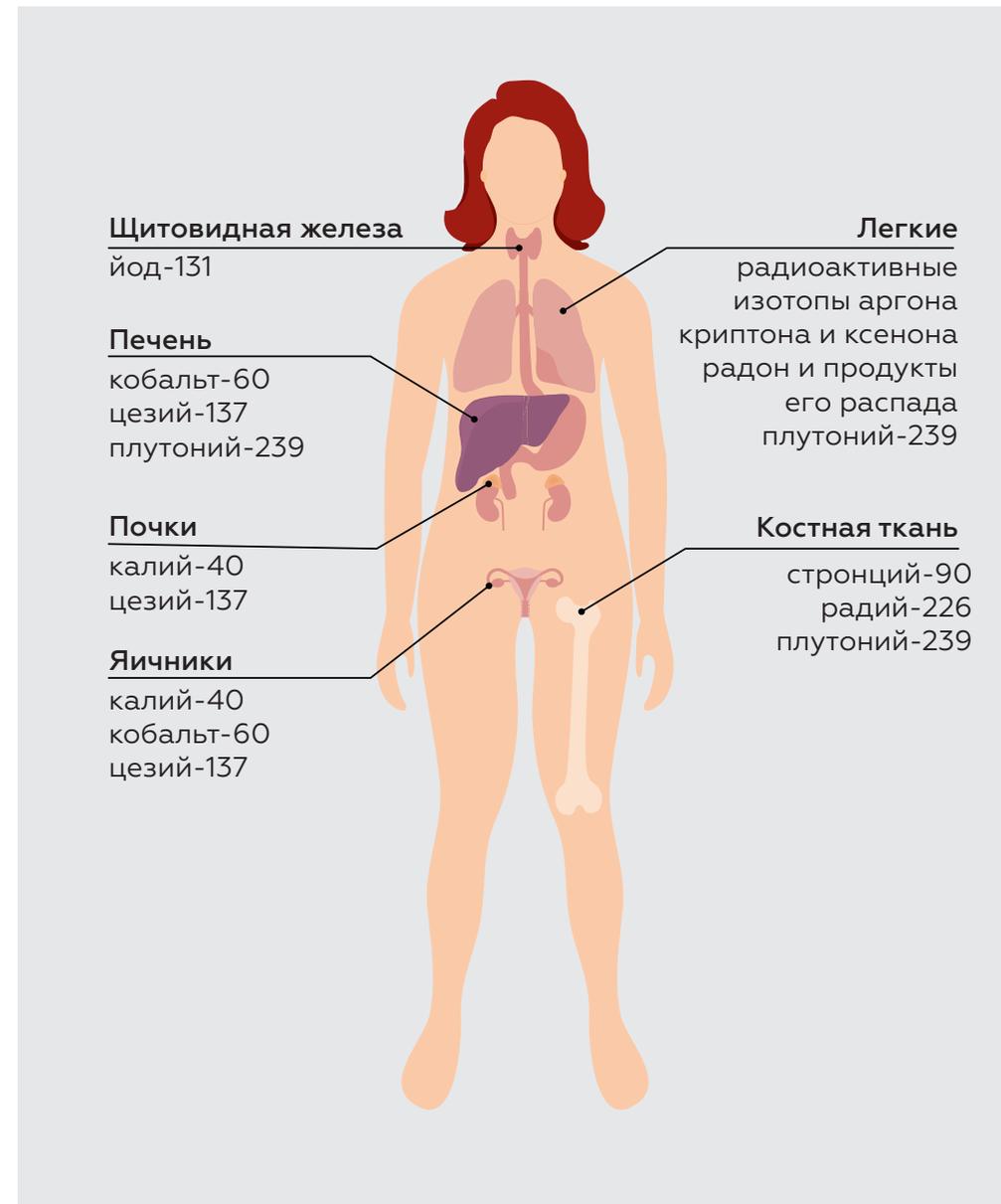


Рисунок 3.1. Критические органы по отдельным радионуклидам

РАДИАЦИЯ В ОКРУЖАЮЩЕМ МИРЕ: ОТКУДА ЧТО БЕРЕТСЯ?

В этом, последнем, параграфе главы 3 я попытался ответить в форме короткого рассказа на часто задаваемые мне вопросы о реальных (таких меньше) и надуманных (таких гораздо больше) радиационных опасностях окружающего нас мира. А заодно и дать несколько советов — буду надеяться, что к ним прислушаются.

Первый и самый главный совет: никогда не паниковать — и не только в вопросах радиационной безопасности. Страх — наихудший советчик в любых случаях, и решения, им продиктованные, очень редко бывают верными. А в ситуациях, связанных с потенциальными угрозами и рисками, опираться на мнение профессионалов и здравый смысл, а не на фейки «хайполовов».

Теперь по существу. Начнем с табл. 3.2, в которой отражено среднее фоновое радиационное воздействие на человека в наши дни. Тут необходимы некоторые комментарии.

Таблица 3.2

Средние годовые дозы, приходящиеся на взрослого человека, от постоянных источников излучения (на уровне моря)

Источник облучения	Население Земли в целом (6 млрд чел.)		Население промышленно развитых стран (1 млрд чел.)	
	Доза, мЗв	Вклад, %	Доза, мЗв	Вклад, %
Естественный фон, в том числе: – долгоживущие естественные радионуклиды (кроме радона и продуктов его распада) – космическое излучение	0,8	33	0,8	22,6
	0,5	20,6	0,5	14,1
	0,3	12,4	0,3	8,5

Продолжение таблицы 3.2

Источник облучения	Население Земли в целом (6 млрд чел.)		Население промышленно развитых стран (1 млрд чел.)	
	Доза, мЗв	Вклад, %	Доза, мЗв	Вклад, %
Радон и продукты его распада при вдыхании	1,2	50	1,5	42,3
Ионизирующие излучения в медицине	0,4	16	1,2	33,8
Глобальные выпадения продуктов ядерных испытаний	0,015	0,5	0,023	0,63
Космические лучи (при высотных авиаперелетах)	0,001	0,04	0,002	0,05
Прочее	0,001	0,04	0,002	0,05
Общепромышленные выбросы	0,011	0,38	0,02	0,54
Предприятия атомной энергетики и ЯТЦ	0,001	0,04	0,001	0,03
Всего	2,4	100	3,6	100

Во-первых, не раз и не два автору приходилось встречаться при разных обстоятельствах с антиатомным ужасиком на тему «Техногенная доза уже сейчас превышает естественную».

Наиболее трудной при ответе на этот вопрос является первая его часть (техногенная доза), поскольку не только в популярной литературе, но и в серьезных научных статьях и документах дается разное определение этого понятия — в зависимости от подхода.

Согласно одному подходу под техногенной понимается доза, обусловленная лишь искусственными, изначально в природе не суще-

ствовавшими источниками ИИ. Согласно другому к ним добавляются и естественные источники ИИ, дозообразующее воздействие которых, однако, может осуществляться лишь в условиях целенаправленного ситуационного и технологического воздействия человека. Пример: космическое излучение как таковое, несомненно, является естественным, но в качестве значимого дозообразующего фактора оно начинает быть важным лишь при цивилизационном освоении больших высот (авиация, космонавтика). Радон, конечно, природный радионуклид, но его значимость для радиационной безопасности проявляется только в условиях длительного пребывания людей в замкнутых помещениях.

Я никогда не ввязывался и не собираюсь ввязываться в этот, в общем, довольно схоластический спор, напоминающий мне известную дискуссию между остроконечниками и тупоконечниками о правильности разбивания яйца. Но при встрече с утверждениями типа только что приведенного о нем следует помнить.

Во-вторых, можно видеть, что практически вся годовая доза, получаемая человеком, обусловлена воздействием фоновых источников ИИ. Но значения фоновой дозы могут существенно меняться в зависимости от многих обстоятельств (высота над уровнем моря, наличие урановых или ториевых руд, тип жилища, его локализация на местности и т. д.). При этом все различие (0,8 мЗв/год) между годовыми фоновыми дозами, получаемыми населением промышленно-развитых стран и Земли в целом, обусловлено ядерно-медицинскими процедурами.

В-третьих, роль чисто техногенных источников излучения при формировании фоновой дозы ничтожна: наибольший вклад вносят глобальные выпадения продуктов атмосферных ядерных испытаний (0,5% и 0,63%). Но такие испытания не проводятся нигде на нашей планете уже почти четверть века. А влияние на величину фоновой дозы атомной энергетики и предприятий ядерного топливного цикла и вовсе пренебрежимо мало (0,04 и 0,03%). Радиационный мониторинг, всегда в непрерывном режиме ведущийся вблизи АЭС, не обнаруживает никаких отличий величин регистрируемых доз от их средних фоновых значений, характерных для данного региона в целом. А вот радиационное воздействие общепромышленных выбросов (в которое весьма

значимый вклад вносит угольная генерация — как мы знаем, около 40% мировой) выше «ядерного» более чем в десять раз! Как говорится, выводы делать вам...

РАДОН И ВОКРУГ НЕГО

Однако более всего в табл. 3.2 обращает на себя внимание значительный вклад, вносимый в фоновую дозу воздействием радона-222, — почти половина! И хотя радон непосредственного отношения к атомной энергетике не имеет, о нем следует поговорить уже только поэтому.

Что представляет из себя радон как таковой? Это тяжелый (почти в восемь раз тяжелее воздуха), не имеющий цвета и запаха инертный газ, шестой и последний в нулевой группе таблицы Менделеева. Стабильных изотопов радон не имеет. С точки зрения радиационного воздействия на человека особый интерес представляет его наиболее долгоживущий изотоп — радон-222 (его период полураспада — 3,8 часа).

Как продукт распада радия-226, он входит в радиоактивный ряд урана-238, являясь по генезису природным радионуклидом. Другими словами, он непременно есть везде, где есть естественный уран, который, как мы знаем, на 99,3% и состоит из урана-238. А уран в больших или меньших концентрациях всегда содержится почти во всех объектах внешней среды, как естественных, так и техногенных. Для нас же здесь важнее всего, что его измеримые количества содержатся и в почве, и в минеральных стройматериалах. Что такое кирпич, цемент, бетон? Это, в общем-то, песок и глина — продукты разрушения гранитных пород. А где гранит — там всегда и уран, и в количествах иногда не-маленьких.

На открытой местности радон, в определенном количестве испускаемый в атмосферу любым урансодержащим веществом (в том числе и почвенным слоем), из-за ветра, конвекции, да и просто объемного разбавления в значительной концентрации где-либо скопиться не может. Иное дело — замкнутое пространство (пещера, шахта, подвал, комната). Здесь концентрации радона всегда гораздо выше.

Возникает вопрос: почему радон так опасен? Он же инертный газ и, естественно, ни в каких биохимических процессах участвовать не может. Вдохнул — выдохнул... Дело, однако, в том, что, во-первых, некоторая его часть растворяется в крови и разносится по всему организму. Кроме того, он сорбируется на любых пылевых, аэрозольных и смолистых отложениях в дыхательных путях; именно поэтому радоновая опасность резко повышается для шахтеров, у которых запыленность легких, увы, нередкое явление, и для курящих — из-за смолистых отложений, обусловленных табачным дымом.

А во-вторых, это еще полбеда. У радона сравнительно малый период полураспада, и его собственное излучение не создало бы и десятой доли возникающих от него проблем. Даже с учетом того, что он, как и любой α -излучатель, достаточно опасен при внутреннем облучении. Однако по-настоящему страшны радиоактивные продукты его распада, в особенности изотопы полония, в первую очередь полоний-210. Вот они-то, в отличие от собственно радона, химически активны, достаточно прочно удерживаются организмом и эффективно воздействуют на живые ткани (в том числе на жизненно важные) опаснейшим при внутреннем воздействии α -излучением. Таким образом, собственно радон играет сравнительно скромную, но зловредную роль переносчика, как грызун при распространении чумы.

При равновесной объемной активности в воздухе свыше 100 Бк/м³ радон, согласно действующим в нашей стране нормативным документам, уже представляет значимую радиационную опасность. Именно эта величина является пороговой допустимой концентрацией при проектировании новых зданий и сооружений. Для старых построек (до 2000 года) допустима объемная активность радона до 200 Бк/м³. При превышении этой величины обязательны защитно-профилактические мероприятия. При концентрации радона свыше 400 Бк/м³ постоянное пребывание и проживание в помещении запрещается.

Почему, чем это грозит человеку? В первую очередь раком. По современным (правда, довольно консервативным) оценкам, только в США за счет проживания людей в жилых помещениях с объемной активностью радона свыше 100 Бк/м³ могло произойти около 10 000 дополнительных случаев заболевания раком лег-

ких. Для государств СНГ эта цифра составляет приблизительно 15 000, и предстоит еще выявить несколько миллионов жителей, которые, сами того не ведая, получают за счет домашнего радонового облучения дозу больше, чем в чернобыльской зоне. По указанным оценкам, объемная активность радона в воздухе жилых помещений, равная 400 Бк/м³ (что для очень многих стран, и не только в СНГ, отнюдь не редкость), влечет такой же дополнительный риск, как выкуривание пачки сигарет в день.

Вывод несомненен: мы имеем дело с реальной опасностью, пренебрегать которой нельзя. Об этом свидетельствует вполне достоверная статистика повышенной смертности от рака легких среди шахтеров, в особенности при работе в урановых шахтах.

Достоверность этой статистики подчеркивается тем обстоятельством, что после осознания существования угрозы и принятия простейших защитных мер, направленных на снижение концентрации радона в забоях, уровень заболеваемости раком резко снижался.

Но радон, конечно, выделяется не только из урансодержащих минералов. В растворенном виде он всегда содержится в воде (и выделяется из нее). Он есть и в природном газе, откуда при сжигании переходит в воздух помещений — правда, в существенно меньшем количестве (рис. 3.2). И совсем уже мало радона в осадочных породах (мел, мрамор, известняк) и сухих органических материалах (дерево, солома). Однако прошу не трактовать эти сведения как призыв ко всеобщему переселению в шалаши, а обратиться к рассмотрению защитных мер в жилищах, достойных современного человека.

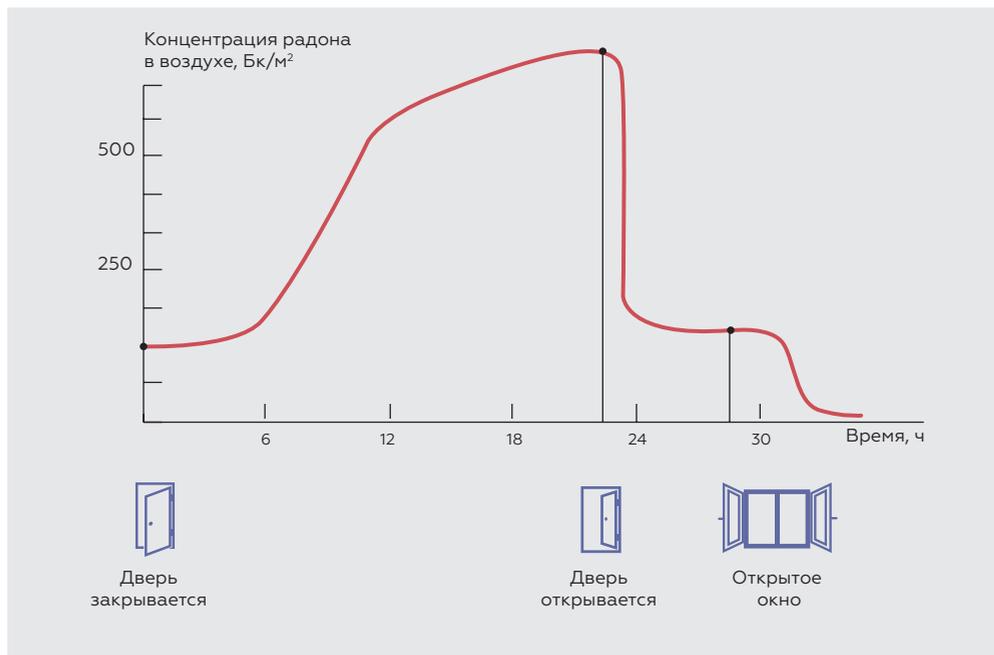


Рисунок 3.2. Изменение концентрации радона в помещении в зависимости от режима вентиляции

Самой простой и самой эффективной мерой снижения радоновой опасности является вентиляция. На рис. 3.2 показано изменение концентрации радона в комнате, где всего-то мер принималось, что открывали дверь и окно. Видно, что простейшая проточная вентиляция (сквозняк) уменьшает концентрацию радона в десятки раз! Именно эффективная вентиляция забоев явилась тем магическим средством, которое спасло жизни многих шахтеров. Так что проветривание помещений полезно не только для освежения воздуха. В 5–10 раз снижают выделение радона стенами помещений такие простейшие и хорошо известные вещи, как их побелка, покраска или оклейка обоями. Главный источник (около 90%) поступления радона в помещения первого этажа — почва, а главные пути — трещины и щели в полу. Отсюда и немедленная рекомендация: заделать их получше, заодно и мыши переведутся. А кардинально улучшить ситуацию можно, если предусмотреть в конструкции дома продуваемую

воздушную подушку между полом и фундаментом и/или интенсивную вентиляцию подвала. Но вот увлекаться увеселениями в самом подвале не стоит — концентрация радона там всегда наибольшая.

И конечно, надо с умом подходить к выбору и оценке экологического качества стройматериалов для сооружения дома. Особая роль при этом принадлежит сертификации как гарантии качества, имеющей юридическую силу. В любом случае следует знать, что наиболее радоноопасны стройматериалы на основе зол и шлаков, а также фосфогипса. Безответственность при выборе стройматериалов может привести к очень неприятным последствиям. Так, известен случай, когда использование для массового гражданского строительства шлакоблоков привело к вынужденной необходимости переселить жителей целого поселка из-за аномально высоких и с точки зрения радиационной безопасности совершенно неприемлемых концентраций радона в жилых помещениях (вплоть до десятков тысяч Бк/м³). Столь же тяжелые последствия в контексте радоновой опасности могут наступить при неправильном выборе места строительства домов — над геологическим разломом или на рудном отвале.

Самое же главное — если возникают какие-либо сомнения относительно радоноопасности вашего жилища, не пренебрегайте услугами специалистов (таким контролем занимаются организации, прошедшие в установленном порядке процедуру аккредитации). Но разного рода народных умельцев, пробравшихся, увы, и в эту сферу, обходите за версту. Самодеятельность тут совершенно недопустима.

Действующие нормативы требуют проведения защитных мероприятий во всех случаях, когда мощность измеренной дозы гамма-излучения в помещении превышает мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/час. Определенным образом нормируется и естественная радиоактивность стройматериалов для жилищного и дорожного строительства, минеральных удобрений. Особо оговаривается объемная активность радона-222 в питьевой воде: она, по российским нормам, не должна превышать 60 Бк/кг.

Об этом приходится говорить, имея в виду не столь давнюю антирадоновую кампанию в СМИ, где радон назывался и «газом смер-

ти», и «невидимым убийцей», и «СПИДом из земли» и т. п. Такая «пропаганда здорового образа жизни», не давая ровным счетом ничего для снижения опасности по существу, может обусловить за счет психических расстройств и стрессовых состояний едва ли не худшие со всех точек зрения последствия, чем собственно радон.

РАДИАЦИОННОЕ АССОРТИ С ЙОДОМ НА ЗАКУСКУ

А вот теперь ассорти из наиболее типичных и любопытных вопросов об ИИ и радиационной безопасности, которые задавались мне на встречах с молодежью.

Может ли человек без помощи специальных приборов ощущать ионизирующую радиацию или чувствовать радиоактивное загрязнение продуктов питания и питьевой воды на вкус?

Увы! К сожалению, чувствительные органы, способные ощутить даже очень интенсивные, заведомо опасные для жизни и здоровья потоки ИИ или радиоактивное загрязнение продуктов питания, у человека отсутствуют. А что до заявлений отдельных людей об их якобы способности к такому восприятию, то здесь вопрос стоит лишь о подоплеке таких заявлений. Это может быть истерическое самовнушение, стремление к рекламе-однодневке, намеренная ложь (вероятно, с корыстными целями) — все что угодно, кроме правды.

Имеет ли смысл ходить на рынок или в магазин с бытовым дозиметром?

Законом это не запрещается, качества покупаемых продуктов не снизит, а на рынке за счет возможного испуга продавца можно даже попытаться сбить цену. Другое дело, что, вопреки слухам, продукты с радиоактивным загрязнением, уровень которого превышает порог достоверной регистрации бытовыми приборами,

лежат отнюдь не на каждом прилавке. Санитарный контроль все-таки существует и на рынках, и тем более в магазинах, а радиационный контроль является обязательной его частью. Что же до возможности измерить концентрацию радионуклидов, сопоставимых с нормативными пределами их годового поступления в организм, то речь здесь идет о столь низких уровнях, что бытовые дозиметры оказываются совершенно бесполезными.

Правда ли, что грибы и другие живые организмы и природные субстанции обладают свойством накапливать радионуклиды?

Да, это так. Аккумуляция грибами радионуклидов (в частности, цезия-137) была отмечена еще в начале 1960-х годов при изучении радиологических последствий атмосферных ядерных испытаний. Тот же эффект наблюдался и после чернобыльской аварии. Наибольших значений (двадцатикратное превышение предельно допустимого значения) концентрация цезия-137 в грибах достигла на второй год после аварии, в 1987 году. Это связано с миграцией радиоцезия в глубину почвенного слоя. Однако уже в 1988 году она снизилась в несколько раз и продолжает снижаться.

Накопление радионуклидов грибами очень сильно зависит от их видовой принадлежности — оно для разных видов может изменяться в сотни раз. Это и понятно: грибницы различных видов формируются в разных условиях, да и их биохимия далеко не одинакова. Грибы, произрастающие в условиях повышенной влажности (свинушки, сыроежки, лесные шампиньоны, чернушки, рядовки), накапливают в среднем в десять раз больше радионуклидов, чем белые грибы, подберезовики, подосиновики, опята и лисички. Однако, разумеется, при наличии подозрений на радиоактивное загрязнение трофеев «тихой охоты» решающая роль при решении вопроса «есть или не есть?» должна принадлежать не сортировке, а радиационному контролю. Если уж такового под рукой нет, как нет и сил удержаться от жареных грибов, то их надо хотя бы вымочить или отварить. Одно лишь кратковременное отваривание снижает концентрацию цезия-137 в пять-семь раз. Вообще же, потребление грибов

на среднем уровне (около 10 кг в год на человека) в настоящее время реальной радиологической опасности не представляет. Бледная поганка намного страшнее...

Правда ли, что кагор защищает от радиации?

Ну почему же только кагор?.. В списке того, что народными целителями предлагалось и предлагается в качестве радиопротекторов (средств, снижающих негативное воздействие ИИ), значатся также экстракт сибирских грибов, настои боярышника и медвежьих ушек, прополис, мумиё, кокосовые орехи, вытяжка из акулей печени (!) и даже человеческая моча (!!), а также многое другое. Ну и разумеется, пиво и водка (последнее средство вообще почти универсально). Все эти средства (и другие, часто весьма экзотичные) объединяет только одно: полнейшая



Давай еще по одной!

Давай!
А то лучевая
болезнь
процветает!

бесполезность — если не считать возможного психологического эффекта самоуспокоения. Если же говорить серьезно, то проблема радиопротекторов — одна из сложнейших в современной радиационной медицине.

Но вот вопрос, с удивительным постоянством повторяющийся, в незначительно отличающихся формулировках, на встречах и в ИЦАЭ, и в других аудиториях: надо ли жителям прилегающих к АЭС регионов пить для профилактики йод?

Сходство постановки вопроса говорит об общности интереса к проблеме — не исключено, что и читателей этой книги он тоже волнует. Точнее, целых два вопроса. Во-первых, для профилактики чего? Во-вторых, почему именно йод?

А вот здесь односложно не ответишь. Формально, конечно, ответить можно — это примерно то же самое, как для профилактики обморожения ампутировать себе уши. И по существу, против истины такой ответ, уверяю вас, вовсе не погрешит. Но останутся ли им довольны вопрошающие? Не сочтут они его проявлением профессионального снобизма? А вот этого профессионалу допустить никак нельзя.

Дело в том, что события и явления, легшие в основу «легенды о йоде», имеют общий контур. Существует простейшая и действительно очень эффективная защитная методика, умелое использование которой позволяет в некоторых важных, но очень редких случаях существенно снизить степень и масштабы лучевого поражения. Это так называемая йодная профилактика, или йодная блокада.

Она применяется при тяжелых реакторных авариях с разрушением активной зоны, когда одной из главных опасностей становится внутреннее облучение за счет избирательного поглощения радиоактивного изотопа йода-131 щитовидной железой человека, — вспомним наш разговор о критических органах. Так было, в частности, в Чернобыле, когда в течение первого месяца после аварии именно йод-131 (период полураспада — 8,03 дня) определял радиационную обстановку, в том числе и в регионах, подвергшихся радиоактивному загрязнению из-за атмосферного переноса.

Чтобы уменьшить это воздействие, люди получали для приема внутрь таблетки, содержащие йодистый калий, йод в которых, естественно, был нормальный, стабильный. При этом щитовидная железа на некоторое время насыщалась йодом досыта, после чего любой другой йод, радиоактивный в том числе, уже не усваивался и сравнительно быстро выводился из организма естественным путем. Правильно проведенная йодная профилактика позволяет снизить парциальную дозу от внутреннего облучения йодом-131 в десятки раз.

В качестве лирического отступления: что до распространенного мнения о столь отвратительном вкусе йодных таблеток, что без запивания водкой (ну конечно же!) их просто не проглотить, то налицо опять-таки сильное преувеличение. По моему собственному ощущению, это, разумеется, не сникерс, однако требование водки «на запив» определяется иными обстоятельствами...

Но вернемся к серьезным темам. Все это так, но речь-то идет, повторяю, об экстремальной, чрезвычайной радиационной обстановке при тяжелейшей ядерной аварии с разрушением активной зоны мощного реактора! А таких аварий за всю почти семидесятилетнюю историю атомной энергетики было всего три – Три-Майл-Айленд (США, 1979), Чернобыль (СССР, 1986) и Фукусима-1 (Япония, 2011), и, по существу, лишь в Чернобыле йодная блокада была необходима по-настоящему остро. Добавлю, что на современных АЭС вероятность подобной аварии практически сведена к нулю, а российская атомная энергетика по уровню безопасности находится в числе мировых лидеров.

Тогда откуда призывы пить йод для профилактики? А вот откуда.

4 ноября 2004 года. Незначительная неисправность на Балаковской АЭС в Саратовской области вызывала краткосрочную (на два дня) остановку одного из четырех энергоблоков ВВЭР-1000 на ней. Радиационная опасность отсутствовала в принципе – неисправность (возникновение трещины в трубопроводе узла питательной воды парогенератора) произошла в радиационно-безопасной зоне энергоблока. Ситуация, когда йодная блокада, собственно, и должна применяться (тяжелая авария с разрушением активной зоны реактора и выходом йода-131 из ядерного

топлива во внешнюю среду), была исключена полностью с самого начала. И тем не менее началось нечто неописуемое.

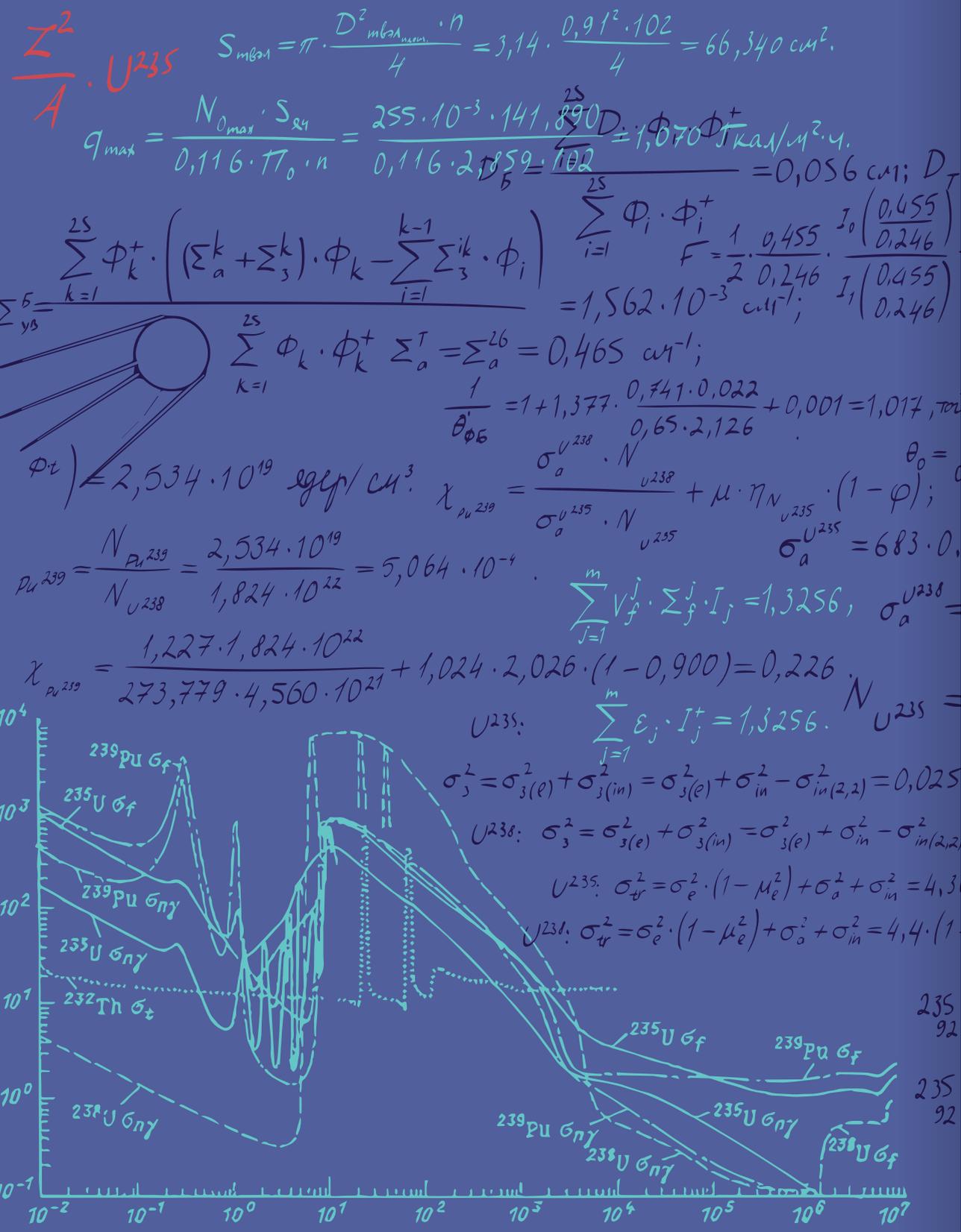
Оперативно осуществленный с помощью хорошо организованных и умело управляемых слухов и сплетен залповый информационный вброс чудовищных фейковых нелепиц о «тяжелой аварии на АЭС» и «страшной угрозе жизни людям во всем Приволжском регионе» при запоздалой и непозволительно вялой реакции на происходящее со стороны официальных инстанций привел к тому, к чему не привести не мог и чего организаторы кампании, собственно, и добивались, – к массовой панике на антиатомной почве. А поскольку призыв «пить йод» был в этих слухах и сплетнях практически единственной – хотя и вопиюще безграмотной – рекомендацией (о каких-либо иных алгоритмах действий людей в условиях аварийной ситуации на АЭС первоисточники сплетен, вероятно, просто не знали), население стало массово его пить... Йод в виде обычного спиртового раствора для дезинфекции порезов кожи был буквально выметен из аптек и включен в рацион – иногда в количествах, явно небезвредных для здоровья, поскольку при внутреннем употреблении он ядовит. Не обошлось и без отравлений – хорошо, что в легких формах... Будучи сам родом из Саратова, я в эти дни часто говорил по телефону с родственниками и стал тогда свидетелем всего этого бардака, как принято сейчас говорить, в дистанционном режиме.

Были и другие истории, подобные балаковской, – некоторые, к сожалению, произошли совсем недавно. Они дали обширную пищу для размышлений о том, как общество относится к радиационным рискам, да и к атомной энергетике в целом. И вот главный вывод: оптимистические надежды на свершившийся уход с общественной арены противников атомной энергетики – иллюзия, самообман. Они никуда не ушли, они существуют, они действуют и будут действовать впредь. Слишком велика тяга у некоторых журналистов и блогеров к жареным фактам, подаваемым по принципу «свободы бескостного языка» в сочетании с чудовищной некомпетентностью. И здесь усталыми сентенциями типа «пора прекратить информационное хулиганство» обойтись нельзя.

По большому счету, для нейтрализации информационных провокаций — и не только применительно к атомной энергетике — надо, во-первых, приучить людей верить не провокаторам, а специалистам (об этом уже говорилось). Но для этого специалистам надо аргументированно, уважительно разговаривать с людьми, терпеливо и настойчиво учить и убеждать их. А во-вторых, действовать на опережение. Надо же понимать, что молчание не то что в дни, а и в часы развертывания таких провокаций люди будут интерпретировать однозначно — как замешательство, как раздумья о том, что можно сказать, а чего нельзя. И уж во всяком случае, зачем же забывать, что умышленное распространение заведомо ложной информации есть уголовно наказуемое деяние, которое никому не должно сходить с рук.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ. ОБЩЕСТВО И АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА — СРЕЗ НЕПРОСТЫХ ОТНОШЕНИЙ

Глава 4



Эту, последнюю, главу нашей книги мне хотелось бы начать с проблемы, о которой уже упоминалось во введении. С глубоко очень актуального и сейчас высказывания бывшего генерального директора МАГАТЭ Ю. Аmano: «Главное для атомной энергетики – обретение общественного доверия». И здесь главные вопросы: что способствует укреплению этого доверия, а что мешает? Что нужно сделать для того, чтобы общество увидело атомную энергетику именно такой, какая она и есть в действительности? Со всеми ее плюсами и минусами, достоинствами и недостатками – и без масок ангела или дьявола.

Но начинать приходится, к сожалению, с невеселого – с констатации того факта, что при обсуждении ядерных вопросов в обществе и СМИ мы часто имеем дело не с достоверной информацией, не с изложением фактов и событий так, как есть, а с представлением их в таком зеркале, для которого и понятие «кривое» можно считать комплиментом.

В качестве примера – три дословных высказывания:

«При растворении радиоактивности в воде она увеличивается в тысячу раз» (журналист).

«Российский гражданин должен получать дозу излучений, равную нулю» (политик).

«От лучевой болезни вследствие чернобыльской аварии погибло 300 000 человек» (телеведущая).

Весь этот клинический бред приведен мной здесь наудачу в том смысле, что высказываний и цитат подобного рода можно без труда привести и три, и тридцать три, и сто тридцать три.

Как профессионалу-атомщику реагировать на подобную галиматью? Смеяться, покручивая пальцем у виска? Можно, конечно... Но это будет смех с ощутимым привкусом настороженности. И понятно почему: нет полной уверенности в том, кому в итоге поверят при обсуждении проблем атомной энергетики – ему или авторам высказываний подобного рода.

Отсюда и главный вопрос, который встает перед обществом (и конечно, не только в отношении атомной энергетики): кому верить, а кому нет. И какие смысловые фильтры должен поставить перед своим сознанием человек нашего времени, чтобы не стать

в своих воззрениях, решениях и действиях паяцем, жалкой ма-рионеткой в чужих руках.

Начнем с очевидного. Наш век — эпоха профессионалов. Безвозвратно ушли в прошлое времена универсальных знатоков и мастеров — специалистов во всех областях человеческих знаний и технологий, таких как Леонардо да Винчи и Ньютон. Более того, структурирование знаний и технологий продолжается и сейчас, утверждая единственно возможный в наше время (во всяком случае, в естественнонаучной и инженерной средах) принцип — доверять профессионалам. Иначе мрак, беспросветность. Мало того, что начинаются поиски общих путей развития и способов решения конкретных проблем на заведомо ложных направлениях. Печальный опыт истории свидетельствует вполне однозначно: непонимание этой непреложной аксиомы делает общество беззащитным перед возможностью трагического перехода от недоверия к специалистам к их травле, а заодно и травле целых направлений естествознания и техники.

Конечно, из сказанного вовсе не следует, что специалисты безгрешны, как ангелы, и ошибаться не могут. Могут, хотя вероятность того, что они ошибутся все разом, исчезающе мала. Однако гораздо худший выбор — доверять дилетантам, а хуже всего — в ситуации, когда специалисты дружно высказывают противоположное мнение.

Нельзя сказать, что общество этого вообще не понимает. Мы лечим зубы у стоматолога и наверняка плотно захлопнем рот, если бормашина окажется в руках даже сверхпопулярного журналиста. Мы доверяем опытному водителю и, скорее всего, как ошпаренные выскочим из автобуса, если узнаем, что по сложной горной дороге его будет вести даже сверхбоязтливая телеведущая. Мы шьем костюмы у опытного портного и в страшном сне не рискуем натянуть на себя наряд, сработанный даже суперрейтинговым политиком.

Но атомная техника и энергетика, увы, исключение. При их обсуждении журналисту, телеведущей и политику слишком часто доверяют больше, чем профессионалу-атомщику.



Крупный отечественный специалист по ядерной энергетике профессор А.Ю. Гагаринский в своей прекрасной книге «Люди и атом», метко называя это явление «пирамидой перевернутого доверия», приводит по-своему замечательное высказывание на общественных слушаниях некоего противника строительства АЭС: «Как я вам буду верить, когда вы за это деньги получаете?»

Аргумент из уст «атомофобов» в дискуссиях, кстати, достаточно распространенный. Но разве стоматолог, водитель и портной за свою работу не получают деньги? Получают. И профессионал-атомщик тоже. Но вот его оппоненты, что очные, что заочные, «независимые эксперты», степень независимости которых часто определяется лишь глубиной неприязни к ядерным технологиям, — они-то чем живут? За независимость как таковую никто ведь по определению не платит (теоретически, во всяком случае), а эти эксперты своим внешним видом никак не напоминают нищих дервишей. А ответ на этот вопрос «я получаю деньги за то, что я против вас всех» выглядит, согласитесь, довольно странно. И немедленно вызывает новые вопросы: а от кого получаете? И под каким забором вас как независимого эксперта нашли — и кстати, кто нашел?

Но вернемся к главной проблеме: чего и как в идеале мы хотим добиться от общества при формировании его доверия к ядерным технологиям?

С одной стороны, в нашей стране отношение общества к атомной энергетике в общем выглядит вполне благоприятным. По данным на 2019 год, позитивно к ней относятся около трех четвертей населения и более половины считают ее при этом «зеленым», чистым видом производства энергии. Но с другой — нельзя и отрицать, что это отношение может быть и благоприятным, но при этом весьма настороженным.

Что это означает? Для меня вот что: при всем позитивном отношении к атомной энергетике в России происшествия на АЭС, да и вообще на ядерных объектах (пусть и самые незначительные) будут рассматриваться обществом в свете поступающей к нему информации «под увеличительным стеклом» — с очевидно повышенным вниманием, если не тревогой. А по сравнению с происшествиями на неядерных объектах — назовем вещи своими именами — часто и предвзято, необъективно.

Между прочим, такое отношение в нашей стране к ядерным технологиям отнюдь не является каким-то особенно обидным для них — в мире оно бывает и гораздо худшим. В той же Германии, да и в некоторых других странах стараниями антиатомных «экологов» атомная энергетика приобрела устойчивый образ технологического сатаны.

Понятие «эколог» неслучайно взято здесь в кавычки. Экология сама по себе есть наука о взаимосвязях во внешней среде и месте человека в ней — наука чрезвычайно интересная и совершенно необходимая обществу. Между прочим, говорить, как это делается сплошь и рядом, о «плохой экологии» ничуть не более разумно, чем о «плохой физике», «плохой математике» и т. д. И эта наука не имеет ничего общего с шумной и агрессивной деятельностью упертых и технически безграмотных противников атомной энергетике — часто к тому же откровенно работающих на заказ.

К сожалению, приходится констатировать, что так обстоит дело далеко не только в среде рядовых обывателей. Вот высказывание видного германского политика федерального уровня конца нулевых годов нашего столетия. Рассматривая различные энерготехнологии по выбросам в атмосферу парниковых газов (об этом мы говорили в главе 1), он заявил: «Атомная энергетика не производит парниковых газов (что совершенно правильно, мы об этом уже

знаем. — А. К.), но она опасна сама по себе (! — А. К.)». Когда слышишь такое, поневоле вспоминается дискуссия между гарпунщиком Недом Лендом и Конселем, слугой профессора Аронакса, из романа Жюль Верна «20 000 лье под водой». На вопрос Конселя Ленду, откуда он взял, что киты живут по тысяче лет, тот спокойно ответил: потому что это известно всем. Принципиальной разницы в уровне аргументации германского политика и гарпунщика Ленда я в данном случае не усматриваю. Опасно — и всё, и все это знают, и обсуждать тут нечего. Всё, приехали.

Отсюда и моя просьба к читателям. Друзья мои, перед тем как формулировать свое мнение, просто для себя любимого, или перед походом на очередную тусовку под лозунгом «мы против», включите мозги! Даже, в общем-то, неважно, по поводу строительства АЭС или чего-то еще. Ведь мы в XXI веке живем, а в наше время отношение к чему бы то ни было (а тем более повод к действиям) предполагает разумную внутреннюю аргументацию, включая и обретение доверия к профессионалам. А если ее пока нет, подумайте, что лучше. Либо ее приобрести (пусть и не сразу), либо в ее отсутствие поддаться инстинкту стада и исполнять роль покорного болванчика в играх ваших вожаков и активистов. Для вас это чужие игры, в которых вы, ваши судьбы и ваш задор — лишь дешевая разменная монета!

Но вернемся к вопросу о неадекватности восприятия общественным мнением атомной техники и энергетике. Случайно ли, что именно их постигла столь злая судьба?

Конечно же, нет. В таких вопросах случайностей не бывает, и сходство идеологических платформ антиатомных кампаний в различных странах мира только подчеркивает это. Но при их обсуждении мало лишь отмечать ущербность аргументации оппонента (или вовсе отсутствие таковой). Надо иметь встречную аргументацию. Поэтому предпосылки как минимум осторожного отношения к атомной энергетике значительной части общества и, как следствие, нарушения принципа доверия к специалистам должны не только молча отмечаться, но и анализироваться.

И вот первая предпосылка. Вся история мировой науки и техники однозначно свидетельствует: степень общественной приемлемости любой технологии будет очень долго и сильно зависеть

от того, как они в первый раз показали миру свое лицо. А для ядерных технологий эта премьера обернулась кошмаром Хиросимы и Нагасаки. Такие трагедии обеспечивают обществу почти что генетическую память.

Вот и атомная энергетика оказывается в представлении очень многих людей обогрившей заревом ядерного оружия, обеспечившего человечеству в первый раз за всю его историю возможность самоуничтожения. В данном случае совершенно неважно, что современная атомная энергетика как таковая к ядерному оружию отношения не имеет никакого — ни организационного, ни технологического. Как известно, серы боятся не потому, что она опасна сама по себе, а потому что ею черт пахнет...

Разумеется, фундаментальный физический принцип действия атомной бомбы и ядерного реактора один и тот же — цепная реакция деления тяжелых ядер (что это такое, мы знаем из главы 2). Однако базовой физической общности совершенно недостаточно для заключений об общности основных закономерностей анализируемых процессов.

Например, в космической ракете и турбореактивном самолете используется один и тот же базовый принцип движения — реактивный. Но из этого вовсе не следует, что на турбореактивном самолете, как и с помощью ракеты, можно достигнуть Луны. Помимо совершенно различных масштабов энерговооруженности этих машин, есть и принципиальное препятствие: в двигателях самолета в качестве рабочего тела и окислителя используется воздух, в космическом пространстве отсутствующий. Точно так же обстоит дело с атомной бомбой и ядерным реактором. При использовании одного и того же базового физического способа получения энергии существуют принципиальные различия в технической реализации этого способа и, как следствие, в закономерностях его протекания.

Ну давайте по аналогии бороться еще и с уютным потрескиванием печки на даче! Ведь там горят дрова с протеканием химической реакции экзотермического окисления углерода — точно такой же, как при опустошительных лесных пожарах!

Но есть важное замечание. Именно, повторяюсь, масштабное развитие атомной энергетики в мире в наши дни совершенно исключает

с использованием скоординированных технологических, политических и иных мер любую возможность его переключения на создание ядерного оружия — прошу здесь поверить мне на слово.

Так вот, такое положение дел должно обязательно сохраняться и впредь. Гарантия нераспространения ядерного оружия — это непреложная аксиома существования современной цивилизации. Применительно же к обсуждаемому нами вопросу (формирование доверия широких масс населения к атомной энергетике) надежное обеспечение нераспространения уничтожает одно из наиболее значимых общественных заблуждений — глубоко ошибочную уверенность в неразрывной связи мирного атома с атомом военным. И дело здесь, конечно, не в экстремальной опасности в этом смысле именно атомной энергетике. В конце концов, топка упомянутой печки вовсе не освобождает дачника от необходимости выполнять требования по соблюдению противопожарной безопасности.

А вот и вторая предпосылка, также отнюдь не добавляющая популярности атомной энергетике. Именно она в общественно значимых вопросах до недавних пор была окутана столь же непроницаемой завесой секретности, как и военно-ядерный комплекс. При этом секретилось все подряд — что нужно и, к сожалению, что не нужно.

С точки зрения современного открытого информационного общества в этом уже хорошего мало. Однако ситуация многократно усугублялась тем, что эта завеса тайны в течение многих лет прорывалась лишь в тех случаях, когда ядерные технологии (и не только в атомной энергетике) являли миру негативные последствия неумелого обращения с ними из-за человеческого незнания, а гораздо чаще — безграмотности и халатности.

В условиях тотальной секретности эти аварии возникали вдруг, как бы из ничего, и потому воспринимались обществом особенно остро и тяжело. И для обретения атомной энергетикой общественного доверия имели в высшей степени негативное последствие — даже безотносительно к особенностям конкретной аварии. Ведь удар наносился по очень уязвимому месту человеческой психологии. Люди начинали думать: на сей раз попытались утаить угрожающую нам опасность — попытаются и в дру-

гой раз. Я вспоминаю чернобыльские события: дорого, ох как дорого обошлось тогда российским атомщикам нарушение единственно возможного в такой ситуации принципа диалога с обществом: «Не молчи, говори правду». К счастью, этот горький урок был со временем в нашей стране усвоен.

И наконец, третья (возможно, и самая значимая) предпосылка, кардинально ухудшающая «общественное лицо» ядерных технологий даже и сейчас. Это атомная радиация, ионизирующие излучения, наличие которых нередко приходится учитывать в ходе их промышленной реализации.

Мы подробно говорили о радиации в главе 3. Но причина массового патологического страха перед ней (на грани радиофобии, а иногда уже и за этой гранью) вовсе не в ее наличии как таковой. Она в синергическом влиянии двух факторов. Напоминаю, что синергией называется многофакторное воздействие, при котором одновременное влияние всех факторов превышает сумму их влияния по отдельности.

Вот эти факторы. Первый (биологический): хорошо известно, что воздействие на организм человека интенсивных потоков ионизирующих излучений действительно может стать угрозой для его жизни и здоровья, а у человека нет органов чувств, позволяющих обнаружить такие потоки («радиация не имеет ни вкуса, ни цвета, ни запаха...»). Второй (информационный): в условиях тотальной секретности на все атомное человек начинает думать, что воздействию этих проклятых облучений он подвергается уже давно, но ему об этом никто не говорит.

А вот теперь констатируем печальный итог: совместное воздействие всех этих предпосылок и привело к неприятному для атомной энергетики результату – к тому, что общество неадекватно оценивает относительную опасность ядерных технологий в сравнении с иными технологиями.

Что здесь имеется в виду?

Следует четко понимать, что абсолютно безопасных технологий не существует вообще. Предъявление такого требования любой технологии, ядерной в том числе (что, кстати, всегда с головой выдаст дилетанта), вполне равнозначно требованию полного отказа от нее. Абсолютно безопасна единственная технология – несущая



А говорили совершенно безопасная технология...

существующая. Даже технология каменного топора, куда нас столь настойчиво зовут наиболее продвинутые экоактивисты, и та в этом смысле довольно опасна. Ведь, порвав жилу мамонта и сорвавшись с ручки, топор может покалечить, а то и убить кого-нибудь из числа соплеменников.



Увы, современные технологии намного опаснее. Одна лишь катастрофа на химическом заводе в Бхопале (Индия, 1984) за считанные минуты унесла более 3000 человеческих жизней. Взрыв угольной пыли в шахте близ города Хункэйке (Япония, 1943) – 1550 погибших. Взрыв газопровода в Башкирии (СССР, 1989) – погибло 800 человек. Только лишь в России в прошлом году в ДТП распрощались с жизнью свыше 15 000 человек, а в мире, по данным Всемирной организации здравоохранения, погибает до 1,2 миллиона. А вполне устоявшаяся цена в мировой угольной отрасли – семь погибших шахтеров на каждый миллион тонн добытого угля?

Этот скорбный список можно продолжить и далее, но не в этом суть. Автор отнюдь не призывает закрыть химические заводы и угольные шахты, а автомобили утопить в море (тем более что он сам автолюбитель). Смысл сказанного совсем в другом – это неминуемая на некотором этапе истории общества плата за развитие тех или иных технологий.

Но вот что важно. Конечно, упомянутым авариям и катастрофам общество отнюдь не радуется, но оценивает их последствия и общую степень потенциальной угрозы от рассматриваемых технологий в общем адекватно – не преуменьшая их, но и не преувеличивая сверх некоторых разумных рамок. И уж конечно, ставить вопрос об ограничении развития технологий (тем более об их запрете) лишь на основе уже известных нам субъективных мнений типа «она опасна сама по себе, и всё тут» никому в голову всерьез не приходит.

А что с атомной энергетикой?

Чернобыльская «сверхавария» еще и потому стоит особняком в истории атомной энергетике, что не обошлась без жертв. Три человека погибли в момент взрыва реактора, еще 28 – в течение трех недель после аварии от несовместимых с жизнью доз облучения в сочетании с лучевыми ожогами. В дальнейшем возможной с различной степенью вероятности причиной преждевременной смерти от отдаленных последствий облучения стали, по разным оценкам, еще около ста человек. Что же до «десятков и сотен тысяч погибших от лучевой болезни вследствие Чернобыля», то налицо не подтверждаемая никакими объективными данными чепуха, если не злонамеренная ложь.

Между прочим, о десятках и сотнях тысяч погибших от лучевой болезни после чернобыльской аварии мне приходилось на встречах с молодежью слышать не раз. И на мой вопрос, откуда они это взяли, ответы до уныния однообразны: так написано в интернете, так написано в блоге... На мою реплику: «А написанному на заборах и на стенках подъездов вы тоже всегда и безоговорочно верите?» – собеседники отвечали довольно уклончиво... Право, уж и не знаю даже, какую прививку надо сделать молодежи от дурацкого бездумного легковерия!

Но вернемся к серьезным вещам. Другие аварии на АЭС и вовсе обошлись без человеческих жертв – в том числе и на «Фукусиме-1». Но вот теперь самое время спросить у антиатомных алармистов: коллеги, какие у вас возникают идеи при сравнении цифр технологических потерь человечества? Не настало ли время прекратить диалог с атомщиками по принципу «сам дурак»? И не пора ли признать за атомной энергетикой в ее общественном восприятии равноправия с иными современными технологиями? Не больше, но и не меньше! И воспрепятствовать надуванию в ее лице страшной опасности из ничего, коли уж не получается сотворить ее из фактов.



А людям надо, наконец, понять: при отсутствии доказательств (а где они в нашем случае?) априорная вера в несуществующую опасность называется просто и емко — предрассудок. Психологам же хорошо известно: предрассудок сам по себе иррационален, но в его основе обычно лежит рациональная подоплека, дополненная порочной логикой (и за счет этого искаженная). Осознав эту порочность, человек обычно избавляется и от самого предрассудка — о чем я и мечтаю.

Но и сотрудникам ядерной отрасли, и тем, кто воспитывает «ядерную смену», нельзя забывать важнейший урок чернобыльской аварии. Именно: доверие людей к атомной энергетике можно сразу потерять, как оно тогда и произошло, но вот столь же быстро восстановить его нельзя. Вспомним: в течение двадцати с лишним лет после Чернобыля атомная энергетика во всем мире буквально боролась за выживание — какое уж там развитие...

Эти горькие годы показали с полной однозначностью: второй подобной аварии атомной энергетике уже не выдержать, люди безвозвратно отвернутся от нее, невзирая ни на какие глобальные энергетические угрозы. Столь же очевиден и вывод: безопасность ее должна быть технически и организационно обеспечена с запасом — объективно, может быть, даже несколько излишним. Как это в наши дни и происходит. По-другому сейчас не получается, по крайней мере, до тех пор, пока общество не приобретет запас уверенности, что ядерные технологии не являются источником аномально высоких угроз.

А отсюда непреложное, категорическое требование: обеспечение безопасности любой технологии, и атомной энергетике в том числе, означает (об этом уже говорилось, но готов повторять вновь и вновь), что на ее объектах и установках, созданных профессионалами-учеными и профессионалами-конструкторами, должны работать профессионалы-эксплуатационщики по правилам и нормам, разработанным и контролируемым профессионалами-управленцами. Выпадение из этой системы хотя бы одного звена — прямая и серьезная угроза безопасности, и вся статистика ядерных и радиационных аварий свидетельствует об этом с полной очевидностью.

Так вот, если атомная энергетика претендует на роль лидирующей мировой энерготехнологии, а в России и на роль национального технологического лидера (на что у нее есть все основания), подготовленных, высококвалифицированных профессионалов-ядерщиков во всех трех упомянутых категориях должно быть много — кого угодно к созданию реактора и к его пульта допустить просто нельзя. Ведь последствия крупной ядерной аварии интернациональны. Действует принцип: катастрофа на одной АЭС есть катастрофа для всех АЭС. Больше катастроф быть не должно.

Вот об этом фундаментальном, неукоснительно соблюдаемом принципе деятельности атомной отрасли — безопасности прежде всего — общественность должна знать с полной определенностью. И не обращать здесь внимания ни на какие информационные спекуляции.

Но формирование когорты профессионалов отрасли — лишь одна задача ядерного образования. Есть и другие, по своей значимости ничуть не меньшие и требующие для своего развития не меньше усилий.

Во-первых, начальная профессиональная ориентация. Хорошо известно: чем более активно и умело отрасль ведет агитационную и просветительскую работу среди молодежи, в школах, колледжах и университетах, тем меньше у нее проблем с формированием кадрового резерва. Потому что назначение любого образования — заинтересовать и научить. А в этом случае на профессионала учатся уже заинтересованные люди, естественно, с куда как лучшими результатами. И что очень важно, даже если усвоившая ядерные азы молодежь и изберет для себя по жизни иную, неатомную, профессию, значимость ядерных технологий для настоящего и будущего страны и мира она усвоит и ряды противников атомной энергетике вряд ли пополнит.

Это, условно говоря, направление работы вглубь. Но, во-вторых, не менее важна работа вширь — распространение начальных ядерных знаний среди населения в целом. Именно ей принадлежит главная роль в формировании разумных, адекватных представлений об атомной энергетике среди людей, для которых, собственно говоря, она и существует. Главное в такой работе — дать

людям основы, азы, чтобы обеспечить столь нужный сейчас оптимум в отношении общества к профессионалам (об этом мы уже говорили). Чтобы человек, разбираясь в главном, в существе дела, доверял профессионалам в анализе и реализации его конкретных аспектов. Потому что, если мы действительно хотим сохранить существующий уровень доверия к атомной энергетике, а в дальнейшем и повысить его, надо помнить: люди, которых не знакомят с правдой грамотно и аргументированно, неминуемо скатываются в пучину невежества и мракобесия, часто на изумление быстро и глубоко. И ядерные технологии не исключение.

Надо представить людям ядерную и радиационную физику, радиобиологию и радиэкологию такими, как они есть, — в основе своей понятными большинству и описываемыми вполне предсказуемые явления. И стремиться не заменить массовый панический страх перед ними столь же массовой дурацкой бравадой, легкомыслием и шапкозакидательством — хватит с нас одного Чернобыля, — а добиться золотой середины, называемой адекватностью. Которая в самом кратком изложении такова: атомная энергия и радиационные технологии в добрых, сильных и умелых руках до невиданных еще пределов увеличивают созидательные возможности человечества, но способны принести неисчислимые беды, оказавшись в руках неуча, растяпы или злодея.

И это еще не все. Надо учитывать, что обязать людей учиться этим вещам нельзя — следовательно, их надо еще и заинтересовать. А для этого такую учебу надо сделать по-человечески интересной, не поступаясь при этом, однако, научной и технической достоверностью.

Вот такими соображениями я и руководствовался, когда писал эту книгу. Я искренне желаю, чтобы некоторые (желательно многие) из вас, дорогие читатели, выбрали себе карьеру атомщика, поступив в одно из учебных заведений, входящих в ассоциацию «Консорциум опорных вузов госкорпорации «Росатом»». В первую очередь это Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ — наша главная кузница ядерных кадров.

Атомная отрасль России, в этом году отмечающая три четверти века своей деятельности, сейчас является одним из основных техно-

логических локомотивов развития страны. Она сочетает в себе наиболее передовые достижения науки и инженерии, во многом превосходящие иностранные аналоги, с огромным инновационным потенциалом. Предприятиям атомной промышленности, ее исследовательским институтам, атомным электростанциям, судам атомного флота, ядерной медицине, нашим зарубежным ядерным проектам очень нужны молодые, высокообразованные, культурные специалисты, которыми вы сможете стать по окончании этих отраслевых учебных заведений.

Но даже если вы выберете себе по жизни и иной путь, я желаю вам вырасти умными, образованными и честными людьми, достойными гражданами нашей Родины.



УДК 539.1
ББК 22.383
К60

Издание осуществлено при поддержке
Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»

Колдобский А. Б.

К60 Атомная энергия : Первое знакомство. — М. : Кучково поле Музеон, 2020. —
128 с. : ил.

ISBN 9 78-5-907174-38-2

Оригинал-макет подготовлен



Дизайн, иллюстрации: *Марина Миллер*
Корректор: *Лилия Катренко*
Верстка, допечатная подготовка: *Марина Рогова*
Цветокоррекция: *Сергей Панфилов*
Координатор проекта: *Анастасия Евдокимова*

Подписано в печать 08.09.2020
Формат 170 × 220 мм
Тираж 2000 экз.
Заказ № JT-20-1113

© Колдобский А. Б., текст, 2020
© ООО «Кучково поле Музеон»,
оригинал-макет, издание, 2020
© Автономная некоммерческая организация
«Информационный центр атомной отрасли»,
все права, 2020

Отпечатано в типографии
■ Типография Ситипринт • www.cityprint.ru