

**АТОМНАЯ
ЭНЕРГИЯ —
ПЕРВОЕ
ЗНАКОМСТВО
И ШТРИХИ
К ПОРТРЕТУ**

Александр Колдобский

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ



ПЕРВОЕ ЗНАКОМСТВО И ШТРИХИ К ПОРТРЕТУ

2-е издание, расширенное



Москва 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | | | |
|--|-----------|--|------------|
| Предисловие ко второму, расширенному изданию | 7 | Кандидаты на ядерное топливо — где их искать? | 67 |
| Введение. Обращение к читателям | 10 | Барьер деления, или Приключения саночника | 70 |
| 1. Немного об энергии и энерготехнологиях | 15 | Уран, торий и их свойства. Ядерные материалы | 73 |
| От костра до ресурса прямого жизнеобеспечения | 17 | Осколки деления и их свойства | 78 |
| О формах энергии и единицах её измерения | 21 | Ядерный реактор и атомная электростанция | 82 |
| Энерготехнологии — прогулка на машине времени | 26 | Ядерный энергоблок: что там внутри? | 87 |
| Краткий «толковый словарь» энерготехнологий | 30 | А ведь были и природные ядерные реакторы... .. | 92 |
| Критерии энерготехнологий | 38 | Атомная энергетика России: сегодня и завтра | 96 |
| В мире: как обстоят дела и надолго ли хватит? | 45 | 3. Ионизирующие излучения и радиационная безопасность | 103 |
| Немного об экологических проблемах современной энергетики | 48 | Радиация как атрибут дьявола | 105 |
| Что лучше? И куда дальше? | 55 | Основные понятия и определения | 107 |
| 2. Знакомимся с атомной энергетикой — её физика и техника | 57 | Радионуклиды и их основные характеристики | 111 |
| Атом и атомное ядро — основные понятия и характеристики | 59 | Природные радионуклиды | 114 |
| | | Доза — основная характеристика радиационного воздействия | 116 |
| | | Радиация в окружающем мире: откуда что берётся? | 121 |
| | | Радон и вокруг него | 125 |
| | | Радиационное «ассорти» с йодом на закуску | 130 |

| | |
|---|------------|
| 4. ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ. ОБЩЕСТВО И АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА — СРЕЗ НЕПРОСТЫХ ОТНОШЕНИЙ | 139 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 159 |

Предисловие ко второму, расширенному изданию

Дорогие друзья!

Для каждого автора выход в свет второго издания его книги — праздник. Это — свидетельство того, что идеи и подходы автора, которыми он руководствовался при её написании, «сработали». Книга нашла своих читателей и ожидаемо оказалась востребованной там, для чего и задумывалась, — в деятельности Информационных центров по атомной энергии, для работы со школьниками и лицеистами, а также их преподавателями (в том числе по программе «Атомный практикум»), при проведении популяризаторской работы со студентами младших курсов НИЯУ МИФИ.

Со временем, однако, выяснилось, что она стала использоваться студентами и в учёбе. Конечно, не в качестве учебника — она не может его заменить, на это она и не рассчитана. Но иногда полезно, ещё до освоения на должном уровне серьёзного учебного курса профессиональной подготовки, познакомиться с его некоторыми основными положениями в режиме доверительной беседы, заочного диалога — с автором в данном случае. Возникает некоторая аналогия с «курсом молодого бойца», а его в армии не зря придумали. В этом смысле автор, на встречах и при личном общении с читателями первого издания книги (и при подготовке второго), не раз вспоминал мудрые слова одного из своих учителей, автора прекрасных учебников и научно-популярных книг по ядерной физике, профессора МИФИ К. Н. Мухина: «Прежде чем сказать строго, скажи понятно».

Возникает и новая ответственность. Главное было в том, что во многих случаях читателям первого издания книги, при сохранении её общей структуры и основного содер-

жания, было недостаточно только лишь утверждений. Была нужна также и разъясняющая аргументация, а часто и дополнительные сведения.

Вот несколько примеров. При знакомстве с атомной энергетикой у читателей первого издания часто возникал вопрос: а что она из себя фактически представляет, хотя бы только в России, каковы её текущие и перспективные планы? Вопрос вполне резонный, и глава 2-я книги была значительно расширена за счёт ответа на него.

Или ещё: при обсуждении на встречах со слушателями и читателями повышенный интерес всегда вызывал вопрос о связи экологических аспектов различных энерготехнологий с проблемами состояния внешней среды. Ничего удивительного в этом нет: сейчас этот вопрос «на слуху», проигнорировать его было бы неправильно — тем более что атомная энергетика имеет к нему самое непосредственное отношение. Но даже поверхностное его рассмотрение требует нескольких подобных книг, поэтому автору пришлось здесь ограничиться (в главе 1) лишь кратким «эколого-энергетическим комментарием» по этому вопросу, имеющим во многом мировоззренческий характер. Что, кстати говоря, при общении с молодёжью вообще имеет важнейшее значение.

Конечно, и других вопросов и пожеланий (что для автора, по существу, одно и то же) по первому изданию книги было немало. Автор попытался во втором издании ответить на них в той мере, насколько сделать это ему позволяли две вещи: ограниченность объёма книги и бессмертный принцип К. Пруткова о невозможности объять необъятное. Но в любом случае фактически получилась уже новая книга — у неё и название другое. А цель её — та же, к которой автор стремился ещё в первом издании: заинтересовать и научить.

Ну и, конечно, пришлось несколько раз перечитать книгу первого издания, чтобы устранить ошибки, неточности и стилистические шероховатости. И особое внимание

при этом было уделено актуализации фактических данных. Автор исходил из того, что использовать в книге такого жанра информацию «не первой свежести» недопустимо.

Наконец, автор исправляет оплошность, допущенную им в первом издании, и в конце книги с удовольствием представляет читателям список дополнительной литературы по её тематике. Для удобства читателей он был разделён на две части. В первую вошли издания ознакомительного уровня, и главным критерием их выбора являлась доступность изложения — конечно, не в ущерб достоверности. А во вторую — гораздо более серьёзная литература, где вопросы современной энергетики (атомной в том числе) уже представлены на должном уровне научной строгости. Этими книгами автор и сам неоднократно пользовался в своей работе.

Введение. Обращение к читателям

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 бы практика прямого диалогового общения по её проблематике с вами же — школьной и студенческой молодёжью.

Такую практику мне и посчастливилось получить на лекциях, встречах и беседах в Информационных центрах по атомной энергии (АНО «ИЦАО»), при выполнении программ дополнительного образования в школах и лицеях и в ходе встреч со школьниками разных возрастов на наших «Университетских субботах» в НИЯУ МИФИ.

На этих встречах и беседах меня всегда радовали вопросы моих юных собеседников. Чувствовались и живой интерес к «атомной проблематике», и неподдельное желание сформировать собственное отношение к ней. И было в особенности приятно, когда встреча переходила в режим свободной дискуссии. Ведь так не только составлялся «перечень» наиболее интересных для молодёжи вопросов (по принципу их повторяемости на различных встречах). 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 лежат корни опасений и страхов, которые до сих пор мешают объективности восприятия обществом ядерных технологий.

Вот на эти вопросы я и попытался ответить в книге, лежащей перед вами.

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. И, наконец, о том, почему мировые закономерности её развития вызвали к жизни энергетику атомную.

Но атомная энергетика, которая подробно рассматривается в главе 2, — энергетика всё же особая. И не только потому, что ей и посвящена наша книга. У неё всё своё — 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 улучшить своё понимание атомной энергетики с уровня «прогулки по выставке», которая отвечает на вопрос «как это выглядит», до ответа на совсем другой вопрос — «что там внутри, почему и как это всё работает».

Понятно, что в главе 2 этому было 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 ещё одна тема — что и сделано в главе 3. Её постановка в ва-

ших вопросах и обсуждение в этой книге связаны с тем общеизвестным фактом, что использование атомной энергии во многих случаях связано с возникновением значительных количеств 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 чём 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 неё вносят естественные и техногенные факторы — в частности, возможное проживание вблизи АЭС? Может ли нести такое проживание дополнительные риски для здоровья людей и насколько можно доверять мнениям и слухам, что это именно так, а не иначе?

И далее, в главе 4 настоящей книги, 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 в должной мере такого доверия у широких масс людей пока ещё нет. Оттого и ваши вопросы, отражающие степень этого доверия, иногда носили тревожный оттенок, а ведь они во многом есть следствие того, о чём 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 всё равно придётся. Хотим мы этого или нет, но мы поступаем 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 лужёной 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 счёл 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 её читателей. Поэтому я при её написании просто руководствовался бессмертным советом великого Эйнштейна: «Любой вопрос должен быть изложен так просто, как только можно, но не проще».

Во-вторых, прошу понять, что эта книга — не «ядерная энциклопедия». С моей стороны было бы сверхнаивно пытаться «утрамбовать» в издании такого объёма 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 облучённым 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 собственного издания подобного рода, и я прошу как моих коллег в атомной отрасли, так и вас, дорогие читатели, отнестись к этому с пониманием. Как и к тому, что мне в ходе работы над книгой всё время приходилось удерживаться на тонкой грани между ис-

черпывающей 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, прошу понять, что 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 удача. Но если прочитавший её будет считать для себя профессиональную работу в этой области своим жизненным путём, то мне больше нечего и желать.

Немного об энергии и энерго- технологиях



Рисунок 1.1. Первая «энерготехнология»

Таким он для этого мира и остался. Дикие животные могут совершать некоторые примитивные целенаправленные действия (например, для добычи пищи), иногда даже проявлять какие-то задатки интеллекта — но при этом они всегда панически боятся огня, независимо от обстоятельств. Человек же, может быть, потому и стал человеком, что, преодолев страх перед «диким» огнём (лесным пожаром, извержением вулкана), сначала научился этот огонь сохранять, а потом и получать самому. 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 своих 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 с расширением сферы использования «управляемого огня». На земле наступала эпоха энерготехнологий.

Энерготехнологии в своей основе — это звено для передачи энергии от некоторого её 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, самолёта, автомобиля, Интернета и пр., 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 самолёт, ни Интернет и пр. Ведь становятся элементарно невозможными ни современное земледелие (значит, еда), ни современное водоснабжение (значит, и вода). Невозможны химия и металлургия (значит, прощай решительно всё 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 лишённое энерготехнологий человечество (точнее, немногочисленные его

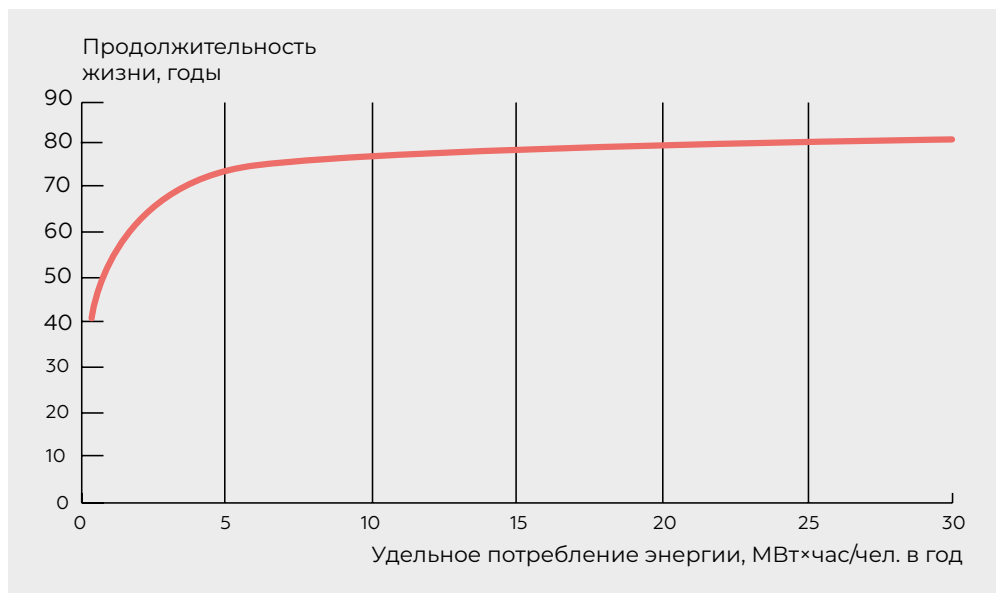


Рисунок 1.2. Зависимость длительности жизни от уровня энергопотребления

остатки), отброшенное, как 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 пересчёте 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 логарифмический характер — при удельном энергопотреблении свыше 5–6 МВт × час/чел. в год она «выходит на плато», т. е. продолжительность жизни начинает определяться естественным старением и другими факторами (структурой и уровнем социального совершенства общества, качеством окружающей среды, наличием либо отсутствием вредных привычек и др.). Дальнейшее увеличение удельного энергопотребления сверх некоторого «критического уровня» в этом контексте 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. Здесь лишь отметим, что надо очень внимательно отслеживать процесс замещения выбывающих энергетических мощностей, ни в коем случае 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, кроме несварения желудка, — со всеми вытекающими (во всех смыслах) последствиями. Впрочем, и об этом далее.

О формах энергии и единицах её 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 расчётным путём) 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 пресловутой Вавилонской башни.

Самое время сказать, что уровень метрологии, достигнутой людьми с течением многих веков, часто отличался

большим разнообразием и затейливостью — и не только в том, что касается энергии. Когда на заре земледелия человек использовал мускульную силу (свою и животных) для обработки земли, то и мера затрачиваемой энергии определялась соответствующе — работа двух быков, трёх рабов и т. д. Конечно, возникали проблемы при использовании других животных — ну как, например, было поступать со слонами при переноске брёвен? При стандартизации других физических величин дело обстояло, в общем, похоже. 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 использовании в качестве меры длины — фута (длины ступни), мощности — лошадиной силы, есть и другие примеры. Но ступни у людей бывают разные, среди лошадей встречаются и беговые рысаки, и тяговые битюги. Поэтому всё же нужно было выбрать универсальную, понятную для всех единицу энергии, которая характеризовала бы все возможные виды её получения и потребления.



Такой единицей во всём мире стал джоуль (Дж), названный так 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 ещё одна величина, в которой измеряется энергия, полученная или потреблённая в единицу времени, — мощность. Её системной единицей является ватт (Вт), названный так в честь изобретателя-механика, создателя универсальной паровой машины Джеймса Уатта (Ватта). $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$.

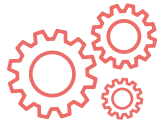
Часто используются также кратные и дробные величины энергии и мощности — например: кДж (1000 Дж), МВт (1000 000 Вт) и др. Вот откуда наши мегаватты.

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

В науке столетиями господствовало представление о теплоте как особом веществе, содержащемся в теле. Даже и название такому веществу когда-то придумали — «теплород», и меру количества — калория (кал). Но о том, что теплота и работа как-то связаны, интуитивно догадывались ещё наши пращуры, добывавшие огонь трением (**рис. 1.1**). Как именно связаны?

Ответ на этот вопрос даёт принцип эквивалентности 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 своё «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 её форм.



Здесь, кстати, самое время сказать, что безальтернативность джоуля как единицы энергии вовсе не тождественна запрету на использование других её единиц. Их выбор — это вопрос целесообразности и удобства применительно к решаемой задаче, и 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 придётся столкнуться 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 звёзд 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 ещё что. Это — именно физические единицы, они имеют собственное смысловое наполнение. Световой год есть расстояние, проходимое светом в вакууме за год, парсек — расстояние до условного астрономического объекта, имеющего орбитальный параллакс в одну уг-

ловую секунду. Их не надо путать с кратными и дробными величинами.

Такова и новая для нас «атомно-ядерная» единица энергии — электронвольт (эВ). 1 эВ — это энергия, необходимая для переноса одного элементарного заряда в электростатическом поле между точками с разностью потенциалов в один вольт. 1 эВ соответствует $1,6 \times 10^{-19}$ Дж. По «обычным 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 (1000 000 эВ), иногда и другие.

А теперь вернёмся к разговору о формах энергии. Вспомним определение джоуля как её 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 отсчёта 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 $E = m \times c^2$ начинает играть роль универсального, не зависящего ни от чего, коэффициента пересчёта!

Принцип эквивалентности массы и энергии стал подлинной революцией в естествознании, без него современная физика просто немыслима. В частности и в особенности ядерная физика — следовательно, и ядерная энергетика. Этот принцип, как мы увидим, и лёг в основу её «универсального языка» как отрасли науки и инженерии.

Энерготехнологии — прогулка на машине времени

Но вернёмся к истории освоения человечеством энерготехнологий.

К сказанному они имеют прямое отношение. Здесь и энергия огня, и использование мускульных сил напрямую вписываются в только что сформулированные рассуждения. Огонь (костёр) — это высвобождение энергии, накопленной Солнцем, реализуемое через химическое взаимодействие 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 обусловленных их генетикой биохимических реакций. Не являются исключением и другие энерготехнологии. Энергия ветра, тепла земли, приливов — всё это результаты взаимодействий в общей природной системе, охватывающей не только Землю, но и космос.

В энергетике традиционно применяются два ключевых понятия: производство энергии и потребление энергии. Под производством понимается использование первичных источников энергии для получения необходимых потребителю её форм: механической энергии, электроэнергии, холода или тепла того или иного температурного потенциала, горячей воды и пара. Сюда же входит получение промежуточных энергоносителей (о них далее) — моторных видов топлива, водорода 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 виртуально провели «сверхучёт» производства и потребления энергии, то не обнаружили бы ни малейших отклонений от этого закона.

Долгое время список используемых человечеством энерготехнологий был очень ограниченным. Наряду с ко-

стром (во всех его модификациях) это были энергия ветра (как мы помним, с ветряными мельницами воевал ещё Дон Кихот, а они существовали и раньше, как и парусный флот) и примитивных устройств, использующих энергию падающей воды, — тех же водяных мельниц (вроде той, на которой прятались от шайки де Брильи отважные гардемаринны), водяных подъёмников и ещё кое-чего. В энергетическом арсенале человечества ничего другого, по большому счёту, и не имелось. Так было, невзирая на то, что в некоторых случаях эффективнейшее энергетическое сырьё в ряде случаев буквально падало в руки. Например, до середины XIX века нефть — кровь современных энерготехнологий — использовалось в основном как... экзотическое лекарство и смазка для колёс телег, влекаемых теми же быками (рабы, к счастью, тогда в основном уже ушли в прошлое).

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

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

Запасы угля на нашей планете значительно превосходят таковые для всех других органических ископаемых видов топлива, вместе взятых. Хотя бы уже поэтому «эпоха угля» в значительной мере продолжается и в наши дни. Например, во многих странах (и далеко не самых отсталых) уголь обеспечивает более половины наработки электричества, а в целом в мире — около 37%.

Но тут самое время вспомнить то, о чём мы уже говорили. Экологический баланс экосферы уже сейчас заметно нарушен из-за негативных побочных эффектов, обусловленных сжиганием угля. Здесь и выбросы парниковых веществ, в первую очередь углекислого газа, CO_2 (об этом подробнее далее), и масштабное загрязнение земных экосистем токсичными продуктами горения, и частая неопределённость ситуации со шлаковыми отходами и т. д. Всё это с очевидностью накладывает ограничения на дальнейшие энергетические перспективы угля. Тем более что на первое место в списке важнейших ископаемых энергоисточников начиная с конца XIX века стала выдвигаться «горючая кровь земли» — нефть.

Нефть — это энергетическое обеспечение (в основном через производные перегонки) всей современной индустрии, сердцем которой ещё и поныне является двигатель внутреннего возгорания и паровая турбина. С начала XX века нефть стали лихорадочно искать по всему миру, а географическая неравномерность её запасов и значительно различающиеся по сложности освоения месторождения уже стали (не исключено, что станут и ещё) причиной многочисленных политических, иногда и военных конфликтов. 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 и электроэнергии) гораздо удобнее другое горючее органическое ископаемое — газ. С точки зрения геологии газ (в основном это метан, CH_4) является «прямым родственником» нефти, он часто залегает и добывается вместе с ней (попутный газ).

В наши дни нефть и газ суммарно удовлетворяют почти 60% мировых энергетических потребностей. Однако, заводя в очередной раз бензиновый или дизельный двигатель своего автомобиля и ставя на газовую плиту чайник, можно было бы и задуматься — а надолго ли всего этого хватит и как

долго, объективно говоря, это можно использовать? К этому вопросу мы ещё вернёмся.

Конечно, есть и другие виды ископаемых видов 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? Однако их роль в современном глобальном энергообеспечении весьма незначительна.

Вступив в эру техногенной цивилизации, человечество фактически целиком построило её энергообеспечение на использовании ископаемого горючего топлива. Сегодня каждый человек на Земле в среднем потребляет в год энергию, которая заключена примерно в 2 тоннах нефти. Если сравнить эту цифру с запасами ископаемых видов топлива на Земле, то, с учётом прогнозов по общему развитию технологий, можно приблизительно оценить время, на которое его хватит человечеству.

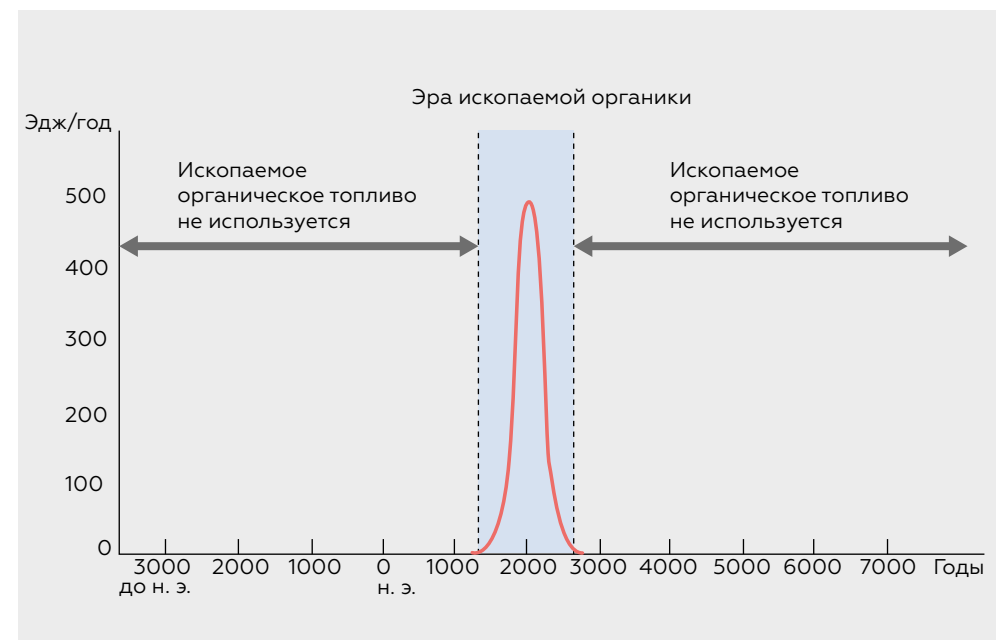


Рисунок 1.3. Органическое топливо в настоящем и будущем

Например, общепланетные запасы нефти оцениваются величиной 400–500 миллиардов тонн. Это означает, что если нынешняя структура энергопотребления на обозримое время приблизительно сохранится, то нефти хватит только на несколько десятилетий.

Вот и попытаемся в дальней исторической ретроспективе и перспективе оценить роль ископаемых (литосферных) горючих видов топлива, основы так называемой «огневой энергетики» (рис. 1.3). Мы получим весьма впечатляющую картину: за период, охватывающий пять тысяч исторически датированных лет истории человечества и «вне ограниченное сверху» будущее, «эра ископаемой органики» представляет собой узкий пик, составляющий около 500 лет. А 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 грустного факта весьма неожиданным.

И на это накладываются обсуждаемые ниже экологические ограничения, связанные с деградацией среды обитания вследствие массового использования накопленной энергии ископаемых видов топлива — 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 мы сойдёмся в определениях, мы избежим половины разногласий».

Сразу оговоримся, что полной, строгой однозначности в такой системе к настоящему времени нет — как нет и полностью 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 введём понятия первичных энергоисточников (источников энергии) и энергоносителей. Начать удобнее с энергоносителей. Их главными отличительными чертами являются, во-первых, отсутствие в природе в форме, пригодной для непосредственного полезного 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 удаётся хранить в по-настоящему промышленных количествах (хотя исследования в этом направлении и ведутся). Но пока в каждый период времени производство электрической энергии, за вычетом потерь при транспортировке и распределении, должно приблизительно равняться её потреблению. Это делает весьма актуальной задачу разработки методов и средств правильной 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 её универсальность и адаптируемость практически ко всем

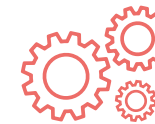
современным технологиям, ко всем техническим комплексам и устройствам. Где было бы без электричества громадное большинство современных машин, представляющих собой без электроснабжения просто-напросто кусок железа? Где были бы компьютеры? Где были бы системы связи и информатики? Где были бы... и так до бесконечности. Без надёжного электроснабжения говорить о новом экономическом укладе, о цифровом мире, о просто достойном качестве жизни — это глупая сказка.

Вот почему производство электричества, или электрогенерация (иногда просто «генерация»), как и надёжная, построенная логично и с умом система электроснабжения, являются обязательными критериями нормального экономического, технологического и социального развития любой современной страны. Но вот как тогда отнестись к тому, что в нашем мире сейчас около двух миллиардов людей (приблизительно четверть часть всего населения планеты) 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 трёх четвертей всей получаемой человечеством энергии) наивно удивляются — откуда берётся массовая миграция? Почему эти нищие полуголодные люди, бросая всё, с громадным риском для жизни рвутся к ним? Только в наивность здесь верится почему-то слабо.

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 удаётся. Но именно «неразлучная пара» — паровая турбина и электрогенератор — во многом определяет лицо современной энергетики, а при использовании пара различаются лишь способы его получения.

Ещё раз подчеркнём — 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 вещества и материалы, которых в природе в свободном состоянии нет, но они могут быть получены из некоторого первичного естественного энергоресурса — ценой определённых затрат энергии, а иногда и смены её формы. При этом, что очень важно, они должны быть хранимы 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 можно получить и накопить. Другим примером такого рода являются так называемые «вторичные» ядерные материалы (плутоний-239 и уран-233), отсутствующие в природе и получаемые искусственным путём. Но к ним мы вернёмся позже, в главе 2.

Особое место среди промежуточных энергоносителей занимает водород. Его роль в энергохозяйстве будущего может быть настолько велика, что уже сейчас иногда говорят не просто о «водородной энергетике», а о «водородной экономике». Поэтому этот вопрос мы рассмотрим более подробно.

Причины интереса к водороду понятны. Потенциальное ресурсное обеспечение практически неограниченное — вспомним хотя бы, из чего состоит обычная вода. Как и экологическая чистота базового процесса получения энергии — в ходе экзотермического окисления водорода

до «исходной» воды. Никаких выбросов соединений углерода и токсичных веществ! В свете современных требований по развитию «безуглеродной энергетики», да и промышленности в целом, — важнейшее обстоятельство. Разговор об этом у нас ещё впереди, здесь лишь скажем, что и необходимые технологии перевода водорода в хранимую (что очень важно!) форму и последующего энергетического использования, в общем, уже имеются, и они неплохо отработаны. Это и ёмкости высокого давления с соответствующей аппаратурой, и так называемые водородные топливные элементы. Был бы чистый водород...

Но его в природе нет, он встречается только в виде соединений — тех же воды и метана. Хотя получить водород из них, конечно, можно, но ценой дополнительных технологий и весьма приличных энергозатрат. Классический промежуточный энергоноситель!

Вот тут и начинаются проблемы. Первая: из чего и как получать водород? В настоящее время его мировая наработка (к 2020 году — около 80 миллионов тонн в год, а главный потребитель — химическая промышленность) базируется на методах, которые так или иначе предусматривают использование ископаемых углеводородов. Так, сейчас нарабатывается, по разным оценкам, 90–95% всего получаемого водорода, при этом побочные продукты таких технологий (CO_2 в первую очередь) попадают во внешнюю среду. Понятно, что говорить здесь об «экологической чистоте» не приходится — неважно, как такой водород будет использоваться в дальнейшем. По европейской классификации он называется «коричневым». Не самый приятный цвет...

Но есть ещё и «зелёный» водород — электролизный, получаемый прямым разложением воды на её химические компоненты под действием электротока. В ходе этого процесса как такового, конечно, никаких углеродных выбросов во внешнюю среду нет «по определению». Но при этом «зелёная» доля в мировом производстве водорода, как мы видели, не превосходит и нескольких процентов. Почему?

Во-первых, производство такого водорода сейчас обходится гораздо дороже «коричневого»: на единицу полученной продукции — в 4–6 раз. А во-вторых, мы уже видели, что при оценке «экологичности» технологии надо рассматривать весь её производственный цикл. В данном случае — учитывать, как вырабатывается электроэнергия для промышленной реализации электролиза. Это — процесс очень энергоёмкий, и если в основе его энергообеспечения лежит сжигание ископаемого углеводородного топлива (угля, мазута, газа), то все дальнейшие экологические преимущества «зелёного» водорода, понятно, тут же сводятся к нулю. Внешней среде, по большому счёту, всё равно, как в неё попадают загрязнители и техногенные выбросы CO_2 — при перемене мест слагаемых сумма остаётся прежней.

Однако всё меняется, если источником энергии для получения «зелёного» водорода является «безуглеродная» технология. Это обеспечит отсутствие указанных выбросов уже всей производственной цепочке с использованием водорода. Вот тогда действительно открывается путь к «экологически чистой» водородной энергетике, да и водородной экономике! И здесь особая роль (об этом далее) может принадлежать именно атомной энергетике.

Впрочем, к этому вопросу, как и к проблеме «безуглеродного» развития, мы вернёмся позже. А теперь от энергоносителей перейдём к первичным источникам энергии.

Их 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 нём и «запасена» энергия, обеспечивая возможность её освобождения и требуемого преобразования в соответствии с принципами эквивалентности её 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 её высвобождения нужны костёр, печь, котёл, форсунка, реактор.

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

— Надолго ли хватит людям соответствующего природного энергоресурса — с учётом 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 (её 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 её 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. К слову говоря, именно его наличие делает количественную оценку природного теплового баланса Земли довольно сложным делом. А каково здесь техногенное влияние атомной энергетике — об этом разговор ещё 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, 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 её получения. Например, ветер или солнечное излучение сами по себе есть энергия, «готовая для использования», тут не нужны ни котёл, 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 CO₂, сажи, летучих окислов серы и азота, других токсичных выбросов возобновляемая энергетика по существу свободна.

Достаточно ли только этого для того, чтобы, слушая вопли горластых «экологических активистов», сделать решительный выбор в пользу возобновляемых источников энергии, объявив «священную войну» невозобновляемым?

Не будем спешить с выводами. Лишь скажем, что при обсуждении таких вопросов не надо забывать меткое высказывание У. Черчилля: «Любая проблема имеет быстрое, красивое и неверное решение».

Ясно, однако, и другое: нужен долгосрочный, обоснованный, осознанный план действий в области энергетики, без вселенских истерик, паники и компанийщины. А начать надо с того, чтобы определить базовые, главные энерготехнологии современности и обозримого будущего. Выбрать их по одновременному соблюдению нескольких критериев: они должны обеспечить по меньшей мере сохранение достигнутого уровня энергопотребления, иметь значимое (как минимум — в пределах сотен лет) ресурсное обеспечение, гарантированно быть практически реализуемыми и не наносить значимого немедленного и/или отложенного ущерба здоровью людей и окружающей среде.

Критерии энерготехнологий

Что же, поищем вместе. Но для этого нам надо расшифровать физико-технический смысл сформулированных выше требований. В особенности — первого из них. Именно здесь часто предлагаются внешне очень заманчивые пути развития энерготехнологий, которые, при попытке практической реализации, увы, оказываются тупиковыми.

Прежде всего давайте нарисуем «энергетический портрет» современного мира. Довольно удобной характеристикой для этого является вклад различных технологий в общую мировую электрогенерацию (в %). К 2020 году получилась вот такая картина: уголь — 36,7; природный газ — 23,5; нефть — 2,8; атомная энергетика — 10,3; гидроэнергетика — 16; возобновляемые энергоисточники и сжигание мусора — вместе около 10.

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 (15,7%), и это очень хорошо, так как сжигание угля — очень «грязная» в экологическом смысле процедура. Зато в России гораздо выше среднемировых вклады экологически «чистых» технологий генерации — использование газа (50,4%) и атомной энергии (20,6%).

Другая важная характеристика энергетики — 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 учёт, помимо генерации, и энерготехнологий, не предусматривающих 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 её производных, а также газа. Например, в мировом ТЭБ доля нефти составляет около 40% против 3,3% в мировой генерации, в российском — 21% против 1,2%. Кстати, хочется предостеречь читателей: в информационном пространстве путаницы на этот счёт 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 ранее общего критерия. Конечно, здесь просто слов мало. Нужно увязать между собой огромное количество тесно взаимосвязанных между собой 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 приёмника в ходе работы установки. Таким приёмником 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 и др. 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) временной период, в течение которых 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 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 частных случаев, «широкими мазками».

«Огневая энергетика», основанная на сжигании ископаемой органики, по факту своего вполне реального существования способна обеспечить как минимум достигнутый уровень энергопотребления — как мы видели, она-то его

и определяет. Реализующие её 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 её ресурсные ограничения и экологическая, мягко говоря, небезупречность (о чём разговор ещё впереди) ставят определённые пределы её 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 трёх, сформулированных нами ранее) — наличие. Как и третьего (гарантированность технической реализуемости). Ведь полезное использование, например, энергии ветра, солнца и падающей воды, как мы знаем, известно людям с незапамятных времён, и соответствующие технологии с тех пор на месте тоже, разумеется, не стояли. Тоже неплохо.

А вот выполнение первого требования (техническая возможность обеспечения хотя бы существующего уровня мирового энергопотребления) для энергетики на возобновляемых источниках является большой проблемой. Тут в полной мере проявляются её «врождённые пороки».

Первый (вероятно, главный) — чрезвычайно низкая плотность передачи энергии, её «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 неё характерна достаточно высокая плотность передачи энергии (порядка 100 кВт/м²), о чём разговор далее.

Прямым следствием этого является резкое возрастание производственных площадей энергостанций 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 (свыше 70%, против 10,3% в мире и 20,6% в России). И если все французские АЭС виртуально заменить «ветряками», это потребует «энергетического отчуждения» порядка одной десятой всей территории страны — включая Альпы и Лазурный Берег! Каково?..

Одно тянет за собой другое. Вынужденно огромные площади энергостанций на возобновляемых источниках влекут за собой резкое, на порядки величин, увеличение удельных (на единицу произведённой 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 ещё 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 челове-

ком не контролируются, хуже того — в сколько-нибудь долгосрочном плане и не прогнозируются. 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 надеждам, часто возлагаемым на них политиками и экологическими деятелями и шумно озвучиваемым кем и как попало через средства 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 неё 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 объёме 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 дешёвой гидроэнергии.

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

Вовсе не случайно гидроэнергетика в только что перечисленных странах базируется на значительном количестве сравнительно небольших ГЭС, сооружённых 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. А в некоторых случаях на горных реках можно и вовсе обойтись без плотин.

Совсем иная картина на равнинных реках. Здесь для обеспечения необходимого напора господствуют хорошо известные россиянам циклопические масштабы. И при сооружении плотин (что резко ухудшает инвестиционную привлекательность проектов), и при образовании «искусственных морей» — затоплении громадных площадей выше по течению реки (с неизбежными как экономическими, так и в особенности экологическими потерями). Этим и обусловлен 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...

Сказанное обуславливает весьма скромные перспективы гидроэнергетики как энергии будущего. При естественных различиях в частностях прогнозов на этот счёт, все они совпадают в главном — возрастания её доли ни в электрогенерации, ни в общей структуре ТЭБ ожидать не приходится. Напротив, более вероятным представляется её уменьшение.

В мире: как обстоят дела и надолго ли хватит?

Вернёмся теперь к **рис. 1.2**. К населению стран, лежащих на плато построенной нами кривой годового энергопотребления на душу населения, членов «клуба энергетического изобилия», относятся жители большинства стран Западной, Средней и Северной Европы, Японии, США, Канады, стран Персидского залива. К нашему счастью, в этом списке есть 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 выразительное название «энергетический империализм»? Каковы, в этой связи, прогнозы на величину общего мирового энергопотребления? За счёт 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?

Итак, начнём 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 0,7 МВт × час на человека в год), та же КНР (3,3). Ведь речь идёт 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 горлопанных «экоактивистов» 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 несомненен: производство энергии в мире в обозримое время будет возрастать. За последние полвека оно увеличилось почти вчетверо, и эта тенденция, несомненно, сохранится. Остаётся понять — за счёт 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» 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 использующая его термоядерная энергетика реально таковой пока не является — и неизвестно, когда будет являться.

Результат «инвентаризации» оказывается довольно неожиданным. Почти 87% от всей «ископаемой» энергии

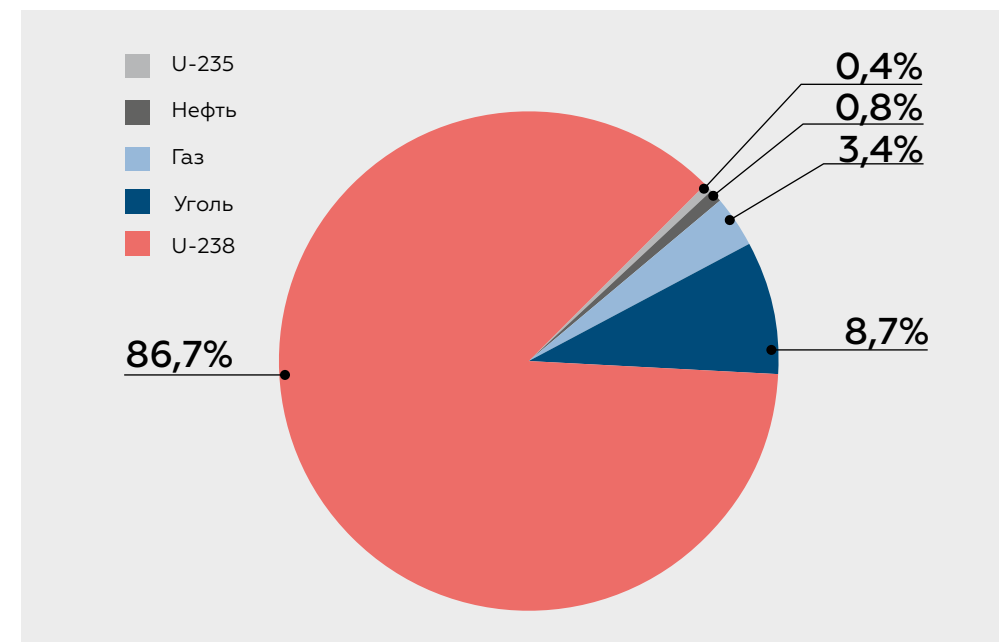


Рисунок 1.4. Относительное содержание энергии в различных топливных ресурсах

на нашей планете содержится в одном-единственном веществе — уране! Но вот как технически использовать его — мы пока не знаем. Хотя, когда звучит слово «уран», в голову чисто интуитивно приходит атомная энергетика. Собственно, так это и есть.

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 всё время существования человеческой цивилизации уран покорно «стоял в очереди» на разумное энергетическое использование.

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

Мы начинаем рассматривать 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 энергетики очень высок (в среднем — приблизительно 0,8) и практически полностью управляем, его зависимость от суточных и погодных-климатических факторов отсутствует. О её практической реализуемости речь, понятно, вообще не идёт: современная атомная энергетика — вполне реальная часть «индустриально-технологического пейзажа» нашего времени, обеспечивающая, как нам известно, 10,3% мировой выработки электроэнергии и 20,6% — российской. А на вопрос об её ресурсном обеспечении вполне наглядно отвечает **рис. 1.4**.

Но есть здесь и ещё одна проблема, ставящая развитие атомной энергетики в число главных технологических приоритетов современности. Отметим как факт, что она не предполагает и не предусматривает каких-либо материальных выбросов во внешнюю среду — ни в какой форме. Сейчас мы поймём почему.

Немного об экологических проблемах современной энергетики

Вспомним о том, что высвобождаемая человеком энергия, как и побочные продукты её получения, сама по себе никуда не девается — она влияет на параметры многочисленных ба-

лансов в экосфере Земли. Поэтому, высвобождая каким-либо образом энергию и используя её, необходимо очень внимательно следить за тем, чтобы возникающие вследствие этого изменения балансовых параметров экосферы не нанесли бы значимого ущерба нашей планете 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 серьёзные опасения.

Автор вовсе не собирается здесь становиться участником громких «страстей по выбросам» — и уж тем более вливаться в ряды горластых и, как правило, довольно невежественных «экоактивистов». Но ему хорошо известно одно из основных правил фундаментальной экологии — правило одного процента. Оно гласит: отклонения значимых параметров естественных природных процессов в пределах порядка одного процента от долговременных равновесных значений могут вызывать качественные изменения основных параметров систем, где эти процессы происходят, — вплоть до разрушения этих систем.

Не может ли нам это грозить? Хорошо известно, что 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 CO₂ в атмосферу и его обратное поглощение элементами экосферы Земли. Непременное условие её устойчивости — равновесие между этими процессами. Иными словами, годовые количества выделившегося в атмосферу и поглощённого из неё CO₂ должны приблизительно совпадать, формируя некоторую равновесную величину. Её современное значение экологам хорошо известно — это 5,5 × 10¹¹ тонн CO₂ в год. Применяя правило одного процента, получим, что относительно безопасным «дополнительным» выбросом CO₂ будет величина около 0,5 × 10¹⁰ т/год. На деле же только «огневая энергетика» выбрасывает сейчас приблизительно 3,5 × 10¹⁰ т/год — в семь

раз больше! А ведь именно она, как мы знаем, «определяет лицо» современного энергетического хозяйства человечества!

Автор далёк от того, чтобы подробно рассматривать здесь сложнейшие (хотя и интереснейшие) экологические проблемы современной энергетики — в конце концов, эта книга о другом. И уж тем более не хотелось бы делать скоропалительные выводы — уподобляясь упомянутым «экоактивистам», логика рассуждений которых, даже и по очень серьёзным вопросам, нередко строится по принципу «у гориллы ноздри широкие, потому что пальцы толстые». Но вот некоторые факты привести, вероятно, было бы нелишне.

Например, в настоящее время широко обсуждается роль дополнительных выбросов CO₂ при возникновении так называемого «техногенного парникового эффекта», который может привести к изменению температурного режима планеты. Про выбросы мы кое-что уже знаем. А вот теперь — немного о температурном режиме. 2018 год, по оценке климатологов, входит в число четырех самых теплых годов за всю историю метеонаблюдений, а остальные три теплых года — это 2015-й, 2016-й и 2017-й. В целом же рост средней температуры на поверхности Земли наиболее интенсивно наблюдается именно за последние 50–60 лет (**рис. 1.5**), довольно хорошо коррелируя при этом с динамикой развития мощностей «огневой энергетики».

Однако хорошо известно, что в далёком, да и близком прошлом климат Земли менялся — и не один раз, и часто кардинально. Речь здесь, однако, идёт лишь о научно обоснованных доказательствах таких изменений (они есть), но никак не об их достоверных причинах (они пока гипотетичны). Их установление — следующая ступень познания, и наш нынешний уровень понимания главных закономерностей развития экосферы планеты для этого явно недостаточен. Об этом разговор ещё впереди.

Но как же здесь мешает делу ущербная логика горластых «экоактивистов» и технически пещерных, корыстолюбивых и злобных политиков, приводящая к ошеломительно-

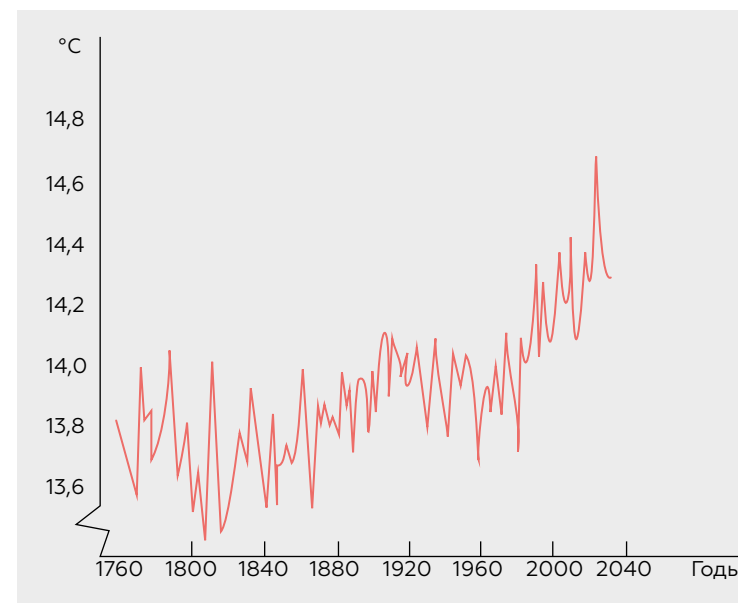


Рисунок 1.5. Рост средней температуры на поверхности Земли в течение последних 250 лет

му характеру установления причинно-следственных связей в экологии и энергетике! Климат теплеет, потому что ветряков и солнечных панелей мало, а вот людей много... По принципу «у гориллы ноздри широкие, потому что пальцы толстые».

Ну давайте обвиним динозавров (в мезозойскую эпоху климат здорово потеплел) в том, что они безмерно увлеклись «углеродной энергетикой», а ветряками пренебрегли! Вот с мамонтами сложнее — как они-то допустили глобальное обледенение? Чересчур много солнечных панелей соорудили?..

А уж стремление (часто принимающее характер политических обязательств) удержаться к конкретному году на конкретном уровне темпы повышения глобальной температуры планеты, не понимая (да и не стремясь понять!) механизмов обсуждаемого явления, и вовсе шокирует. Ведь мировое энергопотребление в обозримое время будет только возрастать (об этом мне уже приходилось говорить). За последние полвека оно увеличилось почти вчетверо, и эта тенденция,

несомненно, сохранится. Призывать в этих условиях к повальному сворачиванию традиционной «огневой энергетики», как виновной в глобальном потеплении, — ну, знаете... Это напоминает средневековые «охоты на ведьм», когда последних обвиняли в неурожаях, эпидемиях и т. д., а досадную повторяемость этих несчастий объясняли лишь недостаточным количеством сожжённых ведьм. Как тут не вспомнить слова великого мученика науки Джордано Бруно: «Невежество — лучшая в мире наука, она даётся без труда и не печалит душу».

В наше просвещённое время противников столь масштабных «энергетических перемен» на кострах, слава Богу, не жгут, но вот общественно-политическому ostrакизму часто подвергают — как якобы не понимающих мирового «экологического мейнстрима». Другой вопрос, откуда растут ноги этого «мейнстрима». Скорее всего, дело здесь в своеобразном синергическом влиянии столь массового сегодня «клипового» образа мышления, с одной стороны, и коммерческих интересов многочисленных фирм — изготовителей ветряков и солнечных панелей (а также их политических и информационных лоббистов) — с другой. Почему-то автору кажется, что второе играет большую роль...

Но автор очень далёк вот от какого вывода: поскольку однозначная, научно обоснованная связь между техногенными выбросами и потеплением климата научно не доказана, на эти выбросы можно просто махнуть рукой. Всё гораздо сложнее и тревожнее.

Фундаментальная экология — это, в общем, наука о совокупности множества природных круговоротов, устоявшаяся равновесная динамика которых и определяет условия жизни на нашей планете. Их характеристики тесно взаимосвязаны, и именно чрезвычайная сложность этих связей и является основной причиной трудностей объяснения и прогнозирования изменений в экосфере Земли, в частности — её климата. Но мы уже знаем, какие возмущения вносят в природный круговорот углерода техногенные выбросы CO₂ в наши дни.

Конечно, экосфера планеты обладает, в соответствии с хорошо известным экологами принципом Ле-Шателье — Брауна, некоторым изначальным «запасом устойчивости», позволяющим, в определённых пределах нарушения равновесности системы, вернуться к ней естественным путём. Но мы сегодня не знаем, каковы эти пределы. Как не знаем и того, к чему может привести нарушение равновесности углеродного цикла. Применительно к климату — может быть, к потеплению, но может — и к похолоданию. А может запустить и какие-то иные, пока неизвестные нам масштабные процессы в экосфере, закономерностей которых мы пока не знаем даже на качественном уровне. Можно лишь утверждать с высокой долей вероятности, что после этого условия жизни на нашей планете могут стать иными. И вряд ли более благоприятными для человечества. Оно, за многие века своей истории, адаптировалось к прежним — и как биологическая популяция, и как цивилизационное сообщество.

А выводы несомненны. Во-первых, уж если мы не знаем, где здесь проходит роковая для экологического состояния планеты «критическая черта» объёма техногенных выбросов CO₂, их просто следует обязательно уменьшать — следуя мудрой русской пословице «не буди лихо, пока оно тихо». Но при этом надо удержаться на тонкой грани, по одну сторону от которой лежат экологические неурядицы, по другую — технологическая и социальная деградация человечества.

Тут автор вовсе не сторонник немедленных (тем более «карательных») выводов и действий. В сфере энергетики такое недопустимо в принципе — вспомним об уже известной нам роли промышленных способов получения энергии как о технологиях прямого жизнеобеспечения. Практическая реализация громких дилетантских призывов с припевом «ату его (её), ату», с учетом технологического характера современного общества, очень скоро приведёт его не в экологически безопасный рай, а напрямую к пещерам, шкурам и каменным топорам.

Но надо понять и другое — каменный век закончился не потому, что кончились камни. «Огневая энергетика»

должна понемногу уменьшать свой вклад в энергообеспечение общества не потому, что станут иссякать её топливные ресурсы (нам только этого не хватало!). И людям надо как можно быстрее, без паники, но и без промедлений, научно и технологически обеспечить этот процесс — опираясь на профессионалов, а не на горлопанов. Конкретно говоря, надо искать пути промышленного развития «большой» энергетики, свободной от масштабного сжигания органического топлива, — следовательно, и от сопутствующего ему негативного воздействия на окружающую среду.

Где искать эти пути? Мы знаем, что технологии возобновляемой энергетики «безуглеродны», но создать лишь на их основе современную систему надёжного энергоснабжения общества — не получается. И в наши дни, и на обозримое время вперёд существует единственная реализуемая на практике энерготехнология, позволяющая удержаться на упомянутой ранее грани. Это — атомная энергетика. Автор не раз призывал читателей по возможности воздерживаться от категоричных оценок и суждений, но в данном случае дело обстоит именно так, а не иначе.

Но только ли физико-технические и экологические вопросы ставит перед человечеством развитие атомной энергетики? Ответ: нет. Ведь человечество должно ясно осознать, что овладение ядерной энергией освобождает совершенно фантастические по своему 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 несопоставим 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 берёт на себя дополнительную технологическую и социальную ответственность.

Что лучше? И куда дальше?

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 — гораздо более широкое понятие. Оно включает в себя не только энерготехнологии, но и показатели потребления энергии, сети для её передачи и распределения, особенности энергоустановок и обеспечивающих их инфраструктур, экономические критерии и т. д. А здесь требуется одновременный учёт 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 образовательного и культурного развития, и ещё многое другое.

Вот простейший пример. Хорошо известно, что потребление электричества в течение суток неоднородно (**рис. 1.6**): оно сильно возрастает в дневные часы и уменьшается в ночные. Понятно почему: ночью работают, в основном, лишь производства непрерывного цикла и службы жизнеобеспечения, а люди и вовсе спят. С другой стороны, большинство современных ядерных энергоблоков эксплуатируются в режиме постоянной выдаваемой мощности, близкой к номинальной. Иной режим работы (так называемое суточное маневрирование мощностью) для современных энергетических реакторов технологически неблагоприятен.

Как оптимизировать ситуацию в данном случае? Можно так: АЭС обеспечивают базовую часть суточного графика потребления, а его пиковые участки ложатся на иные энерготехнологии, где изменение выдаваемой мощности обеспечивается технически проще. Это может быть и газ, и возобновляемая энергетика.

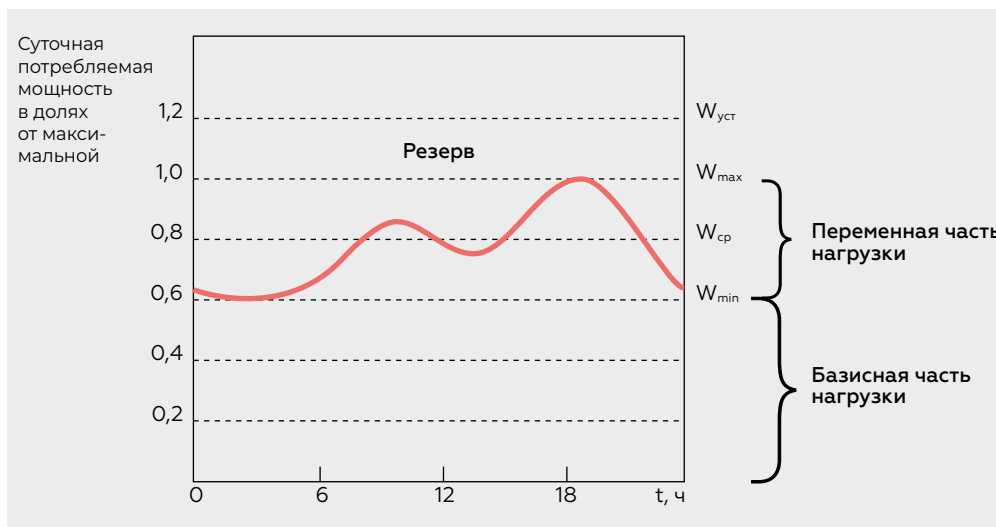


Рисунок 1.6. Суточный график использования электроэнергии

Но можно и по-другому: ночной избыток мощности АЭС в это время суток переключить на производство «зелёного» водорода, где главной проблемой, как мы знаем, является энергетическая «прожорливость» электролиза! Ведь тогда водород вполне можно рассматривать как «законсервированное», хранимое электричество — и при этом эмиссионные углеродные технологии вообще исключаются из производственной цепочки!

Приведённый пример хорошо иллюстрирует непреложную истину: все решения в энергетике должны быть в высшей степени продуманы, взвешены и ситуативны, без каких-либо воплей и митингов, а тем более — политических безумств.

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



Вот этими словами мы и закончим краткий обзор современных энерготехнологий.

Знакомимся
с атомной
энергетикой —
её физика
и техника

$E_{cb} = \Delta mc^2$

$^1_0n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{89}_{36}Kr + 3^1_0n$
 $^1_0n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{91}_{38}Sr + 2^1_0n$

$L_{ф.с.} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \sum_{\phi, \delta} \sigma_{\phi, \delta} \cdot \sum_{\phi, \delta} \sigma_{\phi, \delta}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 2,126 \cdot 2,559}} = 0,246 \text{ см}$
 $L_{зам} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \sum_{\phi, \delta} \sigma_{\phi, \delta} \cdot \sum_{\phi, \delta} \sigma_{\phi, \delta}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,2221 \cdot 2,31}} = 2,555 \text{ см}$

$\sigma_{\text{взаим}} = \pi \cdot \frac{D_{\text{взаим}}^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{0,91^2 \cdot 102}{4} = 66,34 \text{ см}^2$
 $(E-1) = 0,5 \cdot \left(\frac{0,486}{2,555}\right)^2 \cdot \left(\frac{0,486}{0,455}\right) - 0,75 = 0,001$

$E_k = E_{\text{акumul}} - E_{\text{связан}} = \dots$
 $\lambda_2 = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$
 $\mu = \cos \theta = \frac{2}{3}$
 $\frac{\partial \mu}{\partial \epsilon} = S + \Delta \cdot \Delta \phi - \Sigma \sigma \phi$
 $I = -\Delta \cdot \frac{d\phi}{d\epsilon} = \lambda / S \cdot (1 - \mu)$
 $u = \ln \left(\frac{E_0}{E}\right)$
 $L^2 = \frac{D^2}{\Sigma \sigma} \cdot L^2(T_0) = L_0^2 \cdot \sqrt{\frac{1}{295}}$

$235U + ^1_0n \rightarrow 140Cs$
 $\sigma_s = v_s \cdot \left(\frac{\sigma_s^0}{\sigma_s^0 + \sigma_s^1} + v_s \cdot \frac{1}{1 + \alpha}\right)$
 $I = \int_E^{E_0} \sigma_a(E) \cdot \frac{dE}{E}$
 $\Sigma_a = \rho_0 \cdot \sigma_a \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot L$

$\sigma_a^{235} = 683 \cdot 0,884 \cdot 0,885 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 246,648 \text{ барн}$
 $\sigma_a^{238} = 2,71 \cdot 0,884 \cdot \sqrt{\frac{293}{1375,134}} = 1,106 \text{ барн}$

$\rho = \frac{\Delta k_{\text{эф}}}{k_{\text{эф}}} = \frac{k_{\text{эф}} - 1}{k_{\text{эф}}}$
 $\rho = \frac{1569 - 1,726}{568 - 293} = -5,710 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 $k_{\text{эф}} = \frac{1,795 \cdot \exp(-1,31 \cdot 10^{-3} \cdot 37,413)}{1 + 1,31 \cdot 10^{-3} \cdot 0,241} = 1,709$
 $k_{\text{эф}} = \frac{1,763 \cdot \exp(-1,144 \cdot 10^{-3} \cdot 101,260)}{1 + 1,144 \cdot 10^{-3} \cdot 0,664} = 1,709$

$\Delta m = Z m_p + N m_n - m_a$
 $N_{U235} = 4,56 \cdot 10^{21} \cdot 0,357 = 1,629 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3$
 $N_{U238} = 2,465 \cdot 10^{21} \cdot 0,75 = 1,849 \cdot 10^{21} \text{ ядер/см}^3$

$\sigma_s^+ = \sigma_s^+(e) + \sigma_s^+(m) = \sigma_s^+(e) + \sigma_s^+(m) - \sigma_s^+(m,2) = 0,025 + 1,920 - 0,020 = 1,925 \text{ барн}$
 $\sigma_s^+ = \sigma_s^+(e) + \sigma_s^+(m) = \sigma_s^+(e) + \sigma_s^+(m) - \sigma_s^+(m,2) = 0,025 + 2,510 - 0,020 = 2,515 \text{ барн}$
 $\sigma_s^+ = \sigma_s^+(e) + \sigma_s^+(m) = \sigma_s^+(e) + \sigma_s^+(m) - \sigma_s^+(m,2) = 4,300 \cdot (1 - 0,800) + 1,80 + 1,920 = 3,960 \text{ барн}$
 $\sigma_s^+ = \sigma_s^+(e) + \sigma_s^+(m) = \sigma_s^+(e) + \sigma_s^+(m) - \sigma_s^+(m,2) = 4,4 \cdot (1 - 0,8) + 0,590 + 2,51 = 3,980 \text{ барн}$

$235U + ^1_0n \rightarrow 90Sr + 143Xe + 3^1_0n + \text{Энергия}$
 $235U + ^1_0n \rightarrow 92Kr + 141Ba + 3^1_0n + \text{Энергия}$

$\sigma = \frac{\pi}{\phi \cdot N_s} \cdot \theta = \frac{\pi \cdot \sigma_{\text{ф.с.}}}{\pi \cdot \rho \cdot \sum \sigma_i}$
 $F = \frac{W}{E_j} \cdot \left[\frac{\sigma}{L} \cdot \theta \cdot (1 - \mu) + \frac{V \cdot I \cdot \theta}{E_j \cdot L} \right]$
 $L_{ф.с.} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \sum_{\phi, \delta} \sigma_{\phi, \delta} \cdot \sum_{\phi, \delta} \sigma_{\phi, \delta}}} = 0,980 \text{ см}$
 $L_p^2 = L_{\text{зам}}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{\phi}^2 \cdot \theta = 2,042 \text{ см}^2$

$\tau = [-(\beta - \rho)] \tau_w + (\beta - \rho) \tau_s \approx (\beta - \rho) \tau_s$
 $\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\rho \cdot \sigma_a} = \frac{1}{1,207 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot 1,2} = 6,9 \cdot 10^{-8} \text{ с}$

$V_{a.s.} = \frac{N}{N_0} \cdot \eta = \frac{175 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{85 \cdot 10^3} = 2,471 \cdot 10^6 \text{ см}^3$
 $\sigma_{a, \phi. \delta.} = 2,3 \cdot 0,594 + 0,278 \cdot 0,056 = 2,126 \text{ см}^{-2}$
 $\sigma_{a, \phi. \delta.} = 0,65$

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 природы 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 определённых 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 Д. И. 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 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 нём.



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 объём ядра в сравнении с объёмом атома ничтожно мал (порядка $10^{-13}\%$).

Следует, однако, понимать, 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 определённого времени не имеет в квантовой механике физического смысла. Но все эти вопросы остаются за пределами нашего рассмотрения.

Нуклиды, сохраняющие нуклонный состав и энергетическое состояние в течение неограниченно долгого времени, называются стабильными; в противном случае речь идёт 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 нём 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, т. к. $N = A - Z$. 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 одина-

ковым 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 вовсе, 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 F-19), алюминий (Al-27), иод (I-127), золото (Au-198); такие элементы часто называют моноизотопными. Элементы с атомными номерами более 83 (начиная с полония — Po), а также два элемента середины таблицы Менделеева (технеций, Tc , $Z = 43$, 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 путём. 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; $Z = 1$): ^1H , ^2H , ^3H ;
- изобары ($A = 12$): ^{12}N , ^{12}C , ^{12}B , ^{12}Be ;
- изотоны ($N = 6$): ^8He , ^9Li , ^{10}Be , ^{11}B , ^{12}C , ^{13}N .

Вернёмся 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. На практике часто можно определить период полураспада и как время, за которое некоторая начальная активность радионуклида уменьшится наполовину.

Например, известно, что радиоактивное загрязнение территорий и объектов после тяжёлой аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году в настоящее время определяется в основном излучением цезия-137. В природе его нет — эти ядра образовались искусственным путём 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 30 лет. Т. е. через 30 лет останется половина от его начального количества (другая половина распадётся в стабильный барий-137), через 60 лет — половина из оставшейся половины ($1/4$), через 90 лет — $1/8$ 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

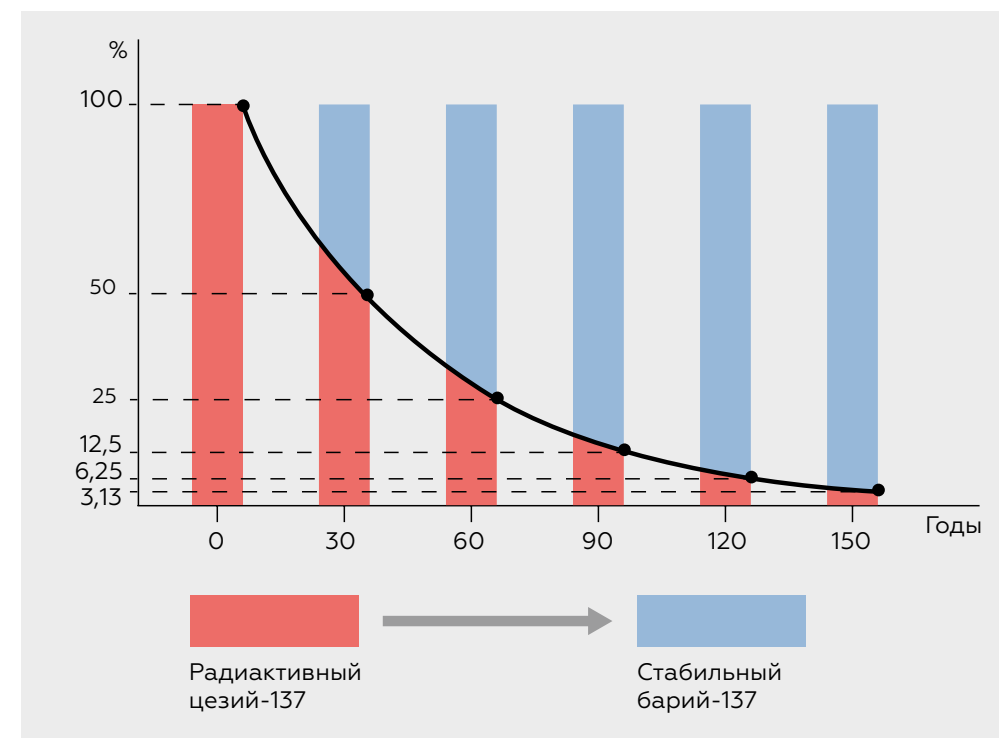


Рисунок 2.1. Радиоактивный распад цезия-137 (период полураспада — 30 лет)

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.

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: $N(t = n \times T_{1/2}) = N_0 / 2^n$, 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 вернёмся к некоторым базовым физическим характеристикам атомных ядер.

Массы протона и нейтрона (а только эти частицы и входят в состав ядер) 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 часто 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 её введением будет ясен смысл атомной энергетики 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. Нетрудно видеть, что 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 начнём 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 последняя оказывается заметно больше 12 — примерно 12,1 а. е. м. Неужели мы ошиблись?

Никакой ошибки нет. Вот вам аналоговая иллюстрация: предположим, что несколько школьников собрались после уроков в кино, для чего каждый из них 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 некий коллектив, объединённый 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 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 $E_{\text{св}}$. Эта величина ($E_{\text{св}}/A$), называемая удельной энергией связи на нуклон, и является основной характеристикой меры устойчивости ядра.

У нас должен сразу проснуться интерес. Хорошо известно, что характерная энергия, выделяющаяся в экзотермических процессах, всегда составляет величину порядка энергии связи системы, где происходит событие. Мы знаем, что для химических реакций эта величина со-



ставляет 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 бы, казалось бы, в считанные мгновения «разодрать» ядро на части. Почему так не происходит? Ответ: 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 ещё столкнёмся.

Кандидаты на ядерное топливо — где их искать?

А теперь вот о чём. Что для атомной энергетики нужен уран в качестве основы ядерного топлива, в наше время известно не то что школьникам — даже детсадовцам. 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 ещё кое-что радиоактивное (но об этом далее). А всё это для атомной энергетики не годится — нужен уран. Почему?

Ну, во-первых, к атомной энергетике радиоактивность урана как таковая не имеет ни малейшего отношения. Мешать она иногда мешает, но никогда не помогает. А во-вторых, если радиоактивность тут ни при чём, то почему



нельзя использовать в качестве основы ядерного топлива... да мало ли что? Железо, медь, что-то ещё?

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

Попробуем применить этот принцип к существующим в природе ядрам — от самых лёгких 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_{cb}/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_{cb}/A от A показана на **рис. 2.2**. Эта зависимость и является главной при обосновании возможных направлений развития ядерной энергетики. Нетрудно понять, что для достижения наиболее выгодных, по принципу минимума потенциальной энергии, состояний с наибольшими величинами E_{cb}/A (т. е. для элементов от Cr до Zn), для более лёгких ядер энергетически выгодны процессы слияния двух ядер в одно, более тяжёлое. Такой процесс называется термоядерным синтезом. Для тяжёлых 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 энергетики.

Тем не менее следует сказать несколько слов и о энергетике ядерного синтеза (термоядерной энергетике). Она вполне способна, хотя бы в рамках рассматриваемых к настоя-

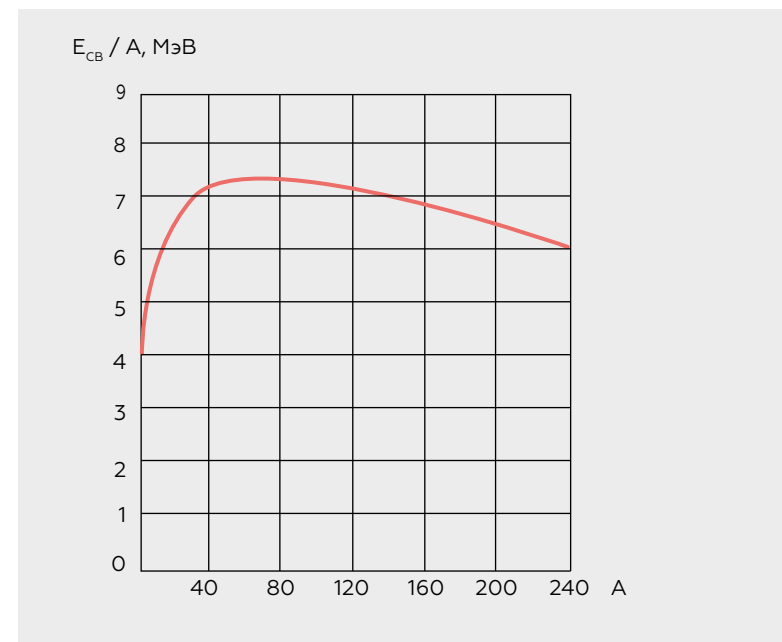


Рисунок 2.2. Зависимость удельной энергии связи ядра от его массового числа

щему времени технических подходов, обеспечить всему человечеству энергетическое изобилие. Это обусловлено приемлемыми ожидаемыми 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 — расчётное количество энергии, «запасённое» лишь в 1 л 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 тер-

моядерных процессов к настоящему времени удалось лишь в режиме неконтролируемого выделения энергии в наиболее разрушительном оружии за всю историю человечества — термоядерной бомбе. А вот освоение «управляемого термоядра» оказалось невероятно трудным делом. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в этом направлении, промышленная реализация термоядерной энергетики отодвигается, вероятно, на десятки лет. Но нельзя забывать, что 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, однако, к процессу, который является физической основой современной атомной энергетики, — делению тяжёлых ядер на два приблизительно одинаковых осколка. У внимательных читателей при знакомстве с **рис. 2.2** тут же возникает логичный вопрос: если процесс ядерного деления действительно энергетически выгоден для всех тяжёлых ядер, то как же существуют в природе такие тяжёлые 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, определяемой высотой склона). 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 мала в сравнении с той, которую получит саночник в конце спуска со склона, но без её приложения сам спуск не состоится.

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

сообщить некоторую дополнительную внутреннюю энергию, или, как говорят физики, «возбудить» его, заставив присоединить какую-либо частицу. Удобнее всего — нейтрон. Он электрически нейтрален, и при взаимодействии с ядром для него отсутствует сила кулоновского отталкивания, которая неминуемо проявилась бы, если бы мы попытались возбудить тяжёлое ядро с помощью подлетевшей извне заряженной частицы.

Мы будем рассматривать взаимодействие ядер лишь с медленными нейтронами, кинетическая энергия которых соответствует температуре внешней среды (вот, кстати, ещё 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 поэтому 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» тяжёлого ядра, которое образовалось при захвате нейтрона «исходным», всегда равна энергии связи нейтрона в этом «новом» ядре. Это — хорошо известная нам величина E_{cb}/A . Из **рис. 2.2** хорошо видно, что для всех тяжёлых ядер (в том числе и золота, и свинца, и урана) она довольно близка — около 6 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 тяжёлого 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 6 МэВ) и высотой 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 тяжёлых ядер в довольно широком интервале масс, в общем, близки, то энергетическая высота барьера деления зависит от массы тяжёлого ядра очень сильно. Например, для золота-198 (других стабильных изотопов моноизотопное золото не имеет) она превышает 15 МэВ (против 6 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.

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 — тяжёлые 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, детали, в которых, как известно, кроется дьявол. 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 — чётные) останутся без изменений — ведь они соответствуют числу протонов. А вот количества нейтронов N (и, соответственно, массовые числа A) увеличатся на единицу. Таким образом, мы получаем возбуждённые 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 трёх природных актинидов лишь уран-235 образует при захвате нейтрона так называемое «чётно-чётное» возбуждённое ядро, в котором количества и протонов, и нейтронов — чётные числа.



А для таких тяжёлых ядер, во-первых, энергетическая высота барьера деления (глубина «ямки» для саночника; нам надо, чтобы она была поменьше) всегда несколько ниже, чем у «соседних» ядер. Ненамного — 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, несравнимую ни с каким другим веществом роль. Его в природе сравнительно 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 на языке энергетиков-ядерщиков 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 очень многое годны. Вот тут нам и придётся вспомнить всё, что мы говорили в главе 1 о «промежуточных энергоносителях».

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 увидим.

Но теперь посмотрим, что он есть с позиции ядерщика. Прежде всего он является мощнейшим источником нейтронов. Откуда они берутся — нам тоже будет скоро понятно, а здесь 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 урана-238 и тория-232 можно получить, соответственно, плутоний-239 и уран-233.

И вот тут — самое главное. Как нетрудно видеть, эти тяжёлые ядра при захвате нейтронов также образуют «заветные» чётно-чётные возбуждённые 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 его делимости, из-за огромной величины $T_{1/2}$ — ровесник Земли, он есть в природе. А вот радионуклиды с $T_{1/2}$ 24 100 лет (плутоний-239) и $1,6 \times 10^5$ лет (уран-233) даже если, в силу каких-то космологических процессов, и возникли одновременно с нашей планетой, сейчас полностью распались.

Но что, если нам, с помощью реакторных технологий, удастся искусственно получить и накопить значительные количества плутония-239 (из урана-238) и/или урана-233 (из тория-232)? Ведь их $T_{1/2}$ малы лишь при сопоставлении с возрастом Земли, но, в сравнении с характерными технологическими временами развития общества (соответственно и энергетики), они громадны! Классический пример промежуточного энергоносителя — вещества или субстанции, которых в природе в естественном состоянии, как мы уже знаем, нет, но которые искусственно могут быть получены в любых технически разумных количествах!

Тогда плутоний-239 и уран-233 тоже можно использовать в качестве ядерного топлива — они становятся полноценными ядерными материалами. Их принято называть «вторичными», потому что для того, чтобы запустить реакторы в начале наработки этих материалов, всё же нужен уран-235 в составе «первичного» уранового топлива. А уж дальше мы можем переводить атомную энергетику на «вторичное» топливо с плутонием-239 и ураном-233.

И это будет революцией в энергетике — и не только атомной. Ведь, используя плутоний-239 как основу ядерного топлива в энергетических ядерных реакторах на быстрых нейтронах (о них далее, в главе 2), мы сможем, облучая в них уран-238 и в дальнейшем перерабатывая облучённый уран с использованием методов промышленной радиохимии, 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 — представим 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 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, отечественные технологии и атомная индустрия обладают в этой области общепризнанным мировым приоритетом. Во всём мире лишь в нашей стране, на Белоярской АЭС, эксплуатируются два энергетических реактора на быстрых нейтронах промышленной мощности — БН-600 и БН-800.

Подробно такие реакторы в этой книге не рассматриваются — хотя о некоторых работах российских атомщиков в этом направлении далее упоминается. Здесь же

дополнительно отметим, что они обладают очень высоким уровнем эксплуатационной безопасности. Например, аварии, типа произошедшей в 2011 году на АЭС «Фукусима-1», на них невозможны из-за высоких температур кипения жидкотеплоносителя.

Но вот когда всё же такие реакторы по-настоящему 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.

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 вовсю действуют силы электростатического (кулоновского) отталкивания. Это и понятно — ядра-осколки представляют собой многозарядные положительные ионы (ядра, лишённые 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 тяжёлого ядра с массовым числом около 240 возросла примерно на 0,8 МэВ. Следовательно, при делении ядра всего освободилось $120 \times 2 \times 0,8 \text{ МэВ} = 200 \text{ МэВ}$! Ничего себе, если вспомнить, что при окислении атома углерода до углекислого газа в главной химической реакции



Рисунок 2.3. Схема цепной реакции деления урана-235 нейтронами

«огневой энергетики» выделяется всего-навсего около 4 эВ! При делении — в пересчёте на одну реакцию в полмиллиона раз больше.

Вот почему отличительной особенностью ядерного топлива является его чрезвычайно высокая энергоёмкость. 1 кг топливного урана для основного отечественного энергетического реактора ВВЭР-1000 при полном делении всех ядер урана-235 в нём по энергетическому эквиваленту соответствует 100 тоннам высококачественного угля или 60 тоннам нефти (рис. 2.4).

А теперь ещё 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 разлёта (200 МэВ на каждое деление) они теряют в самом топливе, обеспечивая его сильный разогрев. Его остаётся только снять и полезно использовать. Об этом разговор ещё впереди, но этим роль осколков деления не ограничивается.

Раньше уже упоминалось, что обязательным условием использования чего-то 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.

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

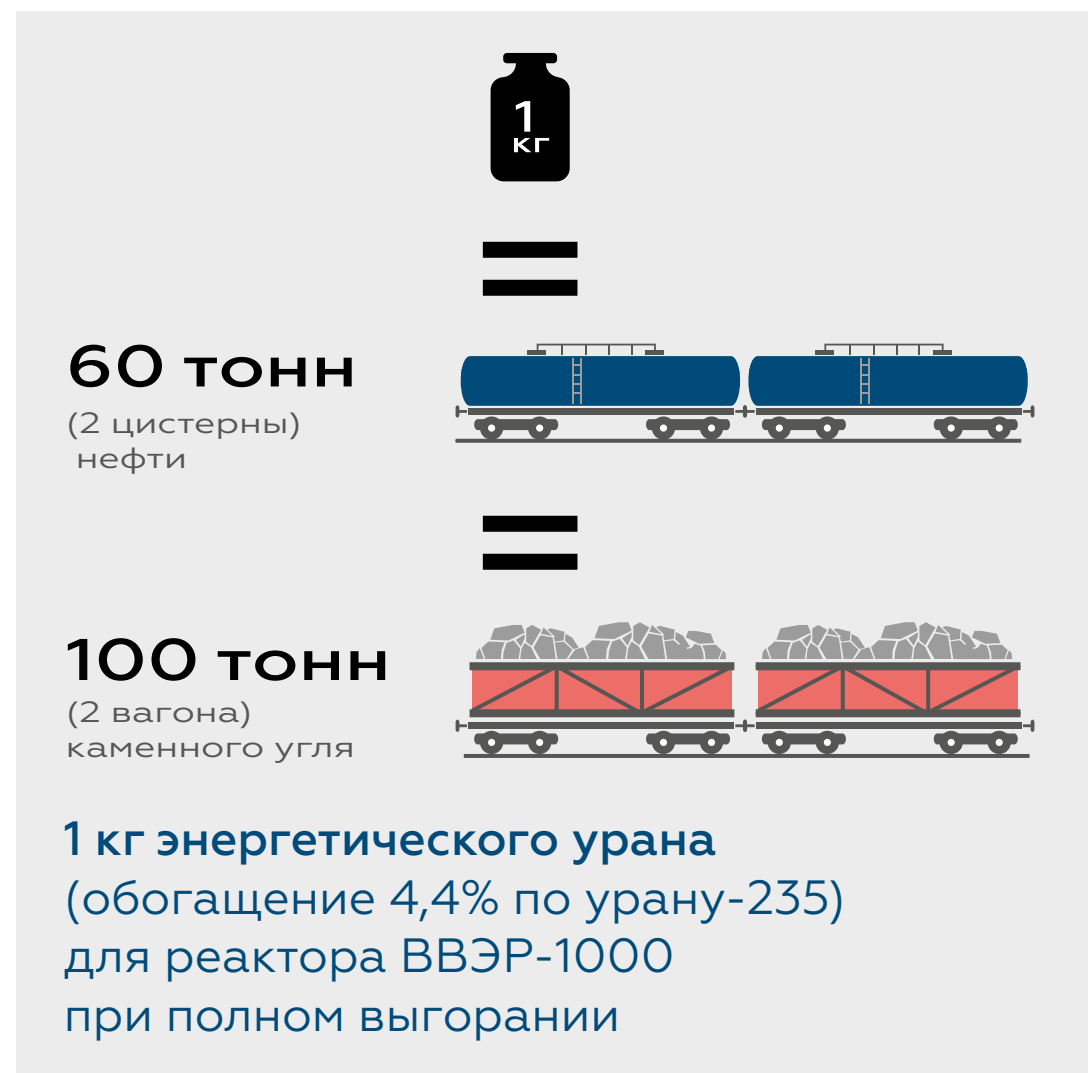


Рисунок 2.4. Эффективность ядерного топлива

Конечно, делиться далее они не будут — слишком мала масса осколков, вспомним **рис. 2.2**. Но этой энергии возбуждения хватает, чтобы каждый осколок испустил 2–3 новых нейтрона! В среднем на 10 делений ядер урана-235 испускается 24 таких нейтрона (**рис. 2.4**).

Отсюда — сразу две замечательных возможности. Во-первых, эти новые (вторичные) нейтроны можно использовать для деления других ядер урана-235. Нетрудно понять, что перед нами открывается возможность реализации самоподдерживающегося процесса, называемого цепной реакцией деления. И, во-вторых, научившись регулировать количество этих нейтронов, этим процессом можно управлять, добиваясь 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 тяжёлые поражения. Чтобы избежать этого, требуется обеспечить гарантированное отсутствие их попадания во внешнюю среду. Это — важнейшее требование безопасности ядерных технологий, которое выполняется строжайшим образом (о чём далее).

Ядерный реактор и атомная электростанция

А теперь посмотрим, как организована техническая реализация получения ядерной энергии. Мы переходим к краткому описанию энергетического ядерного реактора — ядерного энергоблока (ЯЭБ) и АЭС, «сердцем» которой он является.

Существует огромное множество типов и конструкций ядерных реакторов. Но при всём этом разнообразии

подавляющее большинство ЯЭБ, действующих на современных АЭС, имеет много общих функциональных по своему назначению систем и устройств. Их рассмотрением мы и ограничимся.

Количество ЯЭБ на современных АЭС бывает различным — от 1 до 8. Все они 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 — тяжёлая вода или углекислый газ.

В ЯЭБ на быстрых нейтронах теплоносителями являются расплавы металлов (натрий, свинец). Из главы 1 мы уже знаем, что для атомной энергетики они очень перспективны — ведь именно с их помощью, используя процесс наработки плутония-239 из урана-238, её топливный ресурс можно увеличить до тысяч лет! Но их пока слишком мало — из находящихся в мире, по состоянию на май 2022 года, в режиме генерации 441 ЯЭБ реакторы на быстрых нейтронах, обеспечивающие единичную электрическую мощность ЯЭБ свыше 50 МВт, установлены всего лишь на одной АЭС (БН-600 и БН-800, оба — на Белоярской АЭС в России).

Современные ЯЭБ имеют типовые аббревиатурные обозначения, обычно отражающие физико-технические особенности их принципа действия и конструкции. Например, большинство российских ЯЭБ принадлежат к линейке ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор). Мощность единичных ЯЭБ типа ВВЭР с годами возрастала, их наиболее современные модификации — ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ, а ранее массово строились ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Упомянутые выше ЯЭБ на Белоярской АЭС имеют аббревиатуру БН (быстрый натриевый, по типу теплоносителя). Цифра вслед за аббревиатурами обычно означает электрическую мощность энергоблока.



Рисунок 2.5. Топливные таблетки энергетического ядерного реактора



Рисунок 2.6. Тепловыделяющие сборки различных энергетических ядерных реакторов

подавляющее большинство современных ЯЭБ использует в качестве ядерного топлива спечённую двуокись урана в виде так называемых топливных таблеток (рис. 2.5). Ими снаряжаются длинные узкие трубки, называемые тепловыделяющими элементами (ТВЭЛы). ТВЭЛы объединяются в жёсткие 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.

В конструкциях почти всех современных ЯЭБ приходится также учитывать 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 её надо уменьшать в ходе последовательных столкновений нейтронов с ядрами специального вещества, находящегося в активной зоне, — замедлителя. Для эффективного замедления нейтронов необходимы лёгкие 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 вещества: обыкновенная вода, тяжёлая вода (в молекуле которой лёгкий водород замещен дейтерием) и графит (химически чистый углерод).

Чаще всего применяется обыкновенная вода. Она — хороший замедлитель, у неё прекрасные теплофизические свойства (что существенно, поскольку в таких реакторах она же используется и как теплоноситель), и она гораздо дешевле тяжёлой воды и графита. Это очень важно — ведь мировой атомной энергетике нужны сотни тысяч тонн замедляющих веществ. У неё, однако, есть и недостаток — она довольно сильно поглощает нейтроны. Поэтому, чтобы запустить цепной процесс деления на таких реакторах (их часто называют «водо-водяными», поскольку 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.

Наш рассказ о ядерном реакторе был бы неполным, если не вспомнить о том, что это — управляемая машина, а физической основой управления им, как мы уже знаем,

является регулирование нейтронных потоков в активной зоне. Для этого предусмотрены устройства для дистанционного введения туда материалов и веществ, эффективно поглощающих нейтроны цепной ядерной реакции деления и тем самым определяющих уровень мощности реактора. Помимо управления реактором в штатном режиме работы, важнейшим назначением этих систем является обеспечение возможности его быстрого заглушения, что необходимо для предотвращения аварийных ситуаций. Их техническая совокупность так и называется — система управления и защиты (СУЗ).

Основным действующим материалом в СУЗ современных энергетических ядерных реакторов является бор. Один из его природных изотопов (^{10}B , 19,8% в естественной смеси) очень интенсивно поглощает нейтроны, и поэтому бор при использовании в СУЗ весьма эффективен; к тому же он технологичен и относительно недорог.

В СУЗ двухконтурных энергетических реакторов с водой под давлением, составляющим основу отечественной и мировой ядерной энергетики (подробнее об этом далее), бор применяется в двух «ипостасях». Для «плавного» изменения мощности аппарата и ещё в некоторых режимах его работы он, в виде борной кислоты определённой концентрации, вводится в водный теплоноситель первого контура реактора, находящийся в прямом контакте с активной зоной. Для «быстрого» же изменения мощности реактора (включая и предотвращение аварийных ситуаций) используются так называемые регулирующие стержни — твёрдые цилиндрические конструкции на основе карбида бора (B_4C), механически вводимые непосредственно в активную зону.

Все СУЗ современных энергетических реакторов — это высокотехнологичные автоматизированные комплексы, оснащённые системами многократного информационного и операционного дублирования. А действия персонала АЭС, людей, стоящих «у пульта», жёстко регламентированы служебными положениями и инструкциями, имеющими стро-

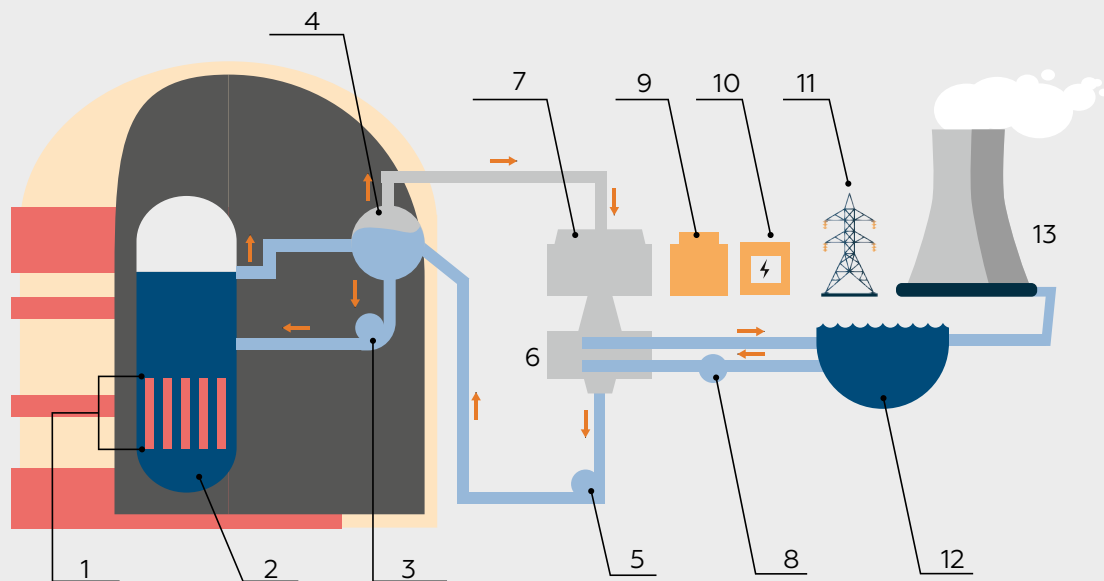
го обязательный характер. Какие-либо импровизации здесь совершенно недопустимы — ведь речь идёт о безопасности эксплуатации крупнейшего промышленного объекта с потенциально высокими уровнями техногенных рисков. Именно поэтому неотъемлемым элементом деятельности АЭС во всём мире (конечно же, и в нашей стране) являются тренировки и учебные тревоги персонала, в ходе которых разыгрываются ситуационные сценарии нештатных и аварийных происшествий. Здесь надеяться на авось нельзя.

Ядерный энергоблок: что там внутри?

Как работает энергетический ядерный реактор, мы теперь знаем. А теперь, глядя на рисунок, 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 её основой являются именно водо-водяные реакторы (368 из 441 действующих в мире ЯЭБ и значительная часть строящихся). А среди водо-водяных реакторов тоже есть ярко выраженная преимущественная конструкция — двухконтурные реакторы с водой под давлением (307 из 368). К этому же типу ЯЭБ в России принадлежат 22 из 37 эксплуатируемых и все без исключения строящиеся сейчас (5). Поэтому именно на примере ВВЭР мы будем далее знакомиться с реактором как с инженерно-физическим устройством.

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. Активная зона | 7. Паровая турбина |
| 2. Корпус реактора | 8. Циркуляционный насос |
| 3. Главный циркуляционный насос | 9. Электрогенератор |
| 4. Парогенератор | 10. Трансформатор |
| 5. Питательный насос | 11. Линия электропередач |
| 6. Конденсатор | 12. Пруд-охладитель |
| | 13. Градирни |



Конструктивная схема АЭС с ЯЭБ типа ВВЭР

Его основой является бак из специальной стали, внутри которого находится активная зона (**рис. 2.7**). Бак заполнен замедлителем — водой.

Вода, поступающая в корпус снизу, проходит через активную зону (теперь вода уже работает и как теплоноситель) и выходит из верхней части бака. Температура поступающей воды — 298 °С, выходящей — 329 °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 является высокопрочной (толщина стенки бака — в среднем более 20 см).



Рисунок 2.7. Корпус реактора ВВЭР со снятой верхней крышкой бака



Рисунок 2.8. Градирни (Нововоронежская АЭС)

Вышедшая из бака вода поступает в особые устройства — парогенераторы. Как и бак реактора, это довольно объёмные и массивные конструкции (вес одного парогенератора реактора ВВЭР-1200 — около 640 тонн). В парогенераторах нагретая вода первого контура передаёт тепловую энергию воде второго контура. Давление в нём 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 часто называют блоком конденсации. Там он отдаёт остатки тепла так называемому внешнему контуру.

Этот блок в режиме циркуляции обеспечивает сброс оставшегося тепла либо в водоём, называемый прудом-отстойником, либо на вход градирни — высокой башни специальной конструкции (рис. 2.8), работающей на принципе охлаждения диспергированной горячей воды встречным потоком воздуха.

Чрезвычайно важным является то обстоятельство, 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 будет рассказано 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.

Впрочем, радиоактивность внешней среды в современной атомной энергетике тем не менее всегда очень жёстко контролируется — и не только на самих АЭС в ходе всего производственного цикла, но и в регионах, где они расположены, да и по стране в целом. О некоторых количественных параметрах, характеризующих радиационные риски на АЭС, речь пойдёт ниже, в главе 3. А здесь лишь кратко упомянем об национальной системе этого контроля.

Её основой является ЕГАСМРО — Единая государственная автоматизированная система мониторинга радиационной обстановки. Её структура, полномочия и алгоритмы принятия решений определены Постановлением Правительства России, она подведомственна Росгидромету и Министерству природных ресурсов и экологии России. Одной из ключевых составляющих её информационного контура является внутриведомственная автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО) Госкорпорации «Росатом», объединяющая в единую структуру службы радиационных

измерений и экологического мониторинга на всех АЭС и важнейших предприятиях атомной отрасли страны.

Заканчивая наш разговор о технических составляющих атомной энергетики, заметим, что 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. Это — разработка и непрерывное совершенствование нормативной и технической документации по безопасному и эффективному использованию атомной энергии. И ещё очень многое другое.

В этом комплексе заняты сотни тысяч высококвалифицированных людей — цвет отечественной научной, технической и рабочей интеллигенции. При этом характерной чертой атомной отрасли является высочайший уровень технологической, производственной и исполнительской дисциплины. Это обеспечивает ей не только ведущее положение в мировой ядерной энергетике, но и один из самых низких уровней несчастных случаев и производственного травматизма во всей стране.

А ведь были и природные ядерные реакторы...

Мимо этой темы пройти я не мог. Если судить по вопросам, которые задавались мне на мероприятиях ИЦАЭ, на лекциях в НИЯУ МИФИ, на других встречах со школьниками и молодёжью, огромный интерес среди них вызывают атомные «преданья старины глубокой». Например, о ядерной войне в Индии за пять тысяч лет до нашей эры или о природных

ядерных реакторах, работавших миллиарды лет назад. Почему — трудно сказать, но было именно так.

Ну, с ядерной войной в Индии всё более или менее понятно: речь идёт лишь о достаточно вольной интерпретации каких-то древних преданий, легенд или эпосов — в рамках желательной для автора версии. А в эти рамки, с учётом масштаба фантазии и наших предков, и наших современников, при желании можно втиснуть очень многое. Например, боевые характеристики Змея Горыныча или эффективность применения акустического оружия Соловьём-Разбойником... Но вот только обсуждать тут нечего.

А вот с природными ядерными реакторами вопрос обстоит совершенно иначе, хотя удивительных версий и легенд хватает и здесь. Но — по порядку.

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 происхождения 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 ещё очень мало. Сейчас же для нас важно другое: при такой концентрации урана-235 цепная реакция его 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

перенесёмся в эпоху совсем ещё «юной» Земли, на 1,8–2 миллиарда лет назад! Несложный расчёт 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 нём должно быть не 0,71%, а меньше. Понятно почему: часть урана-235 в этом случае должна была «выгореть» ещё в те далёкие времена, и немолимый 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 60 лет назад, вместе с требованиями к физическим и геологическим условиям, необходимым для протекания цепной реакции ядерного деления в естественной среде. Но лишь 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 её 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, её наличие в контакте с ураном создаёт 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 её интенсивному выпариванию из породы при её 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 её 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 её компактном залегании должно было быть довольно много по массе и объёму, чтобы как можно больше вторичных нейтронов «делали своё 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 «в циклическом режиме»: цепная реакция деления протекала в нём приблизительно в течение получа-

са, до нагрева породы на сотни градусов и выкипания воды в ней. Дальше он самостоятельно «заглушался», и следующие два с половиной часа уходило на охлаждение породы и её заполнение новой порцией воды. И всё повторялось — вновь и вновь, на протяжении примерно полумиллиарда лет, при этом выгорело около 5 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 своё дело: однажды реактор остановился, чтобы не запускаться 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: всё-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 её недрах, произошедшие за миллиарды лет её 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».



Атомная энергетика России: сегодня и завтра

Но вернёмся в наши дни. И согласимся с тем, что рассказ об атомной энергетике будет неполным без упоминания о том, что она сейчас представляет из себя в России и каково её вероятное будущее в нашей стране. Тем более что на этот счёт существует немало пересудов и домыслов.

По состоянию на май 2022 года российская атомная энергетика — это 11 АЭС, из них 10 «стационарных» (Кольская, Ленинградская, Калининская, Смоленская, Нововоронежская, Курская, Балаковская, Ростовская (с 2001 до 2010 года — Волгодонская), Белоярская, Билибинская) и одна «мобильная» (ПАТЭС «Академик Ломоносов», г. Певек). К сетям подключены 37 действующих ЯЭБ. Из них 35 — стационарные (22 ВВЭР разных модификаций, восемь РБМК-1000, три ЭГП-6 на Билибинской АЭС, две БН на Белоярской АЭС) и две — мобильные (две КЛТ-40С на ПАТЭС «Академик Ломоносов»). Их общая установленная мощность — более 29,5 ГВт.

Доля ядерной генерации в целом по России в 2021 году составляла 20,6%, при этом в европейской части — существенно выше (около 30%), а на северо-западе страны достигала 37%. Эксплуатирующей организацией всех АЭС России является АО «Концерн Росэнергоатом», входящий в контур Госкорпорации «Росатом». При этом все АЭС имеют статус его филиалов.

А теперь — о развитии. И прежде всего давайте договоримся, что мы имеем под этим в виду.

Вернёмся к началу нашей книги, к графику на **рис. 1.2**, и «наложим» на него современную величину удельного годового энергопотребления в нашей стране (около 7,6 МВт × час/чел. в год). Вывод очевиден: вынужденной необходимости в немедленном повышении общего объёма генерации в России нет, от «критической» области графика (5–6 МВт × час/чел. в год) мы, к счастью, далеки. Что позволяет нам вкладывать в понятие «развитие» не только сооружение новых ЯЭБ как таковых, а и нечто иное. Что именно?

Начнём с того, что на разных стадиях сооружения и целевого проектирования к началу 2021 года (без учёта законсервированных площадок, опытных комплексов и зарубежной деятельности) находятся пять ЯЭБ современных проектов ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ поколения 3+ на площадках Курской АЭС-2 (два новых ЯЭБ, № 1 и № 2), Смоленской АЭС (два, № 1 и № 2) и Ленинградской АЭС (один, № 7). Приняты

также принципиальные решения по дополнительному сооружению в ближайшее время ещё нескольких ЯЭБ таких же проектов на указанных площадках.

Обратим теперь внимание: все перечисленные мощные (гигаваттного класса) новые современные ЯЭБ «привязаны» к площадкам ныне действующих АЭС — Курской, Ленинградской и Смоленской. Это происходит в так называемом «режиме энергозамещения» — новые ЯЭБ приходят на смену выводимым из эксплуатации ЯЭБ сравнимой мощности. А таковыми на указанных АЭС являются ЯЭБ типа РБМК-1000, в значительной мере устаревшие. На Курской АЭС их четыре, на Ленинградской — четыре, на Смоленской — три (включая выведенные из режима генерации).

Что этим достигается? Во-первых, при таком подходе не надо создавать «с нуля» совершенно новых площадок для АЭС — с их экономическим, социальным и природоохранным обоснованием, масштабным капитальным строительством, инфраструктурой, логистикой, сетевым и коммуникационным обеспечением, вновь создаваемым кадровым потенциалом и очень многим другим. Конечно, достаточно большие объёмы работ (соответственно, и затрата сил) неизбежны и при сооружении новых ЯЭБ на площадках «по соседству» с действующими, но и времени, и средств на это, при примерном сохранении объёма генерации, требуется всё же гораздо меньше. А необходимости в резком повышении этого объёма, как мы видели, сейчас нет.

Во-вторых, надо отчётливо понимать смысл понятия «устаревание». Вечных устройств и машин в мире не было и не будет, и было бы странно, если бы мы, например, на железных дорогах продолжали бы использовать паровозы прошлого века. Они честно послужили стране и людям, но их время ушло.

ЯЭБ — не исключение. А для инженера уровень их устаревания определяется совокупностью очень многих параметров. Вот лишь некоторые из них — в кратком, конспективном изложении.

Главное — уровень эксплуатационной безопасности. Мы не имеем права забывать о главном, непреложном принципе развития атомной энергетики — «безопасность прежде всего». В настоящее время существуют количественные методы оценки этого уровня, и для вновь сооружаемых ЯЭБ поколения 3+ вероятность тяжёлой аварии с разрушением активной зоны уменьшена, по сравнению с РБМК-1000, примерно в 10^4 раз! По порядку величины она сравнима, например, с вероятностью быть убитым прямым попаданием метеорита в голову при пребывании на улице в течение нескольких часов. Конечно, в точности нулю она не равна — нулевым уровнем риска обладают лишь несуществующие технологии, но ходим же мы на работу и учёбу, не очень задумываясь о метеоритах... Впрочем, разговор о современных технологических рисках у нас ещё впереди.

Далее, новые ЯЭБ позволяют сделать большой шаг вперёд на пути преодоления одного из наиболее значимых недостатков атомной энергетики наших дней — относительно низкого коэффициента полезного действия (КПД). Тут ей похвастаться нечем: сейчас он для неё по миру в среднем около трети, 32–34%, для некоторых типов ЯЭБ — и ниже. Для сравнения: для современной угольной генерации среднемировое значение КПД — около 45%, для газовой в комбинированном (парогазовом) цикле — вблизи 60%.

Для масштабной энерготехнологии, основанной на использовании ископаемого первичного ресурса, ситуация, при которой «в дело» идёт треть изначально полученной энергии, а остальные 2/3 просто греют окружающую среду (через пруд-охладитель, через градирню или как-то ещё), — очевидный анахронизм. Тут поневоле снова вспоминается паровоз с его 10-процентным КПД. И дело здесь не только в ресурсных сырьевых ограничениях — для мировой атомной энергетики они сейчас не так значимы. Но, говоря о её претензиях на роль «безуглеродной» промышленной энерготехнологии наших дней (на что, как мы видели, у неё есть все основания), нельзя забывать о серьёзной экологической

угрозе, контуры которой сейчас лишь начинают проступать. Это — «прямой перегрев» экосферы при сбросе в неё «ненужного» техногенного тепла, о потенциальной опасности чего при развитии глобальной энергетики почти полвека назад предупреждал, в частности, советский учёный, математик и эколог академик Н. Н. Моисеев.

Конечно, у низкого КПД энергоустановок есть и уйма других отрицательных аспектов (и технических, и экономических, и экологических), но важен итог: всемерное его повышение является актуальнейшей задачей атомной энергетики в целом. Здесь важна любая победа — пусть, на первый взгляд, и небольшая. А теперь сравним КПД «замещающих» ВВЭР-1200 (около 38%) и «замещаемых» РБМК-1000 (примерно 30%). Разница налицо, и это — очень значимое обстоятельство.

В-третьих, нельзя забывать и о немедленных технических и экономических преимуществах, которые даёт использование новых ЯЭБ в режиме энергозамещения. Установленная мощность ВВЭР-1200 на 25% выше, чем у РБМК-1000, что, в условиях стабилизации спроса на энергию, развития энергосберегающих технологий и повышения КПД, позволяет, в принципе, обойтись их меньшим количеством. Численность ключевого персонала на каждом из них, по сравнению с РБМК-1000, ниже на 30–40%, проектный срок эксплуатации — примерно вдвое выше (60 лет, с возможностью продления ещё на 20).

И, с учётом сказанного, не следует также забывать: для современной энергетики избыточность объёмов генерации ничуть не лучше, а чаще — хуже их недостаточности. Вспомним, о чём мы говорили в главе 1 этой книги: хранить электроэнергию «про запас», как консервы, в сколько-нибудь значимых количествах человечество пока не научилось (да и научится ли?), поэтому здесь необходим строгий баланс её производства и потребления. Так что стратегия ядерно-энергетического замещения, реализуемая в нашей стране, вполне обоснованна и с этой точки зрения.

Надо сделать, однако, важное замечание: наличие на АЭС «замещаемых» ЯЭБ само по себе никак не связано с уровнем профессиональной подготовки и качества работы её персонала. Та же Смоленская АЭС, с её тремя «замещаемыми» ЯЭБ РБМК-1000, в течение многих лет неизменно входит в число лидеров «Концерна Росэнергоатом» по большинству показателей, характеризующих её производственную, экономическую, экологическую и социальную деятельность. И необходимо в процессе «атомного энергозамещения» не утратить накопленный на российских АЭС неоценимый кадровый потенциал.

Конечно, энергозамещение — далеко не единственное направление развития атомной энергетики. Это — задача, в общем, сегодняшнего дня. Отечественная атомная отрасль, претендующая (и с полным на то основанием) на роль «технологического локомотива» современной России, должна видеть, формулировать и решать также и задачи дня завтрашнего. Их много — вот лишь некоторые из них.

Будут продолжены и расширены опытно-конструкторские и проектные работы в области реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (о которых выше уже говорилось), а также промышленное освоение их ядерно-топливных циклов. На площадке Сибирского химкомбината (г. Северск, Томская обл.), в рамках одного из важнейших для Госкорпорации «Росатом» научно-технологического проекта «Прорыв», уже сооружается первый в мире опытный ЯЭБ такого типа БРЕСТ-ОД-300 с охлаждением жидким свинцом. Разрабатываются проекты и значительно более мощных ЯЭБ с реакторами на быстрых нейтронах — «натриевого» БН-1200 и «свинцового» БР-1200. Этим начинается практическая реализация концепции «двухкомпонентной атомной энергетики» России. Она предусматривает, в соответствии с директивными документами высокого уровня, сооружение и совместную эксплуатацию ЯЭБ как на тепловых, так и на быстрых нейтронах — в оптимальном сочетании.

Не забыты и актуальные проблемы «ядерного развития» российского Севера. Прежде всего это касается промышленного освоения богатейшего Баимского рудного месторождения на Чукотке, которое к 2028 году должно стать основой нового горно-обогатительного комбината с рекордной проектной мощностью (250 тыс. меди и 400 тыс. унций золота в год) и новым центром экономического и социального развития региона. Для его энергообеспечения планируется создание четырёх оптимизированных плавучих ядерных энергоблоков электрической мощностью по 55 МВт. Они будут оборудованы новыми модульными двухконтурными реакторами малой мощности «Ритм-200», которые предназначены для установки также и на строящихся атомных ледоколах для работы на Северном морском пути. А два таких же реактора «в наземном исполнении» станут основой первой в мире АСММ (атомной станции малой мощности), которая будет сооружена в Усть-Янском районе Якутии для энергоснабжения предприятий Кючусского золоторудного месторождения. Её общая установленная мощность — 110 МВт, ввод в эксплуатацию запланирован на 2028 год.

Атомная энергетика России уверенно удерживает лидирующие позиции в мире, сохраняя и приумножая накопленные в течение многих лет отечественные научные и технологические достижения и традиции.



Но не надо забывать: её текущее и перспективное развитие находится и должно находиться далее в тесной взаимосвязи с развитием страны в целом. Ей это удавалось и удаётся — так будет и впредь.

Ионизирующие излучения и радиационная безопасность

Chemical reactions:
 ${}^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3{}^1_0n$
 ${}^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{91}_{38}Sr + 2{}^1_0n$

Energy:
 $E_{cb} = \Delta m c^2$

Neutron flux and cross-sections:
 $L_{ф.с.} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \sum_{a \neq s} \sigma_{a \neq s} \cdot \sum_{a \neq s} \nu_{a \neq s}}} = 0,246 \text{ см}$
 $L_{зам} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,0221 \cdot 2,31}} = 2,555 \text{ см}$
 $L_p^2 = L_{зам}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{ф.с.}^2 \cdot \theta = 2,042 \text{ см}^2$

Reactivity and multiplication factor:
 $\rho = \frac{\Delta k_{эф}}{k_{эф}} = \frac{k_{эф} - 1}{k_{эф}}$
 $k_{эф} = \frac{1}{1 + \beta \cdot \frac{\lambda}{\lambda - \omega}}$
 $\rho = 1,763 \cdot \exp(-1,144 \cdot 10^{-3} \cdot 101,260) = 1,709$

Graphs:
 - Graph 1: Cross-sections vs. neutron energy (eV) for ${}^{235}U$ and ${}^{239}Pu$. Shows σ_f and σ_{tr} curves.
 - Graph 2: Reactivity (rho) vs. multiplication factor (k) showing the asymptotic region.

Other calculations:
 $\tau = [\lambda - (\beta - \rho)] \tau_{eff} + (\beta - \rho) \tau_{eff} \approx (\beta - \rho) \tau_{eff}$
 $\tau = 0,056 \cdot 1,154 \cdot 5,370 \cdot 10^{12} = 1,207 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$
 $V_{a.s.} = \frac{N}{N_0} \cdot \tau = \frac{175 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{85 \cdot 10^{-3}} = 2,471 \cdot 10^6 \text{ см}^3$

Радиация как атрибут дьявола

Если бы, говоря об атомной энергетике, мы могли обсуждать её лишь как собственно энерготехнологию! Если бы...

Вообще говоря, обсуждение, и в обществе, и в профессиональных кругах, энерготехнологий, анализ их достоинств и недостатков, проблем адаптации в энергосистемы различных уровней, экологических и социальных особенностей использования и совершенствования (то, чем мы занимались в главе 1) — вещи совершенно необходимые. При этом вовсе не исключаются, а, напротив, предполагаются споры и дискуссии — не исключено, что и острые. Всё это — нормальная логика технологического и общественного развития.

Но есть здесь важное обстоятельство. Именно, участники этих обсуждений и дискуссий непременно должны владеть их предметом — и не на уровне массового восприятия, интуитивных преставлений, господствующих мнений и фейковых информационных вбросов, а по существу, с использованием профессиональных знаний, общепринятой терминологии, достоверной, а не почерпнутой в «агентстве ОБС (одна баба сказала)» информации и единой методологической базы. Здесь абсолютно неуместна «движуха» — некомпетентная бездумность, погоня за громкими дилетантскими лозунгами или общественной модой, а тем более горячее желание, оседлав малограмотные протестные акции, сварить себе персональный «политический супчик». Но, к сожалению, какая-то поистине фантастическая доверчивость

к «фейковым» новостям, слухам и сплетням становится, кажется, политическим и информационным лицом современного общества.

Именно в этом смысле ядерным технологиям, в том числе и атомной энергетике, особенно «не повезло». Потому что применительно к ним в ходе упомянутых обсуждений и дискуссий моментально звучит слово, ставшее не только одним из главных ужастиков нашей эпохи, но и, вероятно, чемпионом по неадекватности массового восприятия. Это слово — радиация.

К причинам, вызывающим буквально панический страх перед радиацией на самых различных этажах современного общества (а иногда и самую настоящую болезнь психики, называемую радиофобией), мы ещё вернёмся. Но здесь же попытаемся сначала понять — а что же она, радиация, собственно, такое?

Вопрос вовсе не так наивен, как может показаться.

На одной из встреч с молодёжью, организованной Информационным центром по атомной энергии (ИЦАЭ), автору из аудитории был задан вопрос: «Передаётся ли радиация по наследству?», а на другой — не менее экзотический: «Зачем нам свалки радиации?» Кстати, такие встречи в ИЦАЭ — всего их в разных городах России 19 — всегда проходят очень живо и интересно, автор рекомендует их по возможности посещать.

Но теперь — о 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 идёт 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 чёрного кота из средневековых примет: чёрный кот не пото-

му страшен, что чёрный, и не потому, что кот, а потому, что дьявола сопровождает.

Поэтому начнём, как мы всегда поступали в этой книге, с основных определений и базовых понятий.

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.

Понятно, что 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 учётом этого энергетического порога ионизирующими являются большинство излучений, сопровождающих радиоактивный распад и ядерные реакции, а также жёсткое рентгеновское излучение.

А вот радиоволны всех диапазонов и свет в оптическом интервале длин волн к ИИ не относятся. Я недавно пережил несколько весёлых 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 персональную 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 «небезудачный» 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 как таковое чем-то ужасным вовсе не является. Оно происходит и при протекании биологических процессов, обусловленных генетикой нашего организма, и под воздействием факторов внешней среды, к которому наш организм, в ходе многих веков эволюции человека на Земле, успешно адаптировался. К слову говоря, 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. Всё 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 приходилось 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 «ставятся на уши» — прошу в этом поверить мне на слово.

Но мы немного забежали вперед. А сейчас — самое время обсудить, какие виды ИИ значимы при рассмотрении вопросов радиационной безопасности в практическом смысле. Это:

- **протоны** — ядра лёгкого изотопа водорода, тяжёлые элементарные частицы с единичным положительным электрическим зарядом. Главный их источник — космическое излучение, в технике — ускорители. При распаде радионуклидов протоны не образуются;
- **нейтроны** — тяжёлые 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-частицы** (α-частицы) — ионизированные ядра гелия-4. Главный их источник — радиоактивный распад тяжёлых элементов, как естественного, так и техногенного происхождения (в том числе тория, урана, плутония);
- **электроны** — лёгкие заряженные частицы с единичным электрическим зарядом. Они образуются как при

радиоактивном распаде (тогда они называются бета-частицами (β -частицами), так и при работе электрофизических установок (электронные ускорители);

- **рентгеновское и гамма-излучение (γ -излучение)** — 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 слоёв вещества. Поэтому они полностью задерживаются, например, листом бумаги, сантиметровым слоем воздуха или наружным (эпителиальным) 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 чём далее.

В окружающей жизни сталкиваться с реакторами и ускорителями нам вряд ли придётся. 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. Главным его источником является наше Солнце и некоторые процессы, связанные со 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%. Всё остальное обусловлено ИИ различных радионуклидов.

Радионуклиды и их основные характеристики

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 среднем, 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 ещё более «крупные».

До сих пор часто применяется также старая внесистемная единица активности — кюри (Ки). 1 Ки = $3,7 \times 10^{10}$ 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} |

Продолжение таблицы

| Объект | Активность, Бк |
|--|--------------------------------|
| Радиоактивные вещества и материалы на АЭС | 10^{18} – 5×10^{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.

Продолжим наш разговор об основных характеристиках радионуклидов. Если речь идёт о выделенном (имеющем фиксированное начальное количество) радионуклиде, то его активность, как и количество ядер, уменьшаются 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 всё 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 свои собственные именно ему ядерные излучения в статистически вполне определённом 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 приведённые числа. Так же обстоит дело и со всеми другими радионуклидами. Схема распада и есть совокупность типов, интенсивностей и энергий ядерных излучений, свойственных именно данному 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 напомним, что их огромные периоды полураспада 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, 17 и 20. Среди них наиболее известны два члена ряда урана-238 (радий-226 и полоний-210), а особое место при оценке их 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 извлечённого из неё урана — на это обратили внимание ещё 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 собственную 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 протяжённых источников в реальных средах картина выглядит гораздо сложнее.

Доза — основная характеристика радиационного воздействия

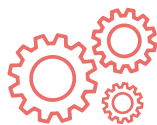
Нас, однако, сейчас интересуют не характеристики радионуклидов и радиационных полей как таковые, а риск возникновения негативных последствий при их воздействии на организм человека. Мерой такого риска является «эффективная доза» (далее — просто «доза»). Её единица в системе СИ — зиверт (Зв). 1 Зв — достаточно 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, отнесённая ко времени её воздействия, называется мощностью дозы. Мощность дозы является важным качественным показателем: чем больше доза и меньше (при равной дозе) время её получения, тем выше вероятность возникновения негативных последствий. 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 идёт о внешнем облучении. В этом случае наибольшую реальную опасность представляют мощные источники нейтронов и γ -излучения. Высокая проникающая способность этих частиц может обусловить тяжёлые лучевые поражения внутренних органов тела.

Внешнее β -излучение представляет серьёзную опасность при нахождении радиоактивного материала непосредственно на поверхности кожи (радиоактивное загрязнение кожных покровов). В этом случае на загрязнённом участке развивается так называемое местное лучевое поражение (МЛП) — лучевая травма, лучевой ожог. На месте лучевой травмы возникает глубокая, труднозаживающая 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 трёх факторов: материала, расстояния, времени. Со временем всё 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. Нейтроны лучше всего поглощаются лёгкими средами (водой, полиэтиленом, парафином), поэтому они и являются в этом случае основой защитных барьеров. Но в конструкцию обычно вводят и внешние металлические экраны для поглощения β - и γ -излучений, возникающих в материале лёгкого 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 «мёртвым» (эпителиальным) слоем кожи — это мы уже знаем. Так что на вопросы о судьбе человека, держащего в руках ящик на **рис. 2.5** (а такие на лекциях в ИЦАЭ мне задавались), я отвечал — 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 глаза и глаза, а главное — неукоснительного соблюдения жёстких норм ядерной и радиационной безопасности. Иначе и до беды недалеко (точнее говоря, совсем близко). 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 всех, 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.

При внутреннем облучении надо учитывать, что многие химические элементы вообще и радионуклиды в частности при попадании в организм распределяются в нём не равномерно, а сосредотачиваются в отдельных органах вследствие предопределённых генетикой биохимических процессов. Общеизвестно, например, что попавший в организм кальций фиксируется в костной ткани, йод — в щитовидной железе и т. п.

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, доставивший столько несчастий при чернобыльской аварии), но и «путает» химически сходные элементы. Например, в костную ткань он осаждает не только необходимый

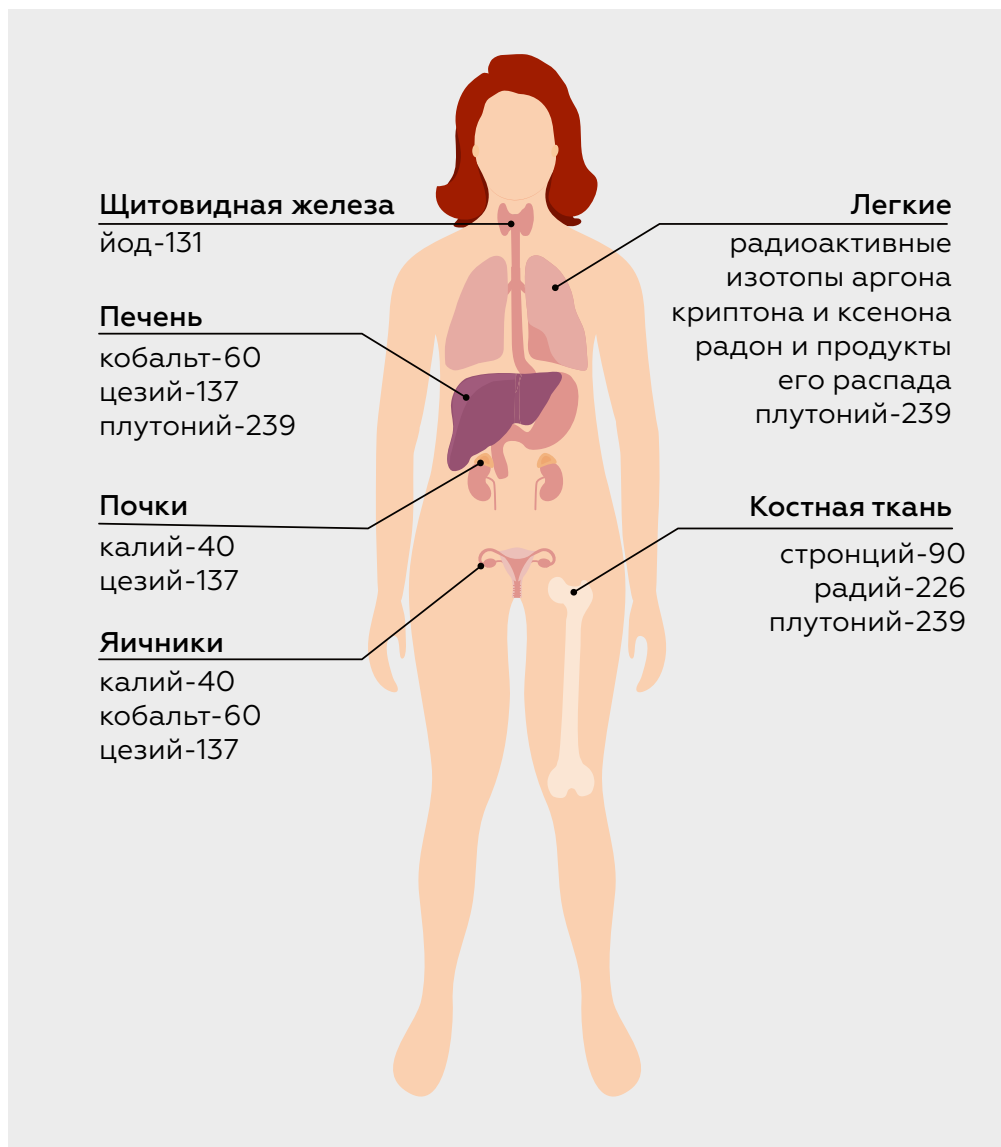


Рисунок 3.1. Критические органы по отдельным радионуклидам: 1 — щитовидная железа (йод-131); 2 — печень (кобальт-60, цезий-137, плутоний-239); 3 — яичники (калий-40, кобальт-60, цезий-137); 4 — лёгкие (радиоактивные изотопы аргона, криптона и ксенона, радон и продукты его распада, плутоний-239); 5 — почки (калий-40, цезий-137); 6 — костная ткань (стронций-90, радий-226, плутоний-239).

для жизни стабильный кальций, но и крайне радиотоксичные радиоактивные изотопы стронция, радия и плутония, что ведёт 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.

Я надеюсь, что мне удалось показать, насколько интересен труд специалиста-радиационщика, сколько разнообразных задач ему приходится решать на каждом шагу, насколько здесь необходимы профессиональные знания и инженерная смекалка. Но, прежде всего, это очень благородный труд — как и любой труд, охраняющий жизнь и здоровье людей.

Радиация в окружающем мире: откуда что берётся?

В этом, последнем, разделе главы 3 я попытался ответить, в форме короткого рассказа, на часто задававшиеся 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 и паника — наихудшие советчики в любых случаях, и решения, ими продиктованные, очень редко бывают верными. И второй: в ситуациях, связанных с потенциальными радиационными (и не только) угрозами и рисками, опираться на мнение профессионалов и здравый смысл, а не на фейки «хайполовов».

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

Во-первых, не раз и не два автору приходилось встречаться при разных обстоятельствах с «антиатомным ужасником» на тему «техногенная доза уже сейчас превышает естественную». Но здесь — что есть что? Поневоле снова приходится вспоминать высказывание Декарта о важности достижения единства в определениях.

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

Согласно одному подходу, под техногенной понимается доза, обусловленная лишь искусственными, изначально в природе не существовавшими, источниками ИИ. Согласно другому, к ним добавляются и естественные источники ИИ, дозобразующее воздействие которых, однако, существенно лишь в условиях целенаправленного ситуационного либо технологического воздействия человека. Пример: космическое излучение как таковое является естественным, но в качестве значимого дозобразующего 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 довольно схоластический спор, напоминающий мне дискуссию между остроконечниками и тупоконечниками о правильности разбивания яйца. Но при очередной встрече с утверждениями типа только что озвученного о нём следует помнить.

Таблица 3.2.

Среднее фоновое радиационное воздействие на человека

| 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 |
| 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 |
| 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-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 всё различие ($0,8 \text{ м}^3\text{в/год}$) между годовыми фоновыми дозами, получаемыми населением Земли в целом и промышленно развитыми странами, обусловлено ядерно-медицинскими процедурами.

В-третьих, очевидно, что роль чисто техногенных источников излучения при формировании фоновой дозы ничтожна: наибольший вклад вносят глобальные выпадения продуктов атмосферных ядерных испытаний (к настоящему времени — $0,5\%$ и $0,63\%$). Причины этих малых различий специалистам хорошо известны, но обсуждать их здесь мы не будем. Замечу лишь, что такие испытания не проводятся нигде на нашей планете уже почти четверть века. А влияния на величину фоновой дозы атомной энергетики и предприятий ядерного топливного цикла и вовсе пренебрежимо малы ($0,04\%$ и $0,03\%$). Это — ответ «зелёным» хайполовам на их вопли о «чудовищном облучении людей во всём мире от атомной энергетики».

К слову, инструментальный радиационный мониторинг, всегда в непрерывном режиме ведущийся вблизи АЭС, нигде не обнаруживает отличий величин регистрируемых доз от их средних фоновых значений, характерных для данного региона в целом. И немудрено — расчётный вклад техногенной компоненты ИИ в годовую дозу и в прилегающих к АЭС регионах не отличается от общемирового (в среднем около $0,04\%$). Экспериментально такой эффект обнаружить, разумеется, нельзя — столь пристально искомые некоторыми «зелёными активистами» различия всегда «утонут» в принципиально неустранимых погрешностях измерений, и в этом «виновата» не атомная энергетика, а фундаментальная математика.

Так что ни сотрудникам АЭС, ни их оставшимся дома родственникам беспокоиться в этом смысле не о чём.

Но вот радиационное воздействие общепромышленных выбросов (в которое, кстати говоря, значимый вклад вносит угольная генерация — как мы знаем, 37% мировой) выше «ядерного» более чем в 10 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 тема радона непосредственного отношения к атомной энергетике не имеет, её следует обсудить уже только поэтому.

Что представляет из себя радон как таковой? Это тяжёлый (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 (период полураспада — $3,8$ дня).

Как продукт распада радия-226, он входит в радиоактивный ряд урана-238, являясь по генезису чисто 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 измеримые количества урана содержатся и в почве, и в минеральных стройматериалах. Что такое техногенные кирпич, цемент, бетон? Это, в общем-то, песок и глина — продукты разрушения гранитных пород. А где

есть гранит — там всегда есть и уран, и в количествах иногда немаленьких.

На открытой местности радон, в определённом количестве выпускаемый в атмосферу любым урансодержащим веществом (в том числе и почвенным слоем), вследствие ветра, атмосферной конвекции, да и просто объёмного 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 лёгочной ткани 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 шахтёров, у которых запылённость легких, увы, нередкое явление, и для курящих — из-за смолистых и аэрозольных отложений, обусловленных табачным дымом. Минздрав предупреждает — и я тоже...

А во-вторых, это ещё полбеды. У радона сравнительно малый период полураспада, и его собственное излучение не создало бы и десятой доли возникающих от него проблем. Даже с учётом того, что он, как, мы знаем, и любой α -излучатель, достаточно опасен при внутреннем облучении. Однако по-настоящему неприятны 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. В этом случае собственно радон играет сравнительно скромную, но зловредную роль «переносчика», как грызун при распространении чумы.

При равновесной объёмной 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 объёмная 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.

Радон, конечно, выделяется не только из урансодержащих минералов. В растворённом виде он всегда содержится в воде (и выделяется из неё). В особенности много радона в водах глубоко залегающих артезианских и минеральных источников (см. **табл. 3.1**). Он есть и в природном газе, откуда при его сжигании переходит в воздух помещений — правда, в существенно меньшем количестве. И совсем уже мало радона в осадочных породах (мел, мрамор, известняк) и сухих органических материалах (дерево, солома). Тем не менее я прошу не трактовать эти сведения как призыв ко всеобщему переселению в шалаши (хоть в них с милыми и рай!), а обратиться к рассмотрению защитных мер в жилищах, достойных современного человека.

Самой простой и самой эффективной мерой снижения «радоновой опасности» является вентиляция. На **рис. 3.3** показано изменение концентрации радона в комнате, где и всего-то «мер» принималось, что открывали дверь и окно. Видно, что простейшая проточная вентиляция (сквозняк) уменьшает концентрацию радона в десятки раз! 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 (если речь идёт о сельском доме) —

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 конечно, надо с умом подходить к выбору и оценке качества стройматериалов для сооружения дома. 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. Как и неправильный выбор места строительства дома (домов) — над геологическим разломом или на рудном отвале.

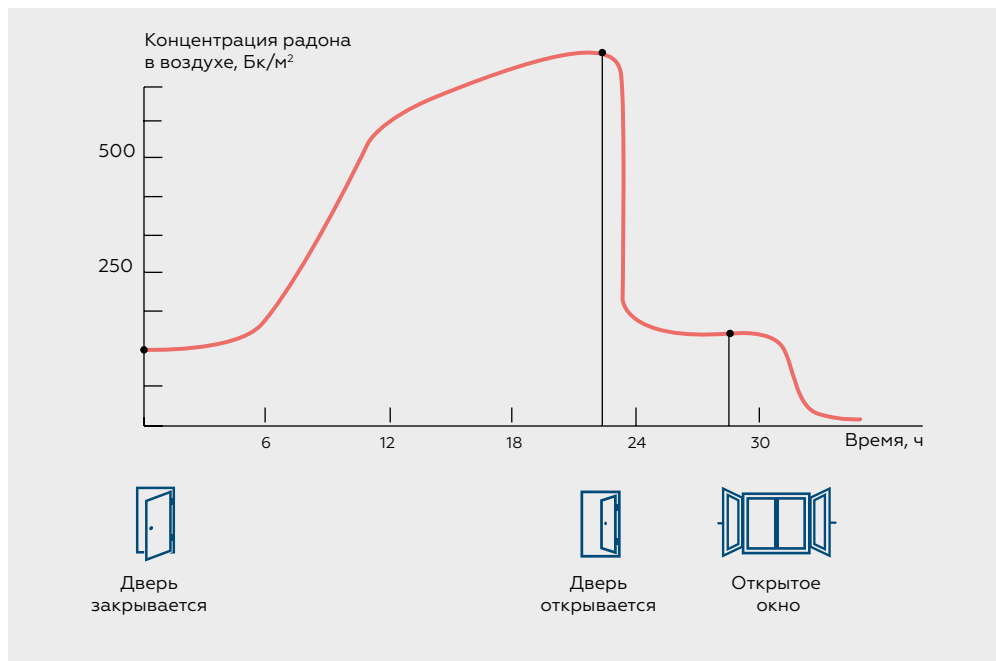


Рисунок 3.3. Изменение концентрации радона в помещении в зависимости от режима вентиляции

Самое же главное — если возникают какие-либо сомнения относительно радоноопасности вашего жилища, не пренебрегайте услугами специалистов (таким контролем занимаются организации, прошедшие в установленном порядке необходимые процедуры аккредитации). Но разного рода «народных умельцев», пробравшихся, увы, и в эту сферу, обходите за версту. Самодеятельность тут совершенно недопустима. Вы рискуете не только потерять деньги (до которых эти «умельцы» обычно очень падки), но и крепко попортить себе нервы, да и возможная угроза безопасности после такой «проверки» отнюдь не снимается.

Определённым образом нормируется также естественная радиоактивность стройматериалов для жилищного и дорожного строительства, а также минеральных удобрений. Особо оговаривается объёмная активность радона-222 в питьевой воде: она не должна превышать 60 Бк/кг.

Обо всём этом приходится говорить, имея в виду не столь давнюю алармистскую «антирадоновую» кампанию в СМИ, где радон назывался и «газом смерти», и «невидимым убийцей», и «СПИДом из земли», и т. п. Такая «пропаганда здорового образа жизни», не давая ровным счётом ничего для снижения опасности по существу, может обусловить, за счёт психических расстройств и стрессовых состояний, едва ли не худшие, со всех точек зрения, последствия, чем собственно радон. Кстати говоря, пренебрегать вопросами массовой психологии при обсуждении радиационных рисков вообще недопустимо — об этом наглядно свидетельствует и печальный опыт черновыльских событий.

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 молодёжью. Итак, начали...

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 подоплёке таких заявлений. Это может быть истерическое самовнушение, стремление к рекламе-однодневке, намеренная ложь (вероятно, с корыстными целями), — всё, что угодно, кроме правды.

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

Что здесь сказать... Законом это не запрещается, качества покупаемых продуктов не снизит, а на рынке, за счёт возможного испуга продавца, можно даже попытаться сбить цену. Но, 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 прямого измерения концентраций радионуклидов, сопоставимых с нормативными пределами их годового поступления в организм, то речь здесь идёт о столь низких уров-

нях, что бытовые дозиметры оказываются совершенно бесполезными.

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

Да, это так. Аккумуляция грибами радионуклидов (в частности, цезия-137) была отмечена ещё в начале 1960-х при изучении радиологических последствий атмосферных ядерных испытаний. Тот же эффект наблюдался и после черновыльской 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 далее.

Накопление радионуклидов грибами очень сильно зависит от их видовой принадлежности — оно, для разных видов, может изменяться в сотни раз. Это и понятно: грибы разных 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 разы больше радионуклидов, чем белые грибы, подберёзовики, 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 разборке корзины, 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 5–7 раз. Вообще же потребление грибов на среднестатистическом уровне 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, настой боярышника и медвежьих ушек, прополис, мумиё, кокосовые орехи, вытяжка из акульей 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 экзотические) объединяет только одно: полнейшая бесполезность — если не считать возможного психологического эффекта самоуспокоения. Если же говорить серьёзно, то проблема радиопротекторов —



одна из сложнейших в современной радиационной медицине. Здесь мы её не обсуждаем.

Но вот вопрос, с удивительным постоянством повторявшийся, 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?

Здесь односложно не ответишь. Формально, конечно, ответить можно — это примерно то же самое, чтобы для профилактики обморожения ампутировать себе уши. И, по существу, против истины такой ответ, уверяю вас, вовсе не погрешит. Но останутся ли им довольны слушатели (а в этой книге — и читатели)? Не сочтут они его проявлением профессионального снобизма? А вот этого профессионалу в общении с молодёжью допускать никак нельзя.

Для начала скажем, что события и явления, легшие в основу «легенды о йоде», имеют, так скажем, «общий контур». Именно, продолжая наш разговор о радиопротекторах, отметим, что 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 тяжёлых реакторных авариях с разрушением активной зоны, когда одной из главных опасностей становится внутреннее облучение за счет избирательного поглощения радиоактивного изотопа йода-131 в щитовидной железе 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 регионах, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

Чтобы уменьшить это воздействие, люди получали для приёма внутрь таблетки, содержащие йодистый калий, йод в которых, естественно, был «нормальный», стабильный (йод-127). При этом щитовидная железа на некоторое время насыщалась йодом «досыта», после чего любой другой йод, радиоактивный в том числе, ею просто не усваивался и сравнительно быстро выводился из организма естественным путем. Правильно проведённая йодная профилактика позволяет снизить дозу от внутреннего облучения йодом-131 в десятки раз.

В качестве «лирического отступления»: что до распространённого 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 вернёмся к серьёзным делам. Всё это так, но речь-то идёт, повторяю, об экстремальной, чрезвычайной радиационной обстановке при тяжелейшей ядерной аварии с разрушением активной зоны мощного ЯЭБ! 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 к «питию йода 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 четырёх ЯЭБ 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 должна применяться (тяжёлая 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 неопределимое.

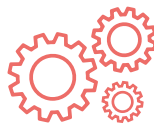
Оперативно осуществлённый, посредством хорошо организованных и умело управляемых слухов и сплетен, «залповый информационный вброс» чудовищных фейковых нелепиц о «тяжёлой аварии на АЭС» и «страшной угрозе жизни людям во всем приволжском регионе» при запоздалой и вялой реакции на происходящее со стороны официальных инстанций привёл к тому, чего организаторы кампании, собственно, и добивались — к массовой панике на «антиатомной почве». А поскольку призыв «пить йод» был в этих слухах и сплетнях практически единственным — хотя и вопиюще безграмотным — рекомендуемым позитивом (о каких-либо иных алгоритмах действий населения 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 «включён в рацион» — иногда в количествах, явно не безвредных для здоровья, поскольку при внутреннем употреблении он ядовит. Не обошлось и без отравлений — хорошо, что в лёгких формах... Будучи сам родом из Саратова, я, по содержанию и тону систематических телефонных звонков родственников, был тогда «в дистанционном режиме» свидетелем всего этого бардака.

Были и другие истории, в этом смысле подобные Балаковской, — достаточно вспомнить «фукусимские» события. Да и память о действительно тяжёлых авариях в атомной энергетике, о которых упоминалось выше, как и об их радиационных последствиях, в сознании людей не успела

ещё остыть (а её периодически ещё и подогревают зарубежными и отечественными телесериалами и целевыми «информационными вбросами» — случайно ли?).

Всё это даёт обширную пищу для размышлений относительно восприятия обществом радиационных рисков, да и атомной энергетики в целом. И вот главный вывод: надежды, если у кого они и были, на свершившийся уход с мировой, да и российской общественной арены её противников — иллюзия, самообман. Они никуда не ушли, они существуют, они действуют — и будут действовать впредь. Слишком значимы политические силы, стоящие за ними. Слишком велика тяга у некоторых журналистов и блогеров к «жареным фактам», подаваемым по принципу «свободы бескостного языка» в сочетании с чудовищной некомпетентностью.

А главное — чересчур уж сильным иногда оказывается очень тревожное социальное противоречие современности. Оно вот в чём: с одной стороны, налицо объективная сложность технических (и далеко не только!) проблем, которые ставит перед обществом логика его развития. А с другой — столь популярное в наши дни «клиповое» мышление, когда достоверность какого-то события и связанных с ним его реальных (реже) и выдуманных (гораздо чаще) последствий, рисков и угроз определяются не существом дела, а уровнем



информационного шума в соцсетях и бытовых сплетнях. Необходимость же при этом подумать собственной головой обычно выводится за рамки обсуждения — как и вопрос о минимально приемлемом, для формирования своего мнения по обсуждаемой проблеме, уровне собственной образованности и компетентности.

Возвращаясь к нашей теме: для нейтрализации «антиатомных» информационных провокаций следует, во-первых, научиться действовать на опережение. Ведь молчание специалистов не то что в дни, а и в часы их развёртывания будет интерпретироваться людьми однозначно — как замешательство, как раздумья на тему «что можно сказать, а чего нельзя». И не только применительно к атомной энергетике. А во-вторых, и специалистам надо научиться аргументированно, уважительно разговаривать с людьми, терпеливо и настойчиво учить и убеждать их, без снобизма и с бесконечным терпением.

Но работа по формированию у наших граждан адекватного представления об атомной энергетике и радиационных технологиях не имеет ничего общего с «поисками консенсуса» с кучками агрессивных крикунов, иногда дорывающихся до лидерства в некоторых местных «экологических» общественных организациях. С людьми, для которых атомная энергетика хороша, только если она мертва, предметно беседовать не о чем. Учить и убеждать их (о чём свидетельствует и мой собственный опыт) бесполезно, заискивать перед ними — для специалиста стыдно и унижительно. С ними приходится говорить иногда жёстко и бескомпромиссно, но ни в коем случае не опускаясь до их же привычных «аргументов» — фейковых информационных вбросов, махровой лжи, подтасовок и откровенных оскорблений.

Вместо
заклучения.
Общество
и атомная
энергетика —
срез непростых
отношений

Да пребудут в целости,
Хмуры и усталы,
Делатели ценности —
Профессионалы.

А. Межиров

Вот и подходит к концу наша книга. Я, как и в первом издании, старался совместить в ней минимально допустимую научно-техническую строгость изложения материала с отсутствием назидательности и занудства. Мне хотелось бы, чтобы её читали.

Но сомнения не оставляют. С одной стороны — то, что я пытаюсь в ней донести до читателя. А с другой...

«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).

Если вы, дорогие читатели, думаете, что весь этот клинический бред придумал я сам в полемическом задоре, то это не так. Это — дословные цитаты, взятые мной наудачу в том смысле, что цитат подобного рода можно без труда привести и три, и тридцать три, и сто тридцать три.

Как реагировать на подобную галиматью? Смеяться, покручивая пальцем у виска? Можно, конечно... Но это будет смех с осязательным привкусом настороженности. И понятно почему — нет полной уверенности в том, кому в итоге поверят. Кому же?

Наш век — век 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 далее, утверждая единственно возможный в наше время (во вся-

$E_{cb} = \Delta mc^2$

${}^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3{}^1_0n$

${}^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{140}_{54}Xe + {}^{91}_{38}Sr + 2{}^1_0n$

$L_{\phi, \delta} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \sum_{\phi, \delta} \sigma_{\phi, \delta} \cdot \sum_{\phi, \delta} v_{\phi, \delta}}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 2,12 \cdot 0,259}} = 0,246 \text{ см}$

$L_{\text{зам}} = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot 0,2221 \cdot 2,31}} = 2,555 \text{ см}$

$S_{\text{мол}} = \pi \cdot \frac{D_{\text{мол}}^2 \cdot n}{4} = 3,14 \cdot \frac{0,9^2 \cdot 10^2}{4} = 66,34 \text{ см}^2$

$(E-1) = 0,5 \cdot \left(\frac{0,486}{2,555}\right)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{0,486}{0,455}\right) - 0,75\right) = 0,001$

$E_k = E_{\text{актив}} - E_{\text{связан}}$

$\lambda_2 = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$

$\mu = \cos \theta = 2/3$

$\frac{\partial \rho}{\partial c} = S \cdot \Delta \cdot \Delta \phi - \Sigma_0 \Phi$

$I = -\Delta \cdot \frac{dc}{c}$

$\Delta = \lambda / (5 \cdot (1 - \mu))$

$\mu U = \Phi$

$U = \ln(E_0/E)$

$L^2 = \frac{D}{\Sigma_a} \cdot L^2(T_{\text{эф}}) = L_{\text{эф}}^2 \sqrt{1/295}$

$235U + {}^1_0n \rightarrow 140Cs$

$\eta_{\text{эф}} = v_s \cdot \frac{\sigma_f^s}{\sigma_f^s + \sigma_c^s} = v_s \cdot \frac{1}{1 + \alpha}$

$I = \int_E^{E_0} \sigma_a(E) \frac{dE}{E}$

$\Sigma_a = \rho_0 \cdot \sigma_a$

$\chi_{\text{эф}} = \frac{\Delta k_{\text{эф}} - 1}{k_{\text{эф}}}$

$\rho = \frac{\Delta k_{\text{эф}} - 1}{k_{\text{эф}}}$

$\rho = \frac{\Delta k_{\text{эф}} - 1}{k_{\text{эф}}} = \frac{\rho_{\text{ст}}}{1 - \beta}$

$\rho_{\text{ст}} = \frac{\Delta k_{\text{эф}} - 1}{k_{\text{эф}}}$

$\rho = \frac{1,569 - 1,726}{568 - 293} = -5,710 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$k_{\text{эф}} = \frac{1,795 \cdot \exp(-1,31 \cdot 10^{-3} \cdot 37,413)}{1 + 1,31 \cdot 10^{-3} \cdot 0,241} = 1,709$

$k_{\text{эф}} = \frac{1,763 \cdot \exp(-1,144 \cdot 10^{-3} \cdot 101,260)}{1 + 1,144 \cdot 10^{-3} \cdot 0,664} = 1,709$

$235U + {}^1_0n \rightarrow 90Sr + 143Xe + 3{}^1_0n + \text{энергия}$

$235U + {}^1_0n \rightarrow 92Kr + 141Ba + 3{}^1_0n + \text{энергия}$

$\sigma = \frac{\pi}{\phi \cdot N_s} \cdot \theta = \frac{\pi \cdot \theta}{\phi \cdot N_s}$

$F = \frac{W}{E} \cdot \left[\frac{\sigma}{L^2} \cdot R(\omega) \cdot \frac{V \cdot I \cdot S}{E \cdot \Sigma_a} \right]$

$L_p^2 = L_{\text{зам}}^2 \cdot (1 - \theta) + L_{\text{ф}}^2 \cdot \theta = 2,042 \text{ см}^2$

$L_p^2 = 2,55^2 \cdot (1 - 0,972) + 0,246^2 \cdot 0,972 = 0,241 \text{ см}^2$

$\rho = \frac{\Delta k_{\text{эф}} - 1}{k_{\text{эф}}} = \frac{1,569 - 1,726}{568 - 293} = -5,710 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$\tau = [(\beta - \rho)T_{\text{эф}} + (\beta - \rho)T_s] \approx (\beta - \rho)T_s$

$\Sigma_{\phi, \delta} = \frac{1}{S} \cdot \sum_{i=1}^m \Sigma_{\phi, \delta, i} \cdot S_i = \frac{\Sigma_{\phi, \delta, \text{мон}} \cdot S_{\text{мон}} + \Sigma_{\phi, \delta, \text{к.м.}} \cdot S_{\text{к.м.}}}{S}$

$V_{\text{ас}} = \frac{N}{N_0} \cdot \eta = \frac{175 \cdot 10^3 \cdot 1,2}{85 \cdot 10^3} = 2,471 \cdot 10^6 \text{ см}^3$

$\Sigma_{\phi, \delta} = 2,3 \cdot 0,594 + 0,278 \cdot 0,056 = 2,126 \text{ см}^{-1}$

$\frac{4 \cdot 10^6}{4 \cdot 2,47 \cdot 10^6} = 161,269 \text{ см}$

$\Sigma_{\phi, \delta} = 2,126 \text{ см}^{-1}$

ком случае, в естественно-научной 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 нашей недавней истории свидетельствует вполне однозначно: непонимание этой непреложной аксиомы современности делает общество беззащитным перед возможностью трагического перехода от недоверия специалистам к их травле, а заодно и травле целых направлений науки и техники. Примечательно, что такая травля очень часто организуется и поддерживается (иногда достаточно массированно и умело) политическими кругами, ничего в этом деле не преследующими, кроме собственных сиюминутных интересов. Много ли думали об интересах страны и народа некоторые отечественные философы и партийные деятели, организовав семьдесят лет назад оголтелое преследование «буржуазной науки — кибернетики» и «прислужницы империализма — генетики»? Много ли думали (совсем недавно!) об отечественной энергетике некоторые «эксперты» и «представители», предлагавшие «на корню» сдать её базовые интересы «цивилизованному Западу»? Да плевать им было на кибернетику, генетику и энергетику — речь шла лишь о сохранении собственных благ и привилегий.

Результат известен. Кибернетика и генетика в нашей стране после этой «охоты на ведьм» с большим трудом пришли в себя, с потерей того, что в нашем мире дороже всего, — времени. С энергетикой, к счастью, обошлось. А началось-то всё с недоверия к специалистам. С уверенности, что партийный деятель, популярный писатель или рейтинговый политик лучше разбирается в кибернетике, чем кибернетик, в генетике — чем генетик и в энергетике — чем энергетик. В наши дни в список «хорошо разбирающихся» можно добавить некоторых телеведущих и блогеров.

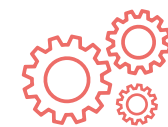
Конечно, из сказанного вовсе не следует, что специалисты безгрешны, как ангелы, и ошибаться не могут. Могут — хотя вероятность того, что они ошибутся все разом,

исчезающе мала. Однако гораздо худший выбор — доверять дилетантам, и хуже всего — в ситуации, когда специалисты дружно высказывают противоположное мнение.

Нельзя сказать, чтобы общество этого вообще не понимало. 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 сверхобаятельная телеведущая. Мы шьём костюмы у опытного портного и в страшном сне не рискнём натянуть на себя наряд, сработанный даже суперрейтинговым политиком. И т. д.

Но атомная техника и энергетика бывают, увы, исключением. При их обсуждении журналисту, телеведущей и политику слишком часто доверяют больше, чем профессионалу-атомщику. А ведь журналисты, телеведущие и политики избегают, без особой необходимости, публично высказывать точку зрения по некоторому вопросу, отличную от мнения большинства населения. Следовательно, озвучивая бредовые антиатомные пассажи, они исходят из того, что население если уж и не категорически против атомной энергетике (хотя ещё лет двадцать назад это было, к сожалению, недалеко от истины), то часто напугано ею вплоть до забвения логических аргументов, этот страх обосновывающих.

Крупный отечественный специалист по ядерной энергетике, профессор А. Ю. Гагаринский в своей прекрасной книге «Люди и атом», метко называя это явление «пирамидой перевёрнутого 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 «атомобов», кстати, достаточно распространённый — с ним и автору приходилось не раз сталкиваться. Но что — разве стоматолог, водитель и портной за свою работу не получают деньги? Получают. И профессионал-атомщик — тоже. А 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 ну 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», простите, нашли — и, кстати, кто нашёл?..

Но вернёмся к главной проблеме — чего и как, в идеале, мы хотим добиться от общества при формировании его отношения к ядерным технологиям?

Снова встаёт вопрос о доверии профессионалам. Нет, я вовсе не отказываюсь от сказанного ранее — оно действительно есть непереносимое условие существования современного общества. И всё же...

Попробуйте выучить два стихотворения (а заодно оценить и их художественные достоинства). Одно — «Мело, мело по всей земле...». Завораживающая прелесть пастернаковских строк, между прочим, делает нас абсолютно невосприимчивыми к высказываниям и мнениям, что это — плохие стихи и плохая поэзия, пусть даже некоторые критики такое и говорили. Правда, хорошо известно, что они руко-

водствовались при этом соображениями, весьма далёкими от литературы. Но у подавляющего большинства людей, и это главное, есть на этот счёт своё мнение — что вовсе не лишает специалистов (филологов и литературоведов) права на профессиональный анализ творчества нашего великого соотечественника. И если тонкости этого анализа нам, простым читателям, недоступны — ну что ж, на то они и специалисты. Доверимся им.

А второе — стихотворение тоже большого, настоящего поэта, но иностранного, написанное на непонятном для читателя языке. Тут уже с заучиванием возникнут большие проблемы — человеку трудно запоминать бессмысленный для него текст. Что же до оценки достоинств, то здесь вопрос с очевидностью снимается сам собой. Здесь остаётся только полностью доверять критикам и их оценкам. Но критики, как мы уже знаем, тоже разные бывают. В том числе и такие, которые заинтересованы в формировании негативного отношения к этому поэту (искренне исходя из собственных воззрений или по другим причинам — в данном случае не так важно). И они имеют неплохие шансы, ибо на их стороне сыгрывает инстинктивное психологическое недоверие человека к чему-то совершенно непонятному. А уж если таких критиков (опять не обсуждая причин, почему) много...

Совершенно так же обстоит дело с ядерными технологиями. Трудно призывать людей верить специалистам в делах, где подавляющему большинству непонятны самые азы, а критиков (да ещё такой степени тенденциозности и оголтелости, как организаторы антиатомных кампаний) более чем достаточно. Мудрено ли, что благодаря усилиям некоторых «экологов» общественность в своём отношении к атомной технике и энергетике нередко оказывалась (да и оказывается) в роли старухи — «святой простоты», подкладывающей сушняк в костёр Яна Гуса?

Кстати говоря, понятие «эколог» не случайно 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. И она не имеет ничего общего с шумной и агрессивной деятельностью «упёртых» и обычно технически безграмотных противников атомной энергетики — часто к тому же откровенно работающих «на заказ».

К сожалению, так обстоит дело не только в среде рядовых обывателей. Вот высказывание видного германского политика конца нулевых годов. Рассматривая различные энерготехнологии по выбросам в атмосферу парниковых газов (об этом мы говорили в главе 1), он заявил: «Атомная энергетика не производит парниковых газов (совершенно правильно, мы об этом уже знаем. — А. К.), но она опасна сама по себе» (!! — А. К.). Поневоле вспоминается дискуссия между гарпунщиком Недом Лендом и Конселем, слугой профессора Аронакса, из романа Жюль Верна «Двадцать тысяч 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. Аллес капут.

Отсюда и моя просьба к читателям. Друзья мои, перед тем, как формулировать своё 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 ещё! Ведь мы в XXI веке живём, и наше отношение к чему-то (а тем более — повод к действиям) предполагает соответствующую разумную внутреннюю аргументацию. А если её пока нет — подумайте, что лучше. Либо её приобрести (пусть не сразу и приложив некоторые умственные усилия), либо, в её отсутствие, поддаться «инстинкту стада» и покорно исполнять роль покорного «болванчика» в играх ваших «вожак» и «активистов». Для вас — в чужих играх, в которых вы, ваши судьбы, ваш задор и ваша «движуха» — лишь дешёвая разменная монета!



Но вернёмся к вопросу о восприятии общественным мнением атомной техники и энергетики. Случайно ли, что именно их постигла столь злая судьба?

Конечно же, нет. В таких вопросах случайностей не бывает, и сходство «идеологических платформ» различных антиатомных кампаний мира только подчёркивает 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 части общества и, как следствие, нарушение принципа доверия к специалистам должны не только молча отмечаться, но и анализироваться.

И вот — первая предпосылка. 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 публично показали миру «своё лицо». А вот 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 многих людей, освещённой заревом ядерного оружия, обеспечившего человечеству, в первый раз за всю его историю, возможность самоуничтожения. В данном случае совершенно неважно, что 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 чёрт пахнет...

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

Например, в космической ракете и турбореактивном самолёте используется один и тот же базовый принцип движения — реактивный. Но из этого вовсе не следует, что на турбореактивном самолёте, как и с помощью ракеты, можно достигнуть Луны. Помимо совершенно различных масштабов энерговооружённости этих машин, есть и принципиальное к тому препятствие: в двигателях самолёта 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 в них существуют принципиальные различия в технической реализации этого способа и, как следствие, в закономерностях его протекания.

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

Но есть важное замечание. Именно, повторяюсь, масштабное развитие атомной энергетики в мире в наши дни 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. Мир, в котором не только атомной энергетикой, но и атомной бомбой будут владеть десятки стран, вряд ли доживёт до Большого энергетического выбора, о котором мы говорили в главе 1 нашей книги. Применительно же к обсуждаемому нами вопросу (формирование доверия широких масс населения к атомной энергетике) надёжное обеспечение нераспространения уничтожает одно из наиболее значимых общественных заблуждений — глубоко

ошибочную уверенность в неразрывной генетической связи мирного атома с атомом военным. И дело здесь, конечно, не в экстремальной опасности в этом смысле именно атомной энергетики. В конце концов, топка упомянутой печки на даче 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 до недавних пор была окутана столь же непроницаемой завесой секретности, как и военно-ядерный комплекс. При этом секретилось всё подряд — что нужно и, к сожалению, что и не нужно.

С точки зрения современного открытого информационного общества, в этом уже хорошего мало. Однако ситуация многократно усугублялась тем, что эта завеса тайн 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 вследствие 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. Ведь удар наносился по очень уязвимому месту человеческой психологии. Люди начинали думать: на сей раз попытались утаить угрожающую нам опасность — попытаются и в другой раз. Я вспоминаю чернобыльские события: ох, как дорого обошлось тогда российским атомщикам нарушение единственно возможного в такой ситуации принципа диалога с обществом: «Не молчи, говори правду». Слава Богу, этот горький урок был со временем в нашей стране усвоен. В атомной отрасли — в первую очередь.

И, наконец, третья (возможно, и самая значимая) предпосылка, кардинально ухудшающая «общественное

лицо» ядерных технологий даже и сейчас. Это — «атомная радиация», ионизирующие излучения (ИИ), наличие которых нередко приходится учитывать в ходе промышленной реализации этих технологий.

Об ИИ мы подробно говорили в главе 3. Но причина массового патологического страха перед ними (на грани здравого смысла, а иногда уже и за этой гранью) — вовсе не в их наличии как таковых и не в их свойствах. 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) — мы уже знаем, 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 фактор (информационный) — в условиях тотальной секретности «на всё 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 — неадекватности оценки обществом относительной опасности ядерных технологий в сравнении с иными технологиями.

Что здесь имеется в виду?

Следует чётко понимать, что «абсолютно безопасных» технологий не существует вообще. Предъявление такого требования любой технологии, ядерной в том числе (что, кстати, всегда с головой выдает дилетанта), вполне равнозначно требованию полного отказа от нее. Даже «технология» каменного топора, к возвращению к которому 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 3800 человеческих жизней. Взрыв угольной пыли в шахте близ г. Хункэйкё (Япония, 1943) — 1550 погибших. Взрыв газопровода в Башкирии (СССР, 1989) — погибло 800 людей. Только лишь в России в 2021 году в ДТП распрощались с жизнью свыше 18 000 людей, а в мире? А вполне устоявшаяся «цена» в мировой угольной отрасли — около семи погибших шахтёров 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 (он сам автолюбитель). Смысл сказанного совсем в другом — это неминуемая, на некотором этапе истории общества, плата за развитие тех или иных технологий. Целесообразность же такого развития в каждом конкретном случае определяется многофакторным анализом в четырёхугольнике «выигрыш — стоимость — альтернатива — риск». Это — довольно сложные оценки, здесь заниматься ими мы не будем.

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 — их запрета) лишь на основе субъективных мнений типа «она опасна сама по себе, и всё тут» никому в голову всерьёз не приходит.

А что с атомной энергетикой?

Чернобыльская «сверхавария» ещё и потому стоит особняком в истории атомной энергетике, что не обошлась без жертв. Три человека погибли в момент взрыва реактора, ещё 28 — в течение трёх недель после аварии от несовмести-

мых с жизнью доз облучения в сочетании с лучевыми ожогами. В дальнейшем возможной, с различной степенью вероятности, причиной преждевременной смерти от отдалённых последствий облучения стали, по разным оценкам, ещё 50–100 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 молодёжью, слышать не раз. И на мой вопрос — откуда они это взяли? — ответы были 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 молодёжи от дурацкого бездумного легковерия!

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

А людям надо, наконец, понять: при отсутствии доказательств (а где они в нашем случае?) априорная вера в несуществующую опасность называется просто и ёмко — предрассудок. Психологам же хорошо известно: предрассудок сам по себе иррационален, но в его основе обычно лежит рациональная подоплёка, дополненная порочной логикой (и за счёт



этого искажённая). Осознав эту порочность, человек обычно избавляется и от самого предрассудка — о чём я и мечтаю.

Но и сотрудникам ядерной отрасли, и тем, кто воспитывает «ядерную смену», нельзя забывать важнейший урок чернобыльской аварии — 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 всём мире (и в России тоже) буквально боролась за выживание — какое уж там развитие...

Эти горькие годы показали с полной однозначностью: второй подобной аварии ей уже не выдержать. Люди безвозвратно отвернутся от неё, невзирая ни на какие глобальные энергетические угрозы. Столь же очевиден и вывод: безопасность атомной энергетики должна быть технически и органи-

зационно обеспечена «с запасом» — объективно, может быть, даже несколько излишним. По-другому сейчас не получается и в обозримое время не получится — по крайней мере, до тех пор, пока общество не приобретёт «адекватный запас» уверенности, что ядерные технологии не являются источником аномально высоких угроз.

Отсюда — непреложное, категорическое требование. Именно, обеспечение безопасности любой технологии, и атомной энергетике в том числе, означает (об этом уже говорилось, но готов повторять вновь и вновь): на её объектах и установках, созданных профессионалами-учёными 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 серьёзная угроза безопасности, и вся статистика ядерных и радиационных аварий свидетельствует об этом с полной очевидностью. Вечный тому пример — тот же Чернобыль, когда главной причиной тяжелейшей за всю историю атомной энергетике ядерной аварии стало совершенно немыслимое для профессионала чудовищное сочетание преступно безответственных, вопиюще неквалифицированных поступков сотрудников дежурной смены ЯЭБ, оказавшихся на своих постах вследствие ничуть не лучших действий организационных и кадровых служб.

Так вот, если атомная энергетика претендует на роль лидирующей мировой энерготехнологии, а в России и на роль национального технологического лидера (на что у неё есть все основания), подготовленных, высококвалифицированных профессионалов во всех трёх упомянутых категориях должно быть достаточно — кого угодно к созданию реактора и к его пульта допускать просто нельзя. Ведь последствия крупной ядерной аварии интернациональны — об этом уже говорилось. Действует принцип: «катастрофа на одной АЭС есть катастрофа для всех АЭС». Больше катастроф быть не должно.

А дальше я обращаюсь не только к молодым читателям, но и к их старшим товарищам, моим коллегам по атомной отрасли и по преподавательской деятельности. И я не собираюсь здесь как-то фрагментировать изложение. Я считаю, что мы делаем общее дело, в котором у одних для других не должно быть секретов.

Так вот, формирование когорты профессионалов отрасли — лишь одна ипостась ядерного образования, условно говоря, высшая его ступень. Есть и низшая, но по своей значимости ничуть не меньшая и требующая для своего развития не меньше усилий.

Первая задача здесь — начальная профессиональная ориентация. Ведь чем более активно и умело отрасль ведет агитационную и информационную работу среди молодёжи, в школах и колледжах, тем меньше у неё 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» молодёжь и выберёт для себя по жизни иную профессию, значимость ядерных технологий для настоящего и будущего страны и мира она усвоит и ряды противников атомной энергетики вряд ли пополнит.

Это, условно говоря, направление работы «вглубь». Но 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 — опять-таки дать людям основы, азы. Чтобы человек, разбираясь в главном, в существе дела, доверял профессионалам в анализе и реализации его конкретных аспектов — вспомните пример со стихотворением.

Применительно же к радиационным аспектам ядерных технологий надо помочь людям преодолеть не только

неосознанный страх перед «ужасной радиацией», но и две главные его причины. Сомнения одних, что «простой человек» сможет что-либо понять в этой «кухне сатаны», и убеждённость других в том, что они, лишь доверяя глупостям вроде процитированных в начале этой главы, уже понимают в этом деле всё или почти всё.

А для этого надо представить людям ядерную и радиационную физику, радиобиологию и радиоэкологию вещами, в основе своей понятными большинству и описываемыми вполне предсказуемые явления. И надо стремиться не заменить массовый панический страх перед радиацией 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 ещё пределов увеличивают созидательные возможности Человека, но способны принести неисчислимые беды, оказавшись в руках неуча, растяпы или злодея.

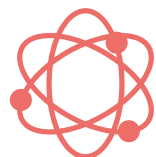
И это ещё не всё. Надо учитывать, что обязать людей учиться этим вещам нельзя — следовательно, их надо ещё и заинтересовать. А для этого такую учёбу надо сделать по-человечески интересной, не поступаясь при этом, однако, научной и технической достоверностью.

Вот этими соображениями я и руководствовался, когда писал эту книгу. Я искренне желаю, чтобы некоторые (желательно — многие) из вас, дорогие читатели, выбрали себе по жизни карьеру атомщика, поступив в один из 19 вузов, входящих в ассоциацию «Консорциум опорных вузов Госкорпорации «Росатом». В первую очередь, это — Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» — наша главная «кузница» ядерных кадров.

Предприятиям атомной промышленности, её исследовательским институтам, атомным электростанциям, судам атомного флота, ядерной медицине, нашим зарубежным ядерным проектам очень нужны молодые, высокообразован-

ные, культурные специалисты, которыми вы сможете стать по окончании этих вузов.

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



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Для «начинающего» читателя

Колдобский А. Б. 100 вопросов и ответов об атомной энергетике. М.: «ТВЭЛ», 2018.

Акатов А. А., Коряковский Ю. С. Атомная энергетика. Спрашивали? Отвечаем! М.: АНО «ИЦАО», 2017.

Акатов А. А., Коряковский Ю. С. Радиация: говорят, что... М.: АНО «ИЦАО», 2012.

Для «продвинутого» читателя

Тетельмин В. В., Язев В. А. Физические основы традиционной и альтернативной энергетики. Долгопрудный: «Интеллект», 2014.

Анрианов А. А. и др. Ядерные технологии: история, состояние, перспективы. М.: НИЯУ МИФИ, 2012.

Фортов В. Е., Попель О. П. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: «Интеллект», 2010.

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 и штрихи к портрету / А. Б. Колдобский. —
2-е изд., расширенное. — Москва : Кучково поле Музеон, 2022. — 160 с. : ил.

ISBN 978-5-907589-02-5

Оригинал-макет подготовлен



Дизайн, иллюстрации: Марина Миллер
Корректор: Зоя Колеченко
Верстка, допечатная подготовка: Марина Рогова
Цветокоррекция: Сергей Панфилов
Координатор проекта: Анастасия Евдокимова

Подписано в печать 20.09.2022

Формат 170 × 220 мм

Тираж 500 экз.

Заказ №

© Колдобский А. Б., текст, 2022
© ООО «Кучково поле Музеон»,
оригинал-макет, издание, 2022
© Автономная некоммерческая организация
«Информационный центр атомной отрасли»,
все права, 2022

Отпечатано ИП Келлер Т. Ю.,
типография «Любавич»
194044, Санкт-Петербург,
ул. Менделеевская, д. 9
Тел.: +7 (812) 603-25-25
<https://www.lubavich.spb.ru/>