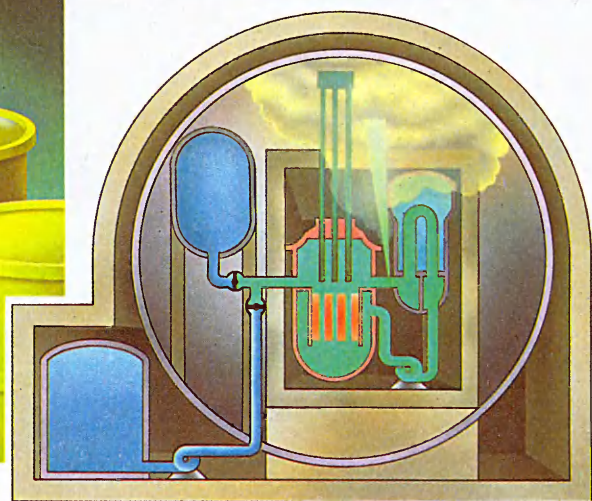
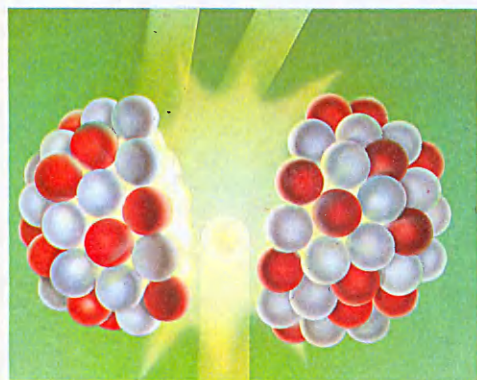


ЧТО
ЕСТЬ
ЧТО

Атомная энергия



СЛОВО / Slovo

Атомная энергия

Проф. Зигфрид Ауст

Иллюстрации Манфреда Костки и Франка Климта
Перевод с немецкого С.Б.Гутника

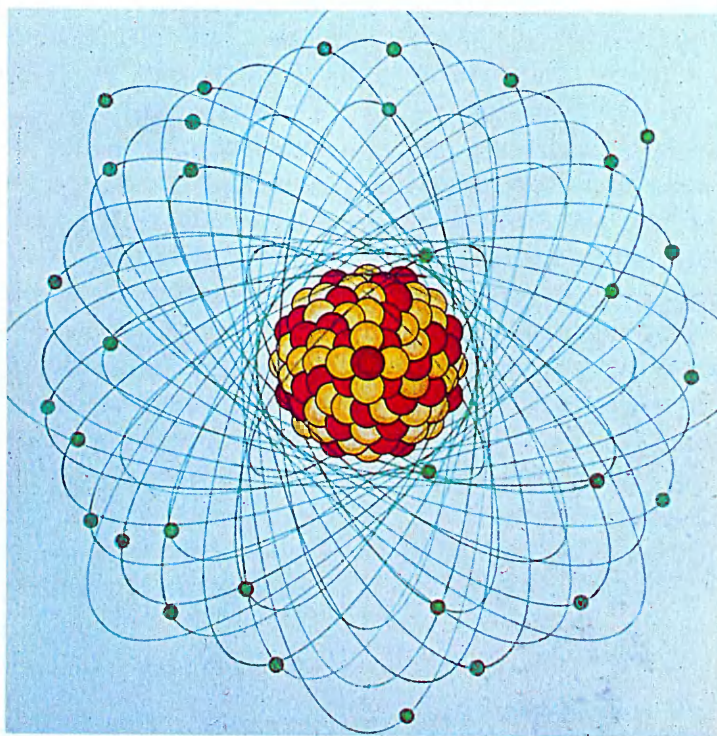


Рисунок атома с электронной оболочкой и ядром

Предисловие

Важнейшая в физике, а может быть и во всей новейшей истории человечества, формула очень проста. Она имеет вид $E=mc^2$ и гласит, что незначительное количество материи можно превратить в огромную энергию. Формула эта, опубликованная в 1905 году Альбертом Эйнштейном, — основа для постижения таких понятий, как атомная энергия, расщепление ядра, ядерный синтез, реактор и атомная бомба, солнечное излучение и физика элементарных частиц.

Превращение в энергию одного-единственного грамма материи в 1945 году в Хиросиме повлекло за собой гибель 200 000 человек. Но ведь из одного килограмма урана U-235 можно получить такую энергию, для выработки которой понадобилось бы 67 цистерн жидкого топлива по 30 тонн в каждой. Раньше воспользоваться этой гигантской энергией, таящейся в каждой частице материи, не удавалось, так как она выделяется только при взаимодействии открытых уже в нашем веке атомных ядер, в результате взаимодействия теряющих массу, достаточную для выделения необходимой энергии.

Эта книга должна стать скромным введением в мир атомных ядер и ядерной техники. О значимости ядерной энергии можно судить по тому факту, что в серии «Что есть что», насчитывающей сегодня около 90 томов, «Атомная энергия» стоит на третьем месте после томов «Земля» и «Человек». Черно-

быльская авария в апреле 1986 года показала, какие серьезные последствия для всех нас может повлечь за собой использование ядерной энергии. Значительная переработка текста этой книги по сравнению с ее первым изданием объясняется несколькими причинами. Во-первых, появилось много новых понятий, таких как «быстрые бридерные реакторы», регенерационная установка, захоронение отходов. Далее, почти все прежние единицы измерения энергии и дозы радиации, такие как калория, рем или кюри, больше не применяются. Кроме того, с середины семидесятых годов ФРГ все больше ориентируется на ядерную энергетику.

Возможности применения ядерной энергии как в мирных, так и в военных целях практически неограниченны, поэтому при обсуждении этой темы очень трудно оставаться объективным. В зависимости от умонастроения и политических взглядов легко впасть в технические грезы либо в тотальный парализующий страх перед будущим. В книге мы пытаемся помочь разобраться в «ядерном» вопросе, не занимая однозначной позиции: описаны не только потенциальные преимущества ядерной энергии, но и огромная опасность, грозящая нам в случае отказа ядерной техники или, что еще ужаснее, развязывания атомной войны. Однако прежде всего объясним основные понятия в этой области знания.

A 4802060000 Подп.
Ш 67 (03) — 94

Перевод С.Б.Гутника
Научный редактор В.Г.Сурдин

ББК 26.234.6
А 93

Copyright © 1962/1989 Tessloff Verlag · Nürnberg
© Slovo/Слово Перевод на русский язык и компьютерная верстка

ISBN 3 7886 0243 0 (Германия)
ISBN 5 85050 021 9 (Российская Федерация)

Фотографии:
Planetarium Hamburg (13), Fotoarchiv Oul (4), dpa (3), Deutsches Atomforum e. V. (1), Foto auf Seite 13,
oben: Fotostudio Schulzr-Alex, freigegeben durch das Luftamt Hamburg, 238/87.
Illustrationen und grafische Darstellungen: Manfred Kostka und Frank Kleimt

Исключительное право на издание и распространение серии книг «Что есть что» на территории России и стран СНГ принадлежит издательству «Слово». Перепечатка книги или ее фрагментов в любой форме и любыми способами, электронными и механическими, включая фотокопирование, запись на пленку, или любыми воспроизводящими информацию системами только с письменного разрешения издательства «Слово».

Содержание

Энергия и общество

Что такое энергия?	4
Как измеряют энергию?	5
Какие существуют источники энергии?	6
Что понимают под первичной и вторичной энергией?	7
Кто расходует большую часть энергии?	7
Исощаются ли энергоресурсы Земли?	8
Что такое материя?	8
Можно ли превратить материю в энергию?	9

Мир атомных ядер

Что такое атом?	11
Как устроен атом?	12
Из чего состоят ядра атомов?	13
Как различают элементы?	14
Что такое изотоп?	14
Почему не лопаются ядра атомов?	15
Что такое радиоактивность?	15
Как распадаются атомные ядра?	16
Что понимают под периодом полураспада?	16
Что понимают под активностью или дозой облучения?	17
Можно ли расщеплять атомные ядра?	18
Почему нейтроны так удобны для бомбардировки ядер?	18
Что происходит, когда расщепляют атом урана?	19
Что такое цепная реакция?	20
Что такое обогащение?	21
Что такое замедлитель?	22
Что понимают под ядерным синтезом?	22
Откуда Солнце получает свою энергию?	23

Атомные электростанции сегодня и завтра

Что такое электростанция?	24
Что такое атомная электростанция?	25
Как работает кипящий реактор?	26
Что такое реактор с водяным охлаждением под давлением?	27
Что такое бридер?	28

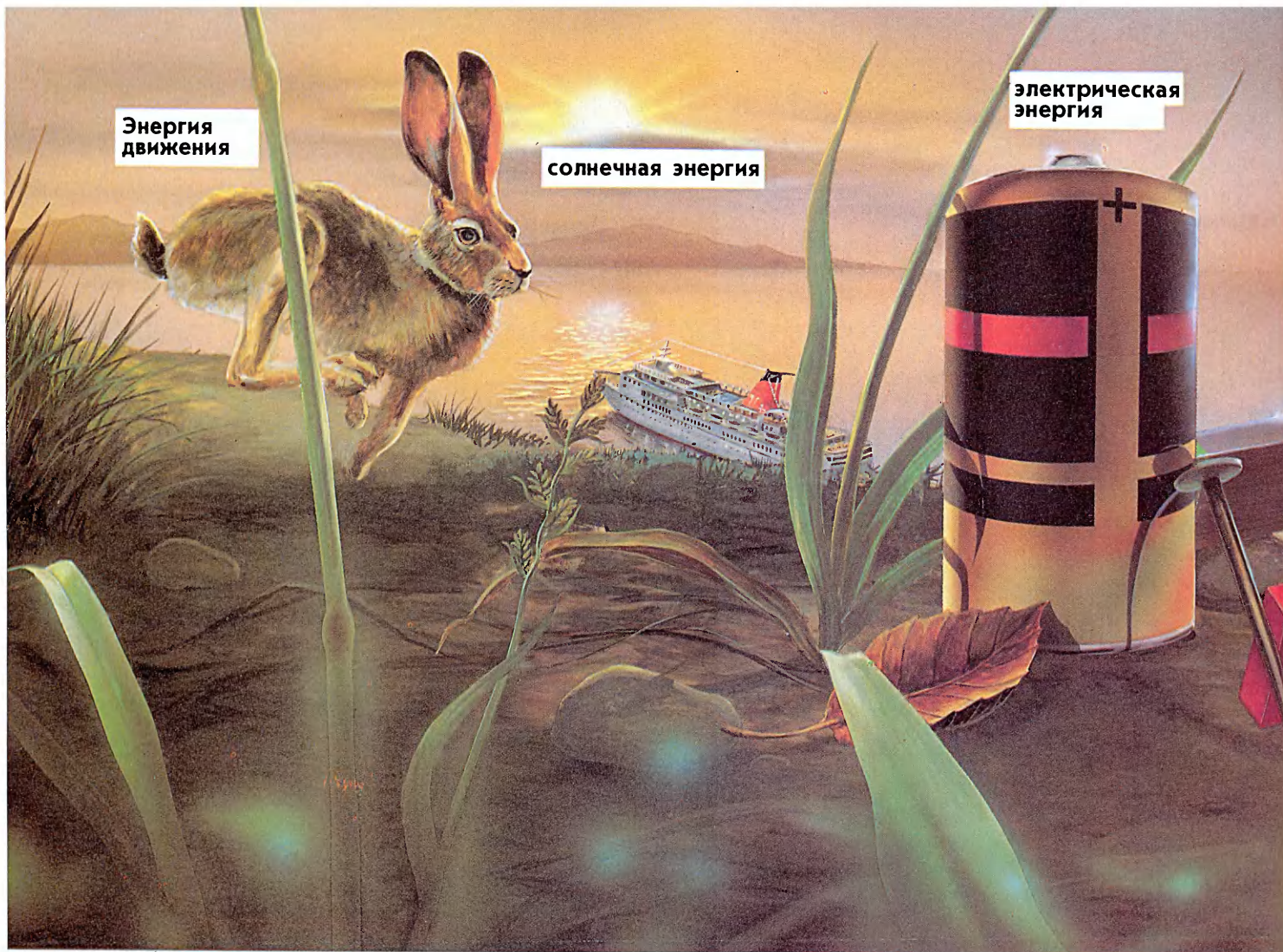
Как работает высокотемпературный реактор?	30
Правда ли, что ядерный синтез – главный источник энергии XXI века?	30

Круговорот топлива

Добыча урана – ликвидация и регенерация отработанного ядерного топлива	
Что понимают под круговоротом ядерного топлива?	32
Как добывают уран?	33
Как получают обогащенный уран?	33
Как изготавливают тепловыделяющие элементы?	35
Как транспортируют отработанные топливные стержни?	35
Что происходит с отработанными тепловыделяющими элементами?	36
Что такое регенерационная установка?	37
Куда сбрасывают радиоактивные отходы?	38
Как обеспечить безопасное хранение радиоактивных отходов?	38
Рентабельна ли ядерная энергия?	40

Ядерная энергия и окружающая среда

Опасны ли атомные электростанции?	41
Загрязняют ли атомные электростанции окружающую среду?	43
Опасны ли регенерационные установки?	44
Насколько безопасно захоронение отходов ядерного топлива?	44
Оказывают ли градирни влияние на погоду?	45
Могут ли быть опасны для нас ядерные реакторы других стран?	46
Может ли атомная электростанция стать атомной бомбой?	46
Что такое атомная бомба?	46
Что такое водородная бомба?	47
Как мог бы выглядеть мир после ядерной войны?	47
Следует ли мне выступать за или против ядерной энергии?	48



Энергия может накапливаться в различных формах.

Энергия и общество

Мы часто употребляем слово «энергия».

**Что
такое
энергия?**

О сорте шоколада говорят, что он хорошо компенсирует затраты энергии, о полном сил человеке — «сгусток энергии», а учителей и воспитателей призывают энергичнее принимать меры. Ученые занимаются физикой высоких энергий, политики и экономисты обсуждают использование энергии солнца, ветра и атомного ядра. Но даже специалистам трудно сказать, что же это такое — энергия!

Весьма близким к истине было бы опре-

деление энергии как запасенной работы или способности совершать работу. Итак, энергия необходима для того, чтобы начать какое-либо движение, ускорить перемещение, что-то поднять, нагреть и осветить. Без энергетической подпитки невозможна любая жизнедеятельность, не двигаются автомобили, не работает отопление. Энергия не может ни возникнуть из ничего, ни исчезнуть бесследно. Но она может быть получена из природных ресурсов, таких как уголь, природный газ или уран, и превращена в удобные для нас формы, например в тепло или свет. В окружающем нас мире мы находим различные формы накопле-



ния энергии: вода в водохранилище обладает потенциальной энергией, движущийся автомобиль – энергией движения, натянутый лук – энергией натяжения, грозовые облака – электрической энергией, солнечные лучи – световой, нефть – химической, а в уране накоплена ядерная энергия, которой и посвящена эта книга.

Длину измеряют в метрах или сантиметрах, время – в секундах, минутах или часах. Существуют и единицы измерения энергии. Наиболее известная из них –

**Как
измеряют
энергию?**

киловатт-час (кВт·ч) используется, в частности, в домашнем хозяйстве для измерения расхода электроэнергии. Другие важные единицы – джоуль (Дж),

ватт-секунда (Вт·с), тонна условного каменноугольного топлива (т·УКТ). 1 т·УКТ соответствует энергии, выделяющейся при сжигании 1 тонны каменного угля среднего качества.

Единицы измерения энергии

1 джоуль (Дж)
1 ватт-секунда (Вт·с) = 1 Дж
1 киловатт-час (кВт·ч) = 3600000 Вт·с
1 т условного каменноугольного топлива (т УКТ) = 8141 кВт·ч

Килокалория (ккал) – единица измерения энергии, известная каждому человеку, следящему за своей фигурой. Официально она, правда, отменена, но еще не скоро исчезнет из нашего лексикона. Мы должны познакомиться еще с одним важным понятием – *мощность*. Под мощностью электростанции понимают выработку электроэнергии за единицу времени, например за час. Значение мощности на электронном приборе показывает, сколько энергии он потребляет за час.

Единицы измерения мощности

1 ватт (Вт)
1 киловатт (кВт) = 1000 Вт
1 мегаватт (МВт) = 1 000 000 Вт =
= 1000 кВт

Электрообогреватель мощностью 2 кВт потребляет 2 кВт·ч электроэнергии, атомная электростанция мощностью 1000 МВт, или 1 000 000 кВт, вырабатывает 1 000 000 кВт·ч.

Часто электрический ток путают с электроэнергией и говорят о потреблении «электричества», имея в виду затраты электроэнергии. И если мы в этой книге иногда используем понятие электричества как одной из форм энергии, то лишь для того, чтобы облегчить понимание.

Для удовлетворения нашей потребности в энергии существуют три большие группы энергоносителей. Горючие ископаемые (уголь, нефть, природный газ) представляют собой преимущественно остатки животных и растений, существовавших на Земле миллионы лет назад. При переработке в энергию эти ресурсы теряются безвозвратно. Поскольку из такого сырья можно получать очень важные продукты — медикаменты, удобрения, пластмассы и красители, то попросту сжигать их, отравляя к тому же атмосферу продуктами сгорания, слишком

Какие существуют источники энергии?

жалко.

Восстанавливаемые источники энергии (солнце, ветер, гидроэнергия, приливы, подземное тепло) возобновляются без человеческого участия естественным образом, не загрязняя при этом окружающую среду. К сожалению, при современном уровне развития техники этих источников явно не хватает для покрытия все возрастающих потребностей человечества в энергии.

Ядерное топливо (уран, плутоний) открывает нам доступ к гигантским энергиям, скрытым в атомном ядре. Из 1 кг угля можно получить 8 кВт·ч, а из 1 кг урана-235 — 23 000 000 кВт·ч тепла. Поскольку ядерное топливо в отличие от

Для удовлетворения нашей потребности в энергии существуют три основных источника: ископаемые энергоносители, восстанавливаемые ресурсы и ядерное сырье.

Ископаемое топливо

уголь

природный газ

нефть

Ядерная энергия

нейтрон

криптон-90

барий-144

уран-235

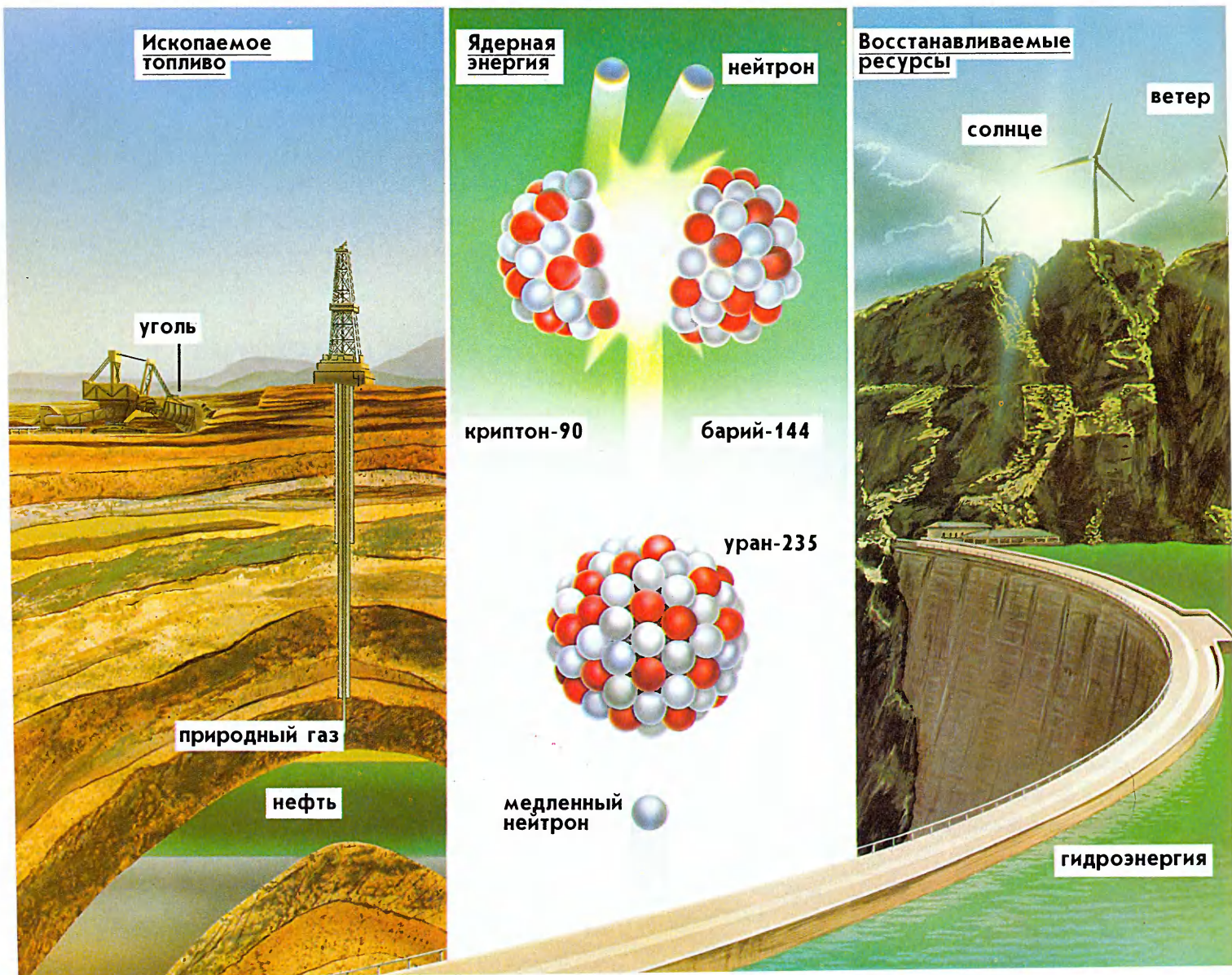
медленный нейтрон

Восстанавливаемые ресурсы

солнце

ветер

гидроэнергия





горючих ископаемых не используется в химической промышленности, его можно без всяких угрызений совести использовать для выработки энергии. Однако неправильное обращение с ним может привести к катастрофам, масштаб которых трудно даже представить. Кроме того, его можно использовать и для изготовления бомб, способных уничтожить жизнь на Земле. В то же время, как мы увидим ниже, при полном соблюдении правил эксплуатации атомные электростанции очень незначительно загрязняют окружающую среду, так как выделяют минимальные количества вредных веществ.

Первичные энергоносители – это сырьевые материалы в их естественной форме до проведения какой-либо технологической обработки, например каменный уголь, нефть, природный газ и урановая руда. В разговорной речи эти материалы называют просто «первичной энергией». Солнечное излучение, ветер, водные ресурсы – все это тоже первичная энергия.

Вторичная энергия – это продукт переработки, «облагораживания» первичной энергии, например электричество, бензин, мазут.

Та энергия, которая попадает непосредственному потребителю, именуется *конечной энергией*. Чаще всего это вторичная энергия – электричество или мазут, но иногда конечная энергия бы-

Некоторые примеры первичной, вторичной и полезной энергии.

вает и первичной, например дрова, солнечное излучение или природный газ. К сожалению, использовать конечную энергию полностью невозможно, и до потребителя доходит только ее часть, именуемая полезной энергией. Примерами полезной энергии могут быть свет лампы, приводная энергия на валу машины или тепло, выделяемое электрообогревателем.

Самая большая доля затрат конечной

Кто расходует большую часть энергии?

энергии приходится на домашнее хозяйство, то есть на удовлетворение наших личных потребностей. Окружающие нас в быту предметы – кухонные плиты, светильники, телевизоры, пылесосы, обогреватели и автомобили – требуют постоянного притока энергии. И только на втором месте по затратам энергии стоит промышленность. Далее следуют такие мелкие потребители, как фермеры, ремесленные мастерские, частнопрактикующие врачи. Последнее место по энергозатратам занимает общественный транспорт: автобусы, поезда, самолеты и корабли. Откуда же взять столько первичной энергии? В ФРГ, например, большая часть энергии вырабатывается из нефти (около 42%), из каменного угля и природного газа. Ядерная энергия в 1988 году покрывала

чуть меньше 12% суммарных энергозатрат страны. В производстве электроэнергии ее доля в 1984 году составляла 25%, а в 1989 году уже 38% (во Франции – 75%). В Германии в 1990 году эта доля составила около 33%.

Мировое потребление первичной энергии за год составляет

Истощаются ли энергоресурсы Земли?

в настоящее время около 12 миллиардов т·УКТ, и оно неуклонно растет, так как растет население Земли и его потребность в энергии. Мировые же запасы в доступных на сегодняшнем уровне развития техники месторождениях угля составляют 640 миллиардов т·УКТ, нефти и газа – 226 миллиардов т·УКТ. Легко подсчитать, что эти запасы должны истощиться в течение ближайших 100 лет. Кроме того, запасы горючих ископаемых в еще не разведанных месторождениях оцениваются в 8000 миллиардов т·УКТ, но реальная добыча даже с учетом совершенствования ее технологии составит порядка 2000 миллиардов т·УКТ по углю и 731 миллиард т·УКТ по нефти и природному газу. Этих запасов хватило бы еще на 2–3 столетия, но тогда далекие наши потомки были бы безвозвратно лишены этих энергоносителей, а продукты их сгорания нанесли бы колоссальный ущерб окружающей среде.

Прогнозируемые объемы запасов технологически доступного урана на планете – около 153 миллиардов т·УКТ – на первый взгляд смехотворно малы. Однако с помощью современных технологий, например так называемых бродерных реакторов, из этого сырья можно выделить 9180 миллиардов т·УКТ ядерного топлива. Таким образом, у нас есть еще запас ядерной энергии на тысячу лет, но и этого маловато в масштабах Земли.

Для более далекого будущего должны открыться новые резервы энергии.

Мировые запасы источников энергии на 1988 год

Доступные на нынешнем технико-экономическом уровне

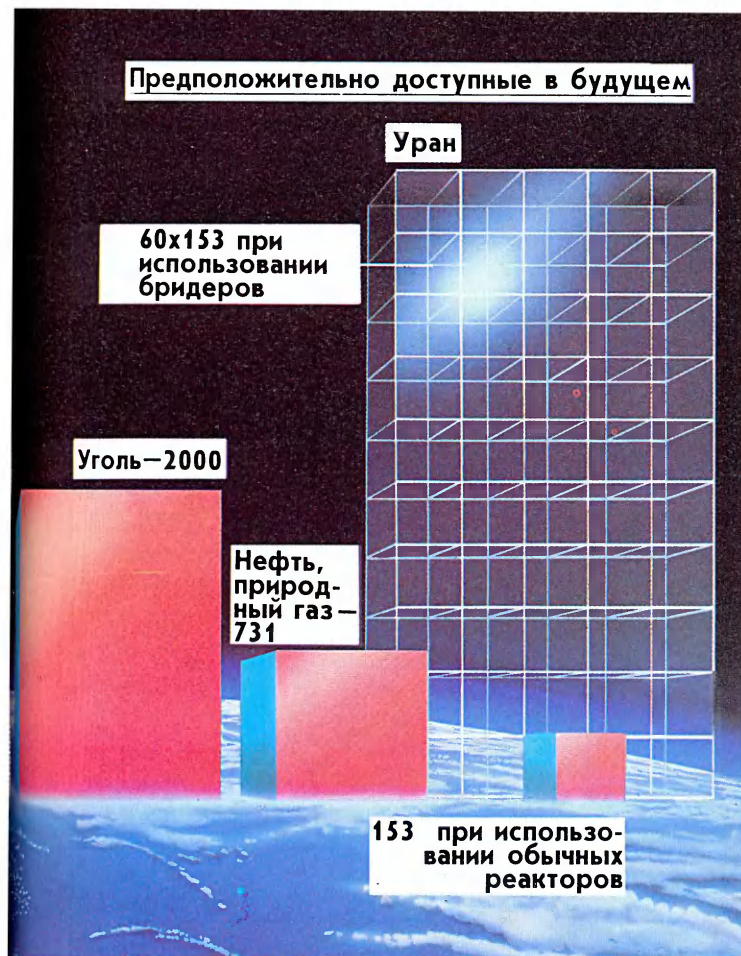


Вполне вероятно, что наряду с солнечной энергией важную роль будет играть новый источник ядерной энергии – ядерный синтез. Это главный источник гигантской энергии не только Солнца и других звезд, но и страшной водородной бомбы. Сырье для этого синтеза практически неисчерпаемо, стоит только вспомнить о запасах воды в Мировом океане. Таким образом, ядерная энергия наряду с солнечной дает нам наиболее реальные шансы для экономического благосостояния в перспективе, но только тогда, когда будут решены проблемы безопасности окружающей среды.

Камень, легковой автомобиль, наручные

Что такое материя?

часы и человек имеют одно общее свойство: они обладают массой. Она связана не только с весом тел, но и с их инертностью, то есть с сопротивлением,



Мировые запасы различных источников энергии. При использовании так называемых реакторов-размножителей на быстрых нейтронах нам хватило бы энергии на целое тысячелетие.

Одна из важнейших формул теории относительности Эйнштейна имеет вид

Можно ли превратить материю в энергию?

$E = mc^2$, где E — энергия, m — масса, c — скорость света. Смысл ее в том, что

при определенных условиях некоторая масса может превратиться в колоссальную энергию. Материю при этом можно рассматривать как одну из форм энергии, которая может быть переведена в другие виды, например в тепло или свет. В дальнейшем мы убедимся, что в ядерных реакторах удастся превратить в теп-

которое мы ощущаем при попытке сдвинуть предмет с места или остановить его движение. Все, что имеет массу, есть материя. Раньше полагали, что масса не может ни возникнуть, ни исчезнуть. Например, при сгорании куска угля продукты сгорания весят (в пределах точности измерений) столько же, сколько и исходные вещества, то есть уголь и затраченный на горение кислород. Долго считалось, что суммарная масса остается неизменной.

Уголь — энергоноситель, который обладает определенной массой. Однако есть и энергоносители, не имеющие массы, например световые волны.

До начала нашего века полагали, что масса и энергия принципиально разные вещи и поэтому их взаимопревращение исключено. Но тут явился Альберт Эйнштейн, один из величайших мыслителей всех времен, и показал, что материя является лишь одной из возможных форм энергии.



Великий физик Альберт Эйнштейн.

ловую энергию лишь небольшую часть массы топлива.

Из одного килограмма урана-235 можно по этой формуле получить 23 000 000 кВт · ч энергии, для выработки чего понадобились бы 93 вагона угля или 67 цистерн жидкого топлива по 30 тонн в каждой. Этой энергии хватило бы для освещения домов всех жителей ФРГ от Фленсбурга до Оберstdорфа в течение целого часа. С другой стороны, энергии одного килограмма урана-235 в одной

атомной бомбе хватило для превращения города Хиросимы в развалины.

Итак, материя – это форма энергии, которая может быть превращена в другие виды энергии. Строго говоря, при сжигании куска угля тоже происходит небольшая потеря массы. Но процесс превращения массы в энергию в значительных масштабах характерен только для определенных видов атомных ядер, при расщеплении или синтезе которых выделяются действительно гигантские энергии.



В одном килограмме урана-235 заключается столько же энергии, как и в 93 вагонах угля или 67 цистернах жидкого топлива. Этой энергии (23 000 000 кВт · ч) хватило бы всем жителям ФРГ на освещение их квартир в течение часа.



Еще 2000 лет назад древние греки интересовались строением материи.

Мир атомных ядер

Об атомах начали говорить уже более 2000 лет назад.

**Что
такое
атом?**

Один из величайших ученых Древней Греции Демокрит полагал, что вся материя состоит из мельчайших неделимых частиц, которые он назвал атомами. При этом он оказался на удивление близок к истине. Многие другие греческие ученые и философы тоже занимались в те времена проблемами материи и Вселенной. С большой точностью древние греки определили

объем Земли, они знали расстояние от Земли до Луны и догадывались, что наша планета обращается вокруг Солнца. Впоследствии эти знания были в Европе надолго забыты. В течение многих веков людей больше занимали империи, войны, соборы и суды над ведьмами.

Лишь на рубеже XIX века снова стали обсуждать старую идею об атомах. Окрепла убежденность в том, что существуют различные виды атомов — иначе трудно было бы объяснить обнаруженное в природе разнообразие веществ и

явлений. В 1803 году английский учитель Джон Дальтон открыл существование веществ, состоящих из атомов только одного вида. Их назвали химическими элементами. К ним относятся золото, железо, кислород... Чистое железо состоит только из атомов железа, чистое золото — из атомов золота. Атом железа является наиболее мелкой частицей железа. Его, правда, можно разбить на части, но эти части не будут обладать свойствами железа. То же относится к золоту и другим химическим элементам. Поэтому во многих книгах по химии дают такое определение атома: «Атом — это мельчайшая частица химического вещества или элемента, которая не может быть разделена на более мелкие части без потери типичных свойств этого элемента».

Атомы имеют разную массу, самый легкий из них атом водорода, атомы железа существенно тяжелее, а особенно важный для нашей темы атом урана еще тяжелее. По сравнению с предметами нашего обихода размеры атомов ничтожно малы. Если бы человек был размером с атом, то 100 миллионов человек могли бы с удобством разместиться в одной булавочной головке. Все население Земли, насчитывающее 5 мил-

лиардов, выстроившись, образовало бы цепочку длиной около 50 сантиметров.

В 1913 году великий датский физик Нильс Бор опубликовал

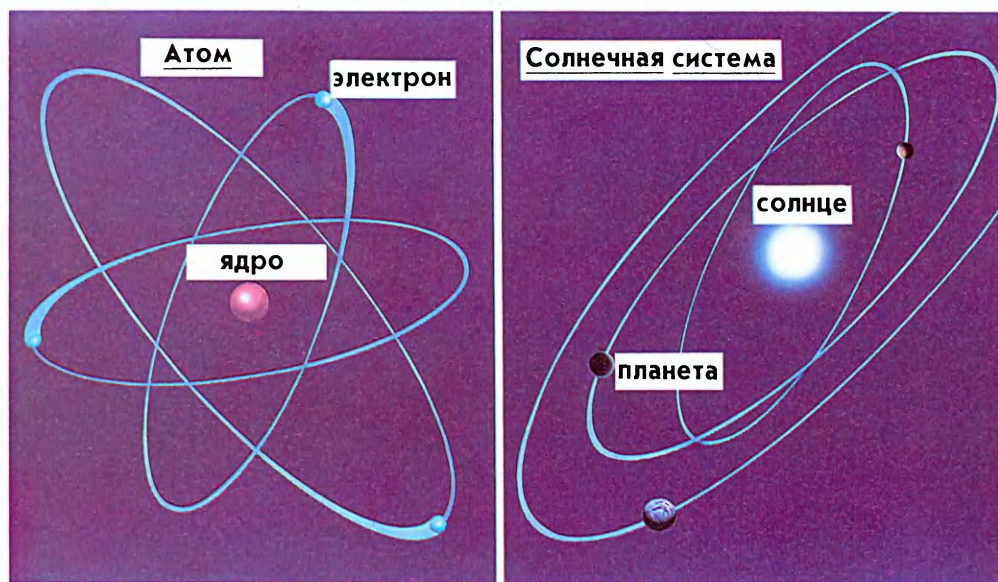
Как устроен атом?

свою знаменитую модель атома, которая и до сегодняшнего дня остается хорошим приближением к истине. Согласно этой модели

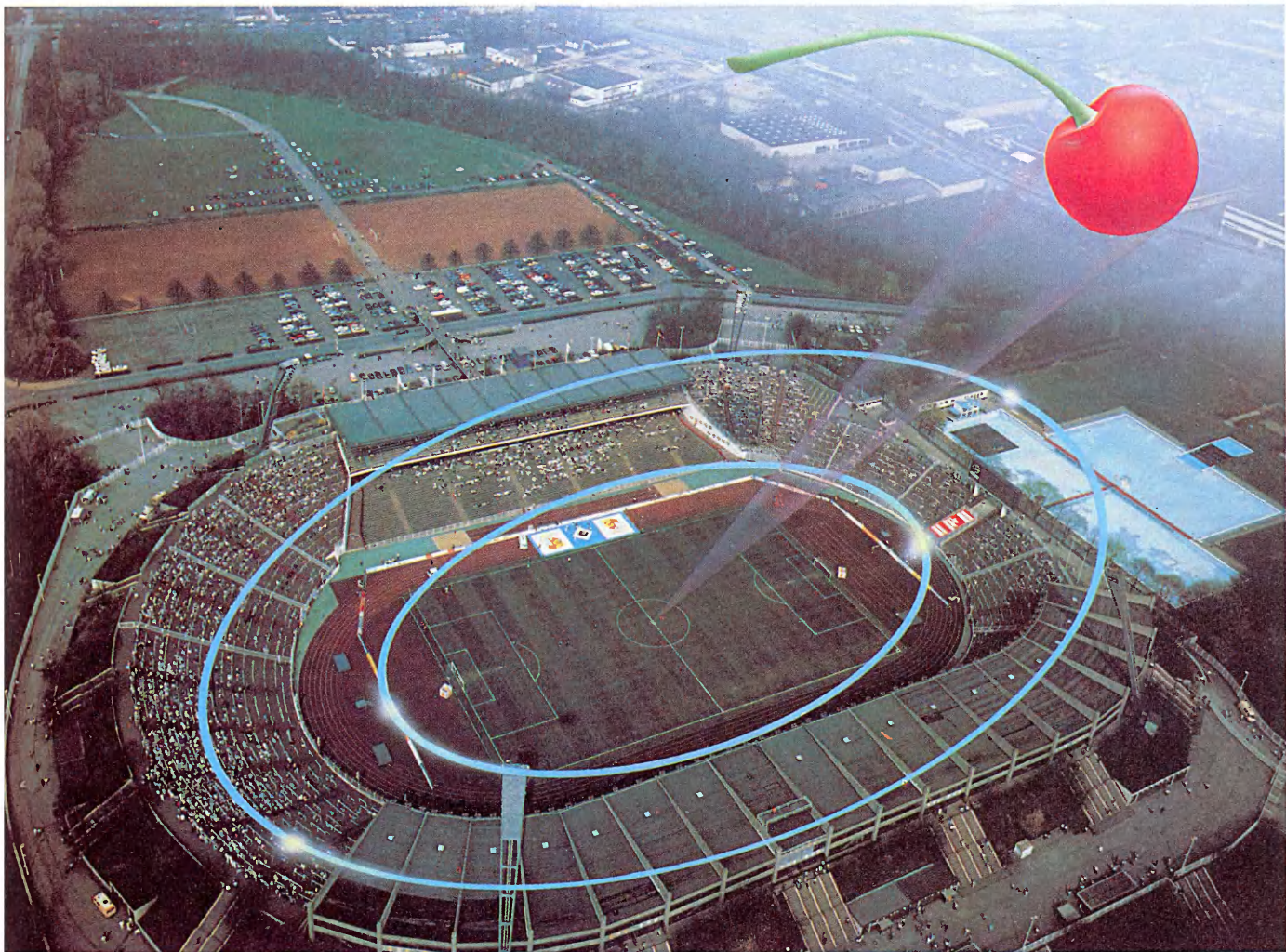
структура атома очень похожа на строение Солнечной системы: как вокруг Солнца вращаются планеты — Меркурий, Венера, Земля, Марс и другие, так и в центре атома находится маленькое, но очень тяжелое **атомное ядро**, вокруг которого на огромном расстоянии вращаются маленькие легкие **электроны**.

Ядро имеет положительный электрический заряд, а электроны — отрицательный. Они удерживаются на орбитах вокруг ядра силами электрического притяжения аналогично тому, как Солнце силой тяготения удерживает вокруг себя планеты.

Чтобы представить себе размер атомных ядер, рассмотрим следующее сравнение: капля воды состоит примерно из $6 \cdot 10^{21}$ или 6 000 000 000 000 000 000 000



В Солнечной системе (справа) планеты обращаются вокруг Солнца. В атоме (слева) электроны обращаются вокруг атомного ядра, которое заряжено положительно и притягивает отрицательно заряженные электроны.



Если представить себе атомное ядро в виде вишни, то орбиты обращающихся вокруг него электронов в этом масштабе будут сравнимы с размером футбольного стадиона.

атомов, а само ядро занимает всего $1/1\,000\,000\,000\,000$ объема атома!

Если бы ядро было величиной с вишней, то размеры атома были бы сравнимы с футбольным стадионом, а орбиты электронов находились бы на уровне верхних трибун. Несмотря на то, что ядро занимает всего одну триллионную часть атома, на него приходится почти вся его масса.

Материя в ядре очень сильно уплотнена: в том случае, если ядро было бы размером с вишню, вишня эта весила бы приблизительно 30 миллионов тонн и, обладая такой массой, конечно, не смогла бы лежать посреди стадиона, а провалилась бы к центру Земли.

Ядра атомов состоят из двух видов частиц, называемых

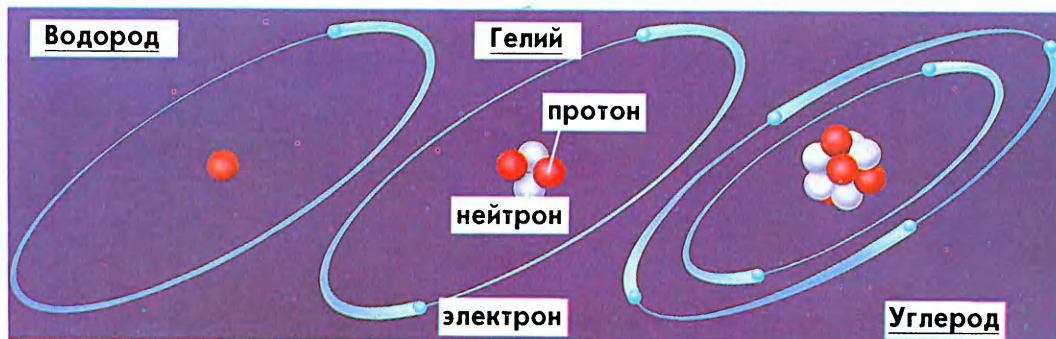
**Из чего
состоят
атомные
ядра!**

протонами и нейтронами. Они примерно равны по массе — приблизительно в 2000 раз

тяжелее электрона.

Протон обладает положительным электрическим зарядом, равным по величине отрицательному электрическому заряду электрона. Величина эта называется элементарным зарядом. Нейтрон, как и следует из его названия, электрически нейтрален.

Протоны и нейтроны, которые в свою очередь состоят из еще более мелких частиц кварков, иногда называют общим термином нуклоны или ядерные элементарные частицы.



В атоме водорода 1 протон, гелия — 2, углерода — 6. Протоны окрашены здесь в красный цвет, нейтроны в белый.

Как различают элементы?

Атомные ядра различных элементов отличаются по количеству протонов в них. Например, атомы водорода имеют один протон в ядре, гелия — два, углерода — 6, урана — 92. Если в ядре атома 6 положительно заряженных протонов, то в вокруг него вращаются 6 отрицательно заряженных электронов, так что атом в целом электрически нейтрален. Если этот атом потеряет один электрон, то на 6 протонов останется 5 электронов и атом приобретет заряд +1. Такие заряженные атомы называются ионами.

Что такое изотоп?

Хотя все атомы одного элемента имеют одинаковое количество протонов и электронов, они могут тем не менее различаться между собой, то есть иметь разное число нейтронов.

Для подтверждения этих слов рассмотрим следующий пример. Самый легкий и наиболее простой элемент, водород, имеет 3 разные формы: в их ядрах нахо-

дится, соответственно, 0, 1 и 2 нейтрона. Обычный водород имеет 1 протон и ни одного нейтрона в ядре. Другая форма водорода, — дейтерий, — 1 протон и 1 нейтрон, а тритий — 1 протон и 2 нейтрона. Эти три разновидности атомов называют изотопами элемента водорода.

Вообще изотопами определенного элемента называют атомы, в ядре которых находится одинаковое количество протонов и разное — нейтронов. В природе, например, встречаются изотопы урана с 234, 235 и 238 нуклонами в ядре; их обозначают, соответственно, U-234, U-235 и U-238. При этом, как мы уже выяснили, все урановые ядра содержат по 92 протона.

Таким образом, в изотопах урана может быть 142, 143 или 146 нейтронов. Суммарное количество нуклонов в изотопе называют его массовым числом, количество протонов — порядковым или атомным номером.

Таким образом, массовое число изотопа урана U-235 составляет 235, а порядковый номер — 92. Изотоп водорода дейтерий — массовое число 2 и порядковый номер 1.



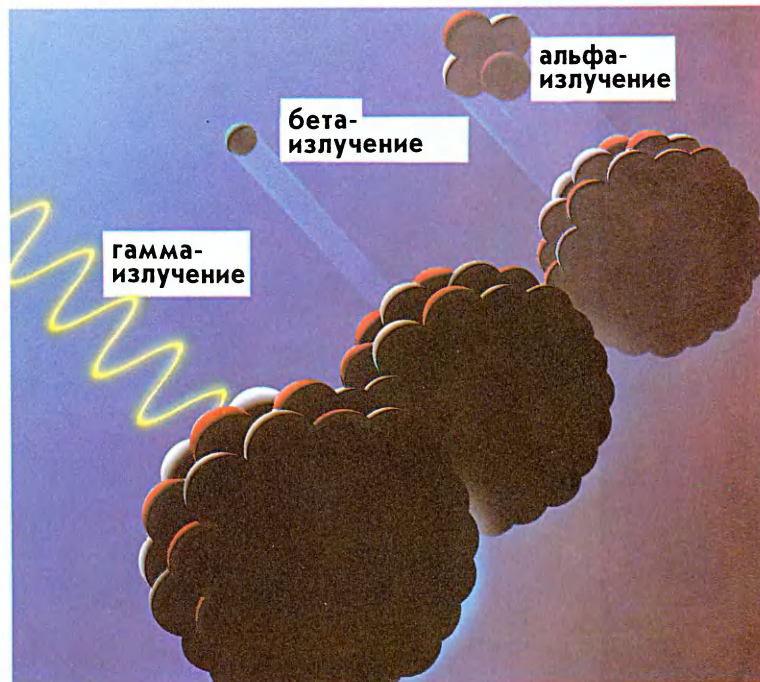
Три изотопа водорода: у обычного водорода в ядре 1 протон, у дейтерия — 1 протон и 1 нейтрон, у трития — 1 протон и 2 нейтрона

Известно, что два положительно заряженных тела отталкиваются друг от друга, то же самое наблюдается в случае двух отрицательных зарядов, тогда как положительный и отрицательный взаимно притягиваются. Так, положительно заряженные ядра притягивают отрицательные заряды электронов и удерживают их на орбите. Однако ядра атомов состоят из нейтральных и положительно заряженных частиц, и они должны были бы взорваться изнутри вследствие взаимного отталкивания протонов. Почему же не лопаются, например, атом углерода, ядро которого содержит 6 протонов? А связано это с наличием иных механизмов взаимодействия между нуклонами, более мощных, чем электрические силы. Эти силы, именуемые ядерными, действуют только при минимальных расстояниях между нуклонами.

Почему не лопаются ядра атомов?

Не у всех элементов ядра такие стабильные, как у углерода. Многие ядра могут неожиданно распадаться, выбрасывая с огромной энергией свои части и претерпевая значительные превращения. Это явление называют *радиоактивностью*. Оно было открыто французским физиком Анри Беккерелем и затем подробно изучено супругами Пьером и Марией

Что такое радиоактивность?



Альфа-излучение состоит из ядер гелия, бета-излучение — из электронов, гамма-излучение — из квантов. Оно родственно световому или рентгеновскому излучению.

Кюри. Долгое время никто толком не мог понять, что же такое радиоактивность.

До этого было известно, что некоторые элементы испускают таинственные лучи, которые, например, засвечивают фотопластинки, но прошло немало лет, пока наука постигла истинную природу излучения.

Сегодня мы знаем, что есть три вида естественного радиоактивного излучения: *альфа-излучение* состоит из ядер гелия; *бета-излучение* — из электронов, *гамма-излучение* — из гамма-частиц, или гамма-квантов, не имеющих массы и родственных свету и рентгеновскому излучению. Однако каждый гамма-квант несет в себе гораздо больше энергии, чем квант света или рентгеновского излучения.

Антуан-Анри Беккерель и Мария Кюри. Беккерель открыл в 1896 году явление радиоактивности, супруги Кюри изучали его.

Некоторые атомные ядра, особенно крупные и массивные, нестабильны и склонны к распаду, подобно тому как склонно к разрушению большое здание

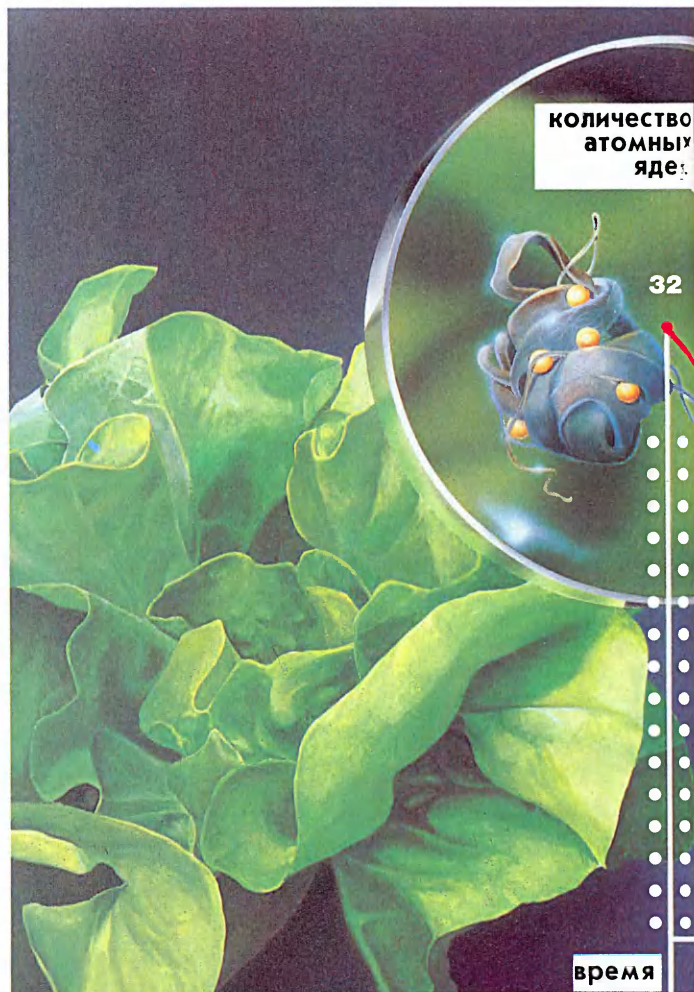
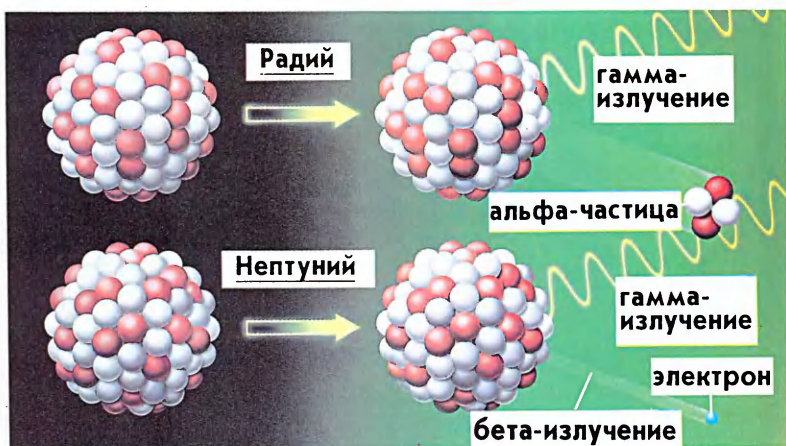
Как распадаются атомные ядра?

со слишком тонкими стенами. Например, ядро радия охотно испускает фрагмент, состоящий из двух протонов и двух нейтронов, то есть альфа-частицу. Однако после потери двух протонов это ядро перестает быть ядром радия. Это уже новый элемент – радон.

Другие ядра расщепляются, испуская электрон, или, как его раньше называли, бета-частицу. Для этого нейтрон в ядре расщепляется на протон и электрон, который вылетает из ядра. В результате этого в ядре появляется дополнительный протон, то есть опять-таки происходит превращение одного элемента в другой. Часто бывает так, что вновь образовавшийся элемент также оказывается нестабильным и в свою очередь расщепляется.

Таким образом возникают целые ряды элементов («радиоактивные семейства»), оканчивающиеся образованием стабильного элемента. Например, уран превращается в свинец через 13 промежуточных ступеней.

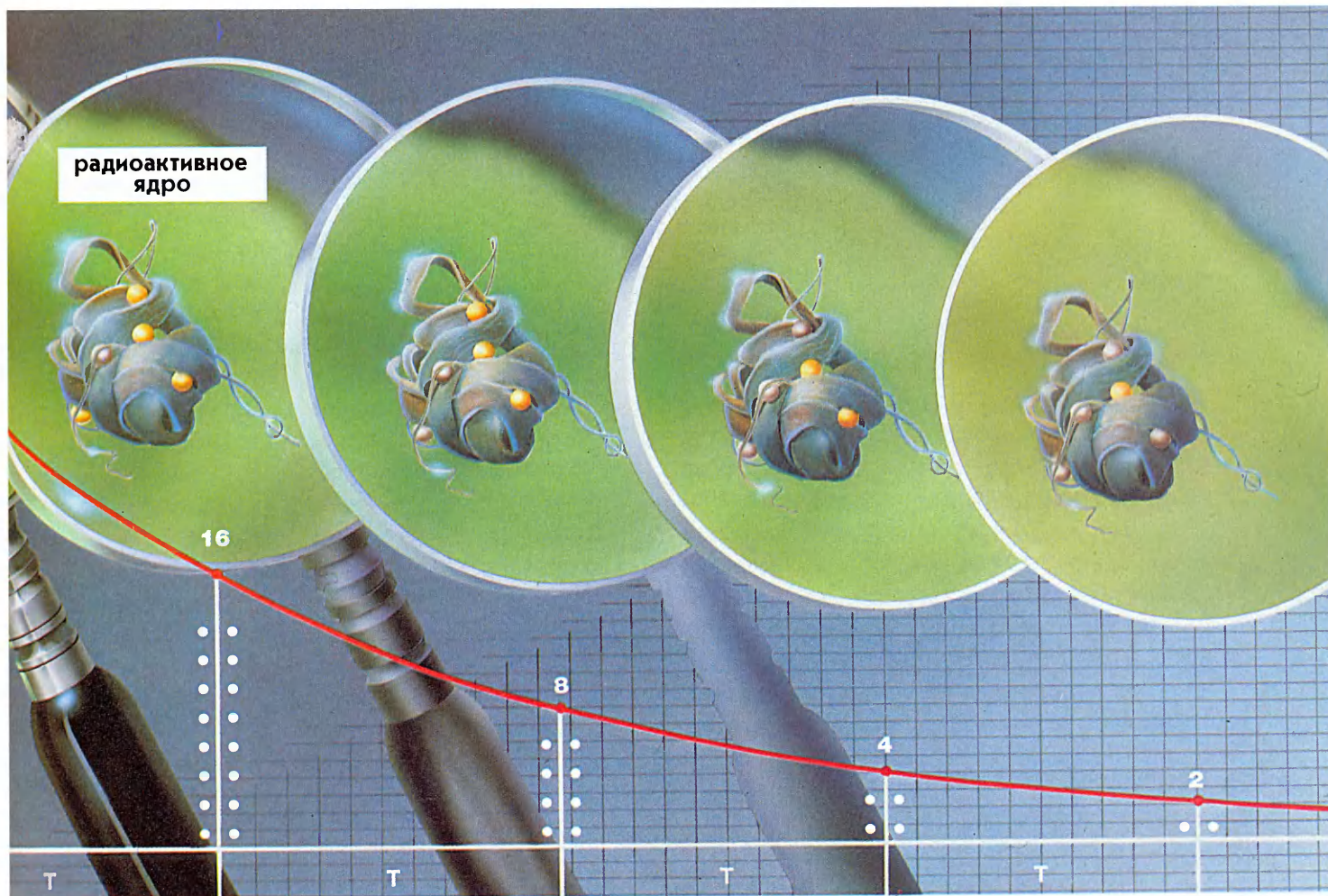
Радий при расщеплении испускает альфа- и гамма-излучение, нептуний — гамма- и бета-излучение. Их ядра при этом превращаются в ядра других элементов.



Никто не может угадать, когда произойдет распад каждого

Что понимают под периодом полураспада?

конкретного атомного ядра. Если наблюдать за определенным ядром радия, то его распад может произойти через секунду, а может и завтра или через 10 000 лет. Но одно можно предсказать наверняка: если у вас есть большое число радиевых ядер, например 100 000, то 50 000 из них, то есть половина, распадутся ровно через 1620 лет. У урана-238 этот период равен 4,5 миллиарда лет. Время, за которое распадается половина всех ядер радиоактивного изотопа, называется периодом полураспада этого изотопа. Для урана-238 он, как мы узнали, составляет 4,5 милли-



арда лет. У полония период полураспада гораздо короче – 138 суток, у франция всего 21 минута. По истечении двух периодов полураспада остается всего $1/2 \times 1/2 = 1/4$, а через 10 периодов полураспада – $1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 = 1/1024$ исходного количества радиоактивных ядер. Итак, от одного килограмма радия через 10×1620 лет останется около 0,98 грамма.

Под активностью радиоактивного элемента понимают количество распадов ядер в секунду. Единица измерения активности – беккерель (Бк) – названа именем первооткрывателя радиоактив-

Что понимают под активностью и дозой облучения?

Период полураспада T представляет собой отрезок времени, за который распадается половина исходного количества ядер. Из 32 миллионов атомных ядер по истечении T останется 16 миллионов, через $2T$ – 8 миллионов, через $3T$ – 4 миллиона.

ности. Если в каком-то образце вещества распадается 403 ядра в секунду, то его активность составляет 403 Бк. Раньше единицей измерения активности был кюри (Ки): $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$. Излучение, возникающее при ядерных превращениях, частично или полностью поглощается (абсорбируется) окружающим веществом. Энергия радиоактивного излучения, поглощенная одним килограммом облученного вещества, называется поглощенной дозой. Она измеряется в греях (Гр): $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$. Раньше была принята единица измерения рад ($1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр} = 1/100 \text{ Гр}$). Поглощенная доза в $1/100 \text{ Гр}$ соответ-



Измерение радиоактивности осуществляется так называемыми счетчиками Гейгера.

ствует повышению температуры человеческого тела всего на $0,0001^{\circ}\text{C}$, но получение этой дозы за короткое время может нанести организму значительные повреждения, поскольку при этом в организме разрушаются жизненно важные молекулы.

Биологическое воздействие облучения зависит не только от поглощенной дозы, но и от вида излучения. Например, 1 Гр альфа-излучения в 20 раз опаснее, чем 1 Гр бета-излучения. Поэтому было введено понятие *эквивалентной дозы*, которое учитывает степень опасности различных видов излучения для живых существ. Единица эквивалентной дозы называется *зиверт* (Зв). До 1985 года использовали другую единицу – *рем*: $1 \text{ рем} = 10^{-2} \text{ Зв}$. Она часто упоминается в старых книгах о ядерной энергии. 20 Зв альфа-излучения соответствуют 1 Гр альфа-излучения, или 20 Гр бета- или гамма-излучения.

Активность	=	$\frac{\text{Число распадов ядер}}{\text{Время}}$
Единица измерения: 1 Бк	=	$\frac{1 \text{ распад}}{\text{секунда}}$
Поглощенная доза	=	$\frac{\text{Поглощенная энергия излучения}}{\text{Масса}}$
Единица измерения: 1 Гр	=	1 Дж/кг
Эквивалентная доза	=	Биологически активная поглощенная доза
Единица измерения: 1 Зв	=	1 Дж/кг

Мы уже познакомились с атомными ядрами, которые способны расщепляться самопроизвольно. В 1938 году двое немецких ученых Отто Ган и Фриц Штрассманн сделали еще одно замечательное открытие. При бомбардировке атомов урана нейтронами они обнаружили, что некоторые ядра расщепляются на две примерно равные части. Технические подробности нас здесь не интересуют, главное – расщепление ядер происходило не самопроизвольно, а под действием нейтронов, которые подобно мелким снарядам разбивали огромные ядра.

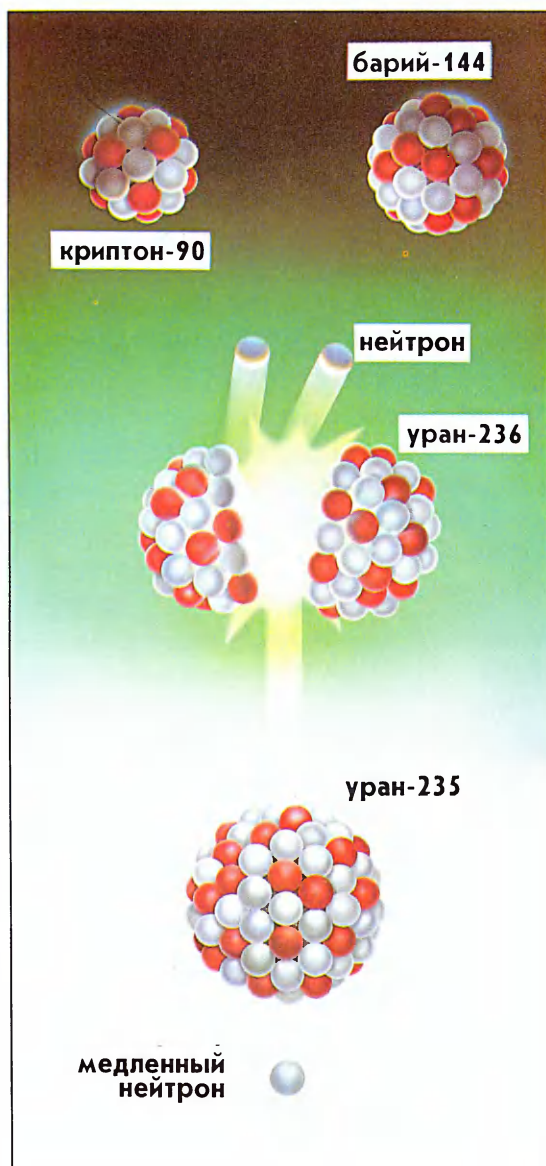
Можно ли расщеплять атомные ядра?

Поскольку нейтроны электрически нейтральны, их очень удобно использовать для бомбардировки атомных ядер с целью превращения их в другие ядра или расщепления. Положительно заряженный протон был бы для этого непригоден, потому что электрическое поле других протонов в бомбардируемом ядре будет отталкивать и, следовательно, отклонять его.

Почему нейтроны так удобны для бомбардировки ядер?

Электроны не обладают достаточной массой, чтобы оказать заметное воздействие на массивное ядро, и отталкиваются электронной оболочкой атома. У нейтрона нет этих недостатков. Он не отклоняется от своей цели и достаточно

тяжел, чтобы расщеплять ядра. Вскоре было замечено, что медленно летящие нейтроны, как правило, чаще попадают в ядра, чем быстрые. Как заметил один физик, быстрые нейтроны проносятся мимо ядер, «даже толком их не замечая». Продолжительность пребывания медленных нейтронов (их иногда называют тепловыми) вблизи ядер гораздо больше и у них, соответственно, гораздо больше времени для взаимодействия с ядром. По нашим меркам и эти нейтроны очень быстры: их скорость составляет приблизительно 2,2 км/с. Впрочем, при помощи нейтронов можно не только расщеплять ядра на осколки, но и осуществлять их превращения, если бомбардирующий нейтрон остается в составе ядра.



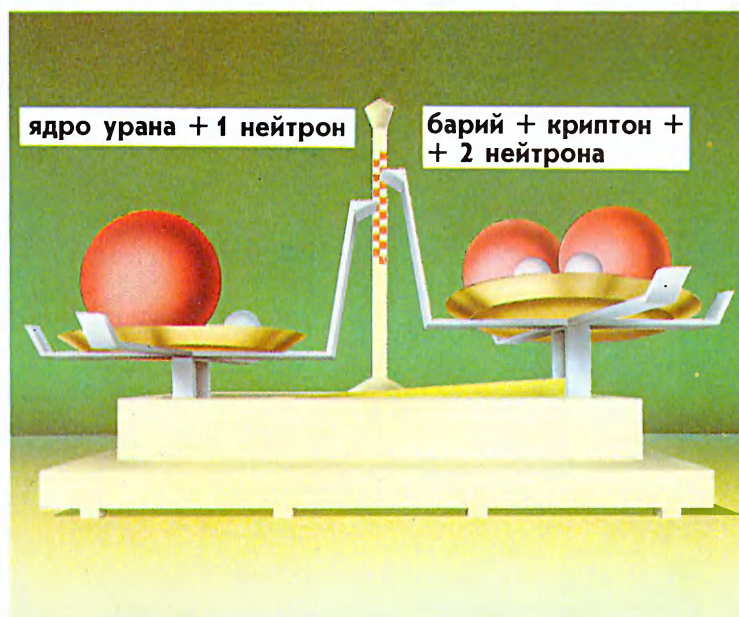
Природный уран состоит из трех изотопов: U-234, U-235 и U-238. Из 1000 атомов урана 993 относятся к U-238, 7 – к U-235, а содержание U-234 столь ничтожно, что им можно пренебречь.

Что происходит, когда расщепляют атом урана?

Медленные нейтроны расщепляют только ядра U-235. При этом сначала образуется промежуточный нестабильный изотоп U-236, который затем расщепляется на несколько осколков, например на ядра бария-144, криптона-90 и два нейтрона.

И тут мы подходим к открытию, которое дало миру ядерный реактор и атомную бомбу и изменило его: суммарная масса осколков оказалась меньше, чем суммарная масса исходного ядра и бомбардирующего нейтрона!

Таким образом, теряется масса, которая по эйнштейновской формуле $E = mc^2$



Исходное ядро и бомбардирующая частица имеют несколько большую суммарную массу, чем продукты распада. Разность масс образуется за счет превращения массы в энергию.

Медленные нейтроны расщепляют ядро урана-235 на более легкие атомные ядра, в данном случае на барий-144 и криптон-90. При этом испускаются 2 нейтрона. Продукты расщепления разлетаются с колоссальной энергией.

превращается в значительное количество энергии, а именно *ядерной энергии*. Можно также сказать, что частично высвобождается энергия связи, удерживавшая вместе все компоненты крупного ядра. Выделение этой энергии приводит к тому, что осколки разлетаются с огромной скоростью, сталкиваясь с другими ядрами, которые вследствие этого возбуждаются, движутся и трутся друг об друга. Тем самым энергия движения осколков превращается в тепло.

Подведем итог. При ядерном распаде происходит выделение значительной энергии. Из одного грамма урана-235 можно получить 23 000 кВт·ч. Часто при делении ядер отдельно вылетают два или три нейтрона, например при распаде промежуточного ядра U-236 на барий-144 и криптон-89. Это очень важно для осуществления цепных ядерных реакций.

К сожалению, возникающие при расщеплении урана ядра средней массы сами, как правило, радиоактивны и испускают опасные лучи. С этим явлением мы вновь встретимся позже, при обсуждении основной проблемы атомных электростанций – ликвидации отходов.

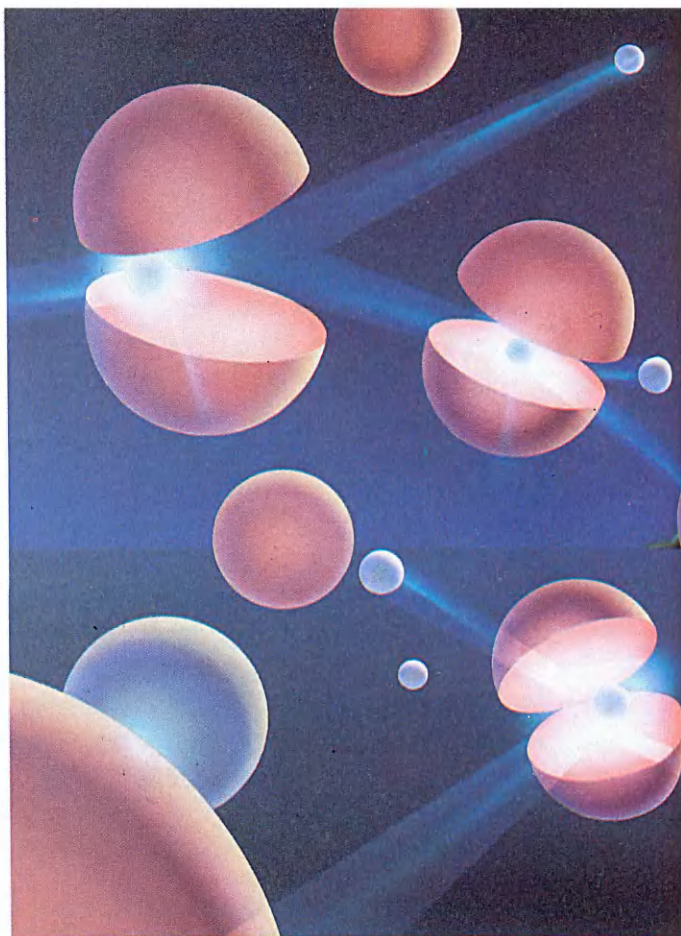
Чтобы расщепить ядра U-238 необходимы очень быстрые нейтроны. Медленные же хотя и проникают в ядро, но не расщепляют, а остаются в нем, образуя ядро U-239. Этот изотоп через промежуточное состояние превращается в плутоний-239, который в свою очередь легко расщепляется медленными нейтронами.

В большом куске урана-235 или плутония

Что такое цепная реакция?

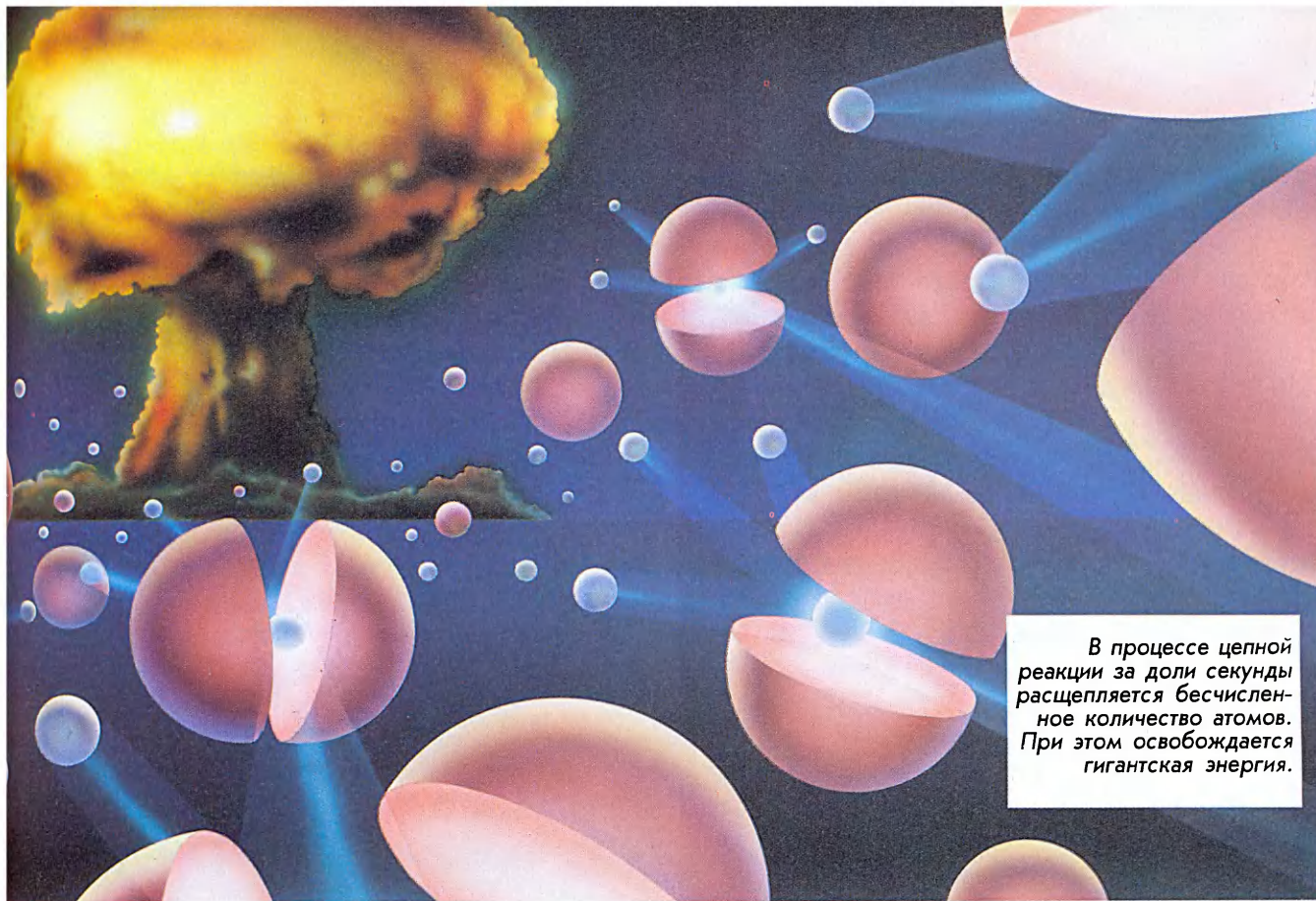
при бомбардировке нейтронами происходит следующее: после расщепления первого же ядра освобождаются 2 или 3

нейтрона, которые расщепляют следующие 2 ядра с выделением в среднем уже 5 нейтронов. Если из этих пяти хотя бы 4



нейтрона расщепят по ядру, то образуется уже от 8 до 12 свободных нейтронов, которые в свою очередь (с учетом некоторых потерь) расщепят новые ядра, причем каждый распад будет сопровождаться выделением огромной энергии. На этой стадии число свободных нейтронов возрастет до ~20, они вызовут новые распады ядер, короче говоря, за доли секунды количество расщепленных атомов, а значит, и количество выделенной энергии возрастает лавинообразно. Этот процесс называется *цепной реакцией*.

В описанном выше неконтролируемом варианте эта реакция протекает в атомной бомбе. Для того чтобы она произошла, необходима некоторая минимальная масса ядерного топлива, которую называют *критической массой*. Для урана-235 она составляет около 23 кг, что соответствует сфере диаметром 13 см. Если масса расщепляемого материала меньше, то слишком многие нейтроны вылетают наружу и теряются



В процессе цепной реакции за доли секунды расщепляется бесчисленное количество атомов. При этом освобождается гигантская энергия.

безвозвратно, не расщепляя при этом ядер.

К счастью, цепную реакцию можно держать под контролем, допуская лишь определенное число распадов в секунду. Именно таким образом она протекает в ядерных реакторах, о которых будет подробно рассказано в следующей главе нашей книги.

В природном уране цепная реакция не может начаться, поскольку он более чем на 99% состоит из U-238, и те 2-3 нейтрона, которые образуются при распаде, обычно слишком быстры, чтобы расщепить редкие ядра U-235, но, с другой стороны, слишком медленны для ядер U-238. Поэтому они просто захватываются ядрами U-238.

Таким образом, единичный распад ядра не может сам по себе вызвать цепную реакцию. Есть два варианта ее запуска:

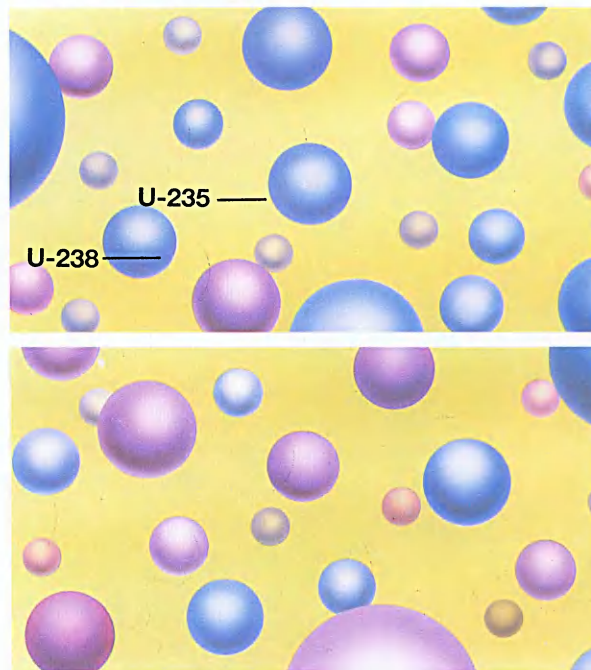
Что такое обогащение?

может начаться, поскольку он более чем на 99% состоит из U-238, и те 2-3 нейтрона, которые образуются при распаде, обычно слишком быстры, чтобы расщепить редкие ядра U-235, но, с другой стороны, слишком медленны для ядер U-238. Поэтому они просто захватываются ядрами U-238.

В обогащенном уране повышается содержание урана-235. Ядра урана-238 окрашены в синий цвет, урана-235 — в красный.

либо повысить содержание U-235, чтобы увеличить долю расщепляющегося материала, либо замедлить освобождающиеся при распаде нейтроны.

Например, для того чтобы получить ядерное топливо, которое было бы пригодно для действующих в Германии атомных электростанций, необходимо



повысить содержание U-235 с 0,7% до примерно 3%. Этот процесс называют обогащением.

Обогащенное до 3% ядерное топливо тоже само по себе работать не будет, так как образующиеся при распаде ядер нейтроны обладают слишком высокой скоростью и будут попросту захватываться ядрами U-238, не расщепляя их, и пролетать мимо ядер U-235, словно бы «не замечая» их. Для их расщепления необходимы медленные нейтроны. К счастью, существуют вещества, притормаживающие нейтроны. Их назы-

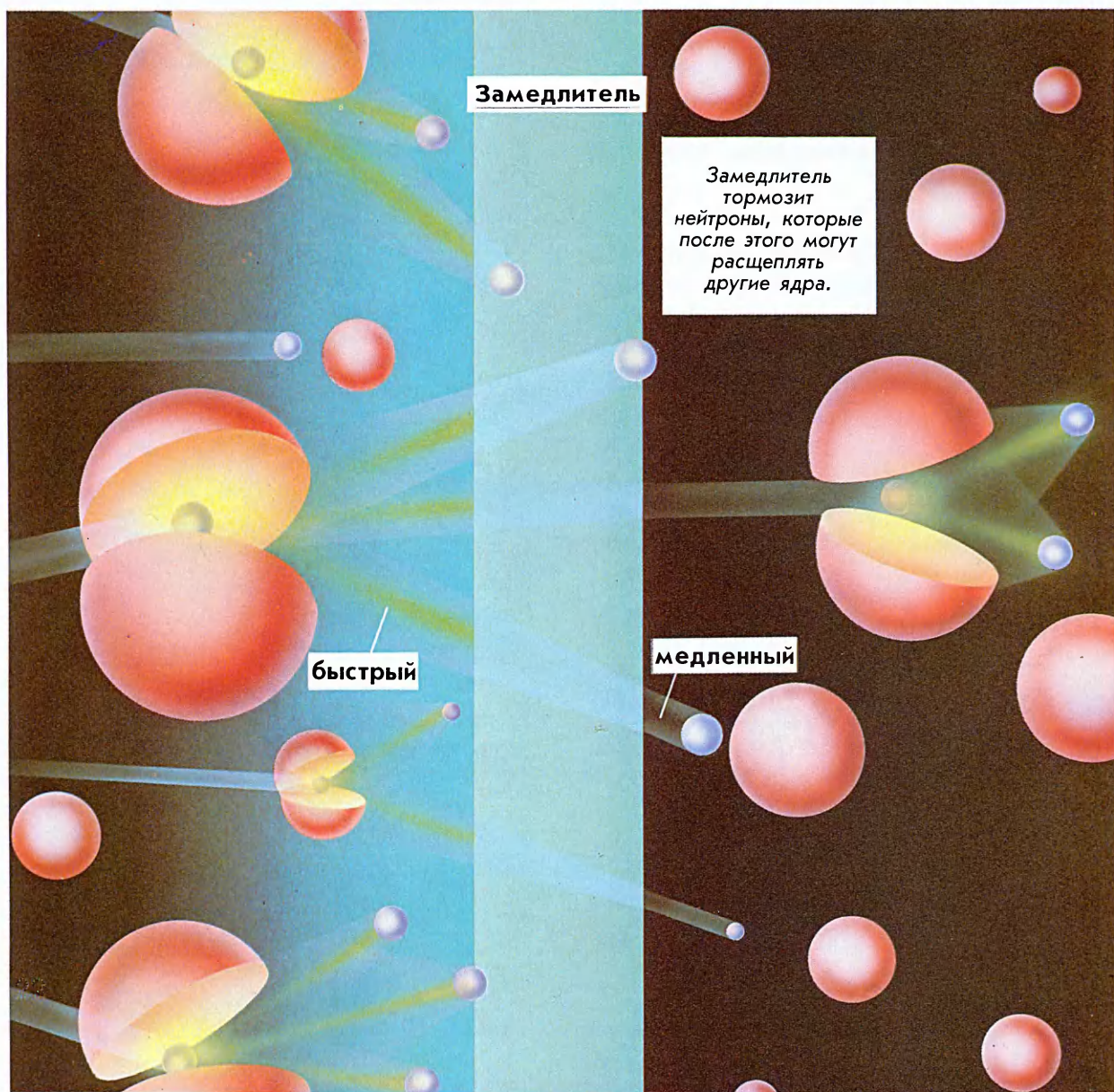
Что такое замедлитель?

вают замедлителями.

Хорошим замедлителем является углерод; если углерод в форме графита поместить между кусками или блоками урана, то попадающие в него нейтроны замедляются и, достигая ядер урана-235, расщепляют их. Вода и бериллий тоже являются хорошими замедлителями.

Есть еще один способ, при помощи которого можно вырабатывать ядерную энергию. Он заключается в следующем. Если заставить ядра дейтерия и трития слиться при колоссальных темпера-

Что понимают под ядерным синтезом?



турах и давлениях, то в результате образуются ядро гелия и нейтрон. При этом их суммарная масса будет меньше, чем суммарная масса исходных ядер. Потерянная масса переходит, как и при расщеплении ядер, в энергию. Такой процесс называется **ядерным синтезом**.

За счет таких же процессов выделяется энергия во всех звездах, в том числе и в нашем Солнце, а также в водородной бомбе.



При ядерном синтезе из дейтерия и трития образуются ядра гелия и нейтроны. Исходные ядра обладают большей массой, чем продукты превращения. Таким образом, теряется масса, превратившаяся в энергию.

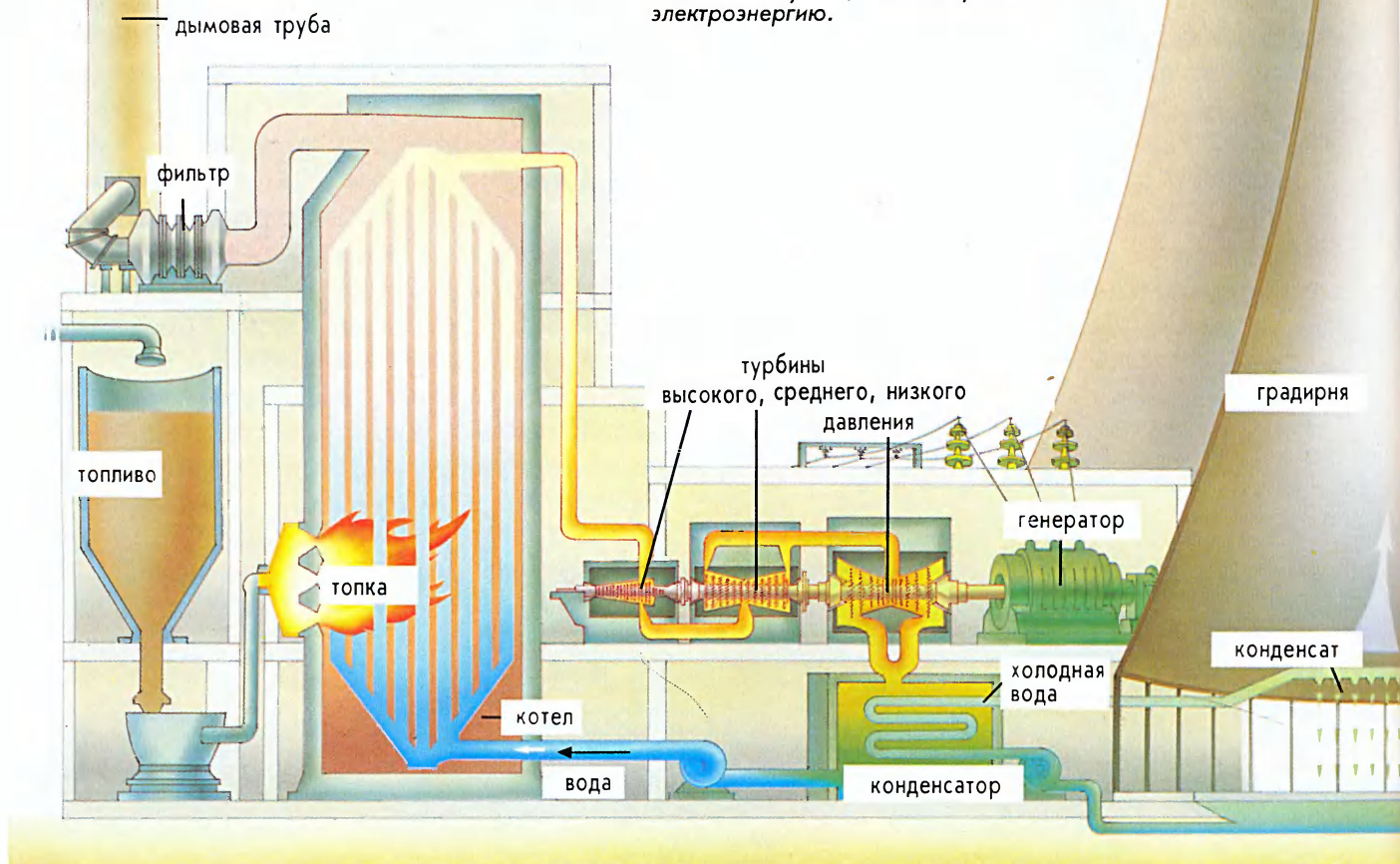
Процессы, происходящие в недрах Солнца, можно с большим упрощением описать следующим образом: при температуре 15 миллионов градусов и

невообразимо высоком давлении в 200 миллиардов атмосфер происходит слияние 4 ядер водорода в одно гелиевое ядро с потерей массы и выделением огромной энергии. Каждую секунду Солнце расходует 564 миллиона тонн водорода, вырабатывая при этом 560 миллионов тонн гелия.

Недостающие 4 миллиона тонн (0,7% исходной массы) преобразуются в солнечную энергию. Общая мощность солнечного излучения составляет 388 000 000 000 000 000 000 000, или $3,88 \cdot 10^{23}$ кВт, один квадратный метр Солнца излучает 62 900 кВт, а это примерно соответствует мощности 62 000 бытовых электрокаминов или же 1 миллиона ламп.



Электростанция на ископаемом топливе. Здесь сжигают жидкое топливо или уголь, чтобы выработать электроэнергию.



Атомные электростанции сегодня и завтра

Задача электростанций – выработка электроэнергии. В большинстве случаев сначала вырабатывается тепло, которое затем частично превращается в электроэнергию. Электростанции на ископаемом топливе работают за счет сжигания в огромных топках высотой до 100 м угля, газа или жидкого топлива. Выделяющаяся при этом тепловая энергия используется для нагревания и испарения воды в котле. Образующийся пар

Что такое электростанция?

под давлением 170 бар с температурой 530°C направляется в турбину. Это большая машина, в которой есть вращающийся вал с закрепленными на нем лопатками. Пар давит на лопатки, как ветер на лопасти ветряной мельницы, вал вращается и приводит в движение связанную с ним динамо-машину – генератор. Генератор, подобно велосипедному динамо, вырабатывает электроэнергию, но в большем количестве – около 1000 мегаватт, достаточном для обеспечения электричеством большого города. Далее электроэнергия через трансформаторы

и переключатели попадает в сеть.

Пар, отдавший свою энергию на вращение турбины, теряет температуру и давление. Для повторного использования его нужно снова превратить в воду. Этот процесс происходит в *конденсаторе*, где пар соприкасается с трубами, по которым течет холодная вода, превращается в воду и отводится обратно в котел. При этом температура охлаждающей воды повышается с 25 до 35°C.

Для охлаждения воды обычно используют *градирни*, где вода распыляется и падает с большой высоты, охлаждаясь от контакта с холодным воздухом.

Охлажденную воду собирают и возвращают в конденсатор. При этом в градирне возникает тяга, как в камине, часть воды испаряется и уносится в атмосферу, образуя над градирней мелкие облачка.

Эти потери влаги на электростанции мощностью 1300 МВт составляют в среднем 1 кубический метр за секунду, а замена осуществляется из естественного

источника воды.

В некоторых наиболее удачных случаях можно частично или полностью отказаться от градирен, используя речную или морскую воду непосредственно для охлаждения.

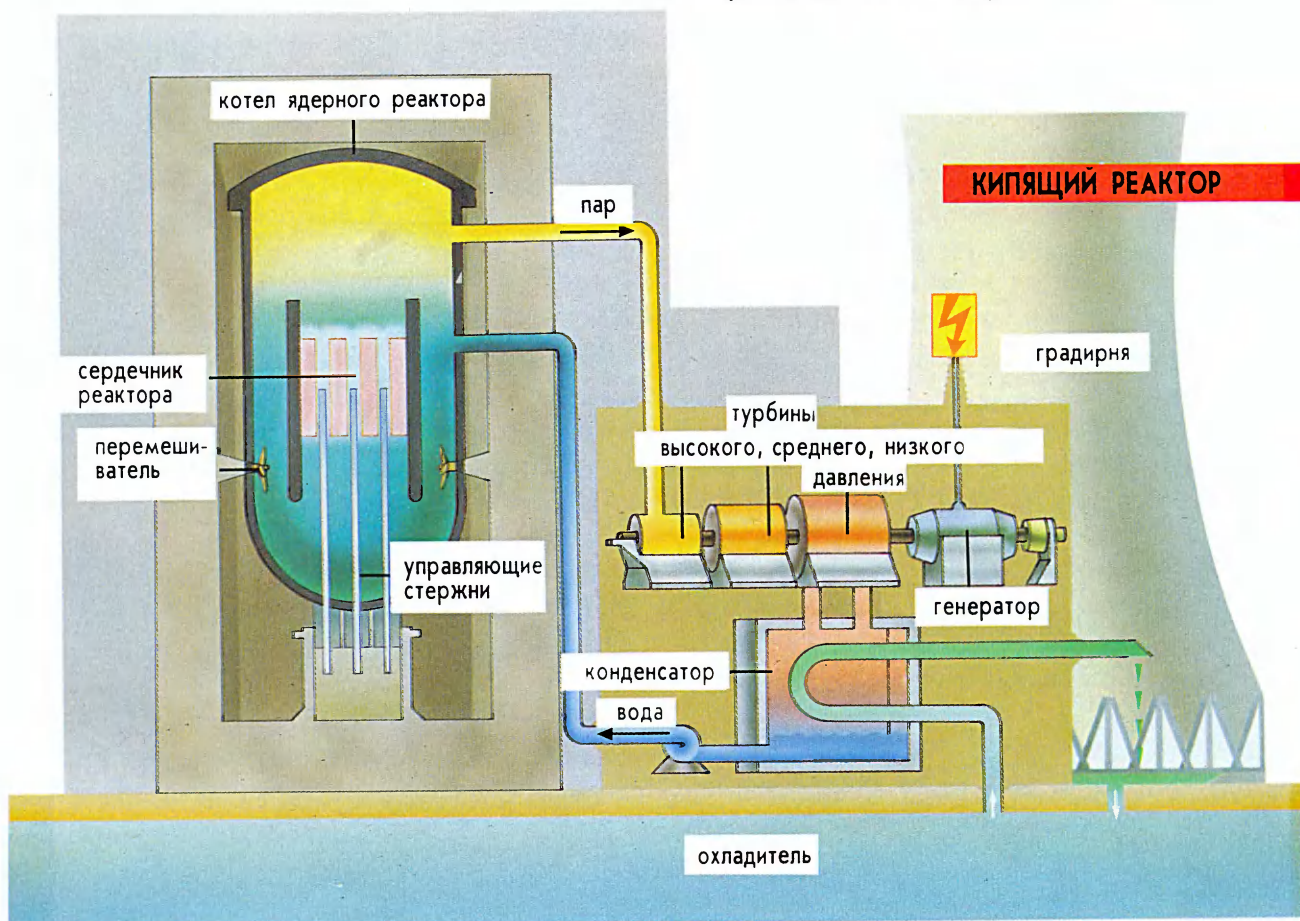
На атомной электростанции энергию для

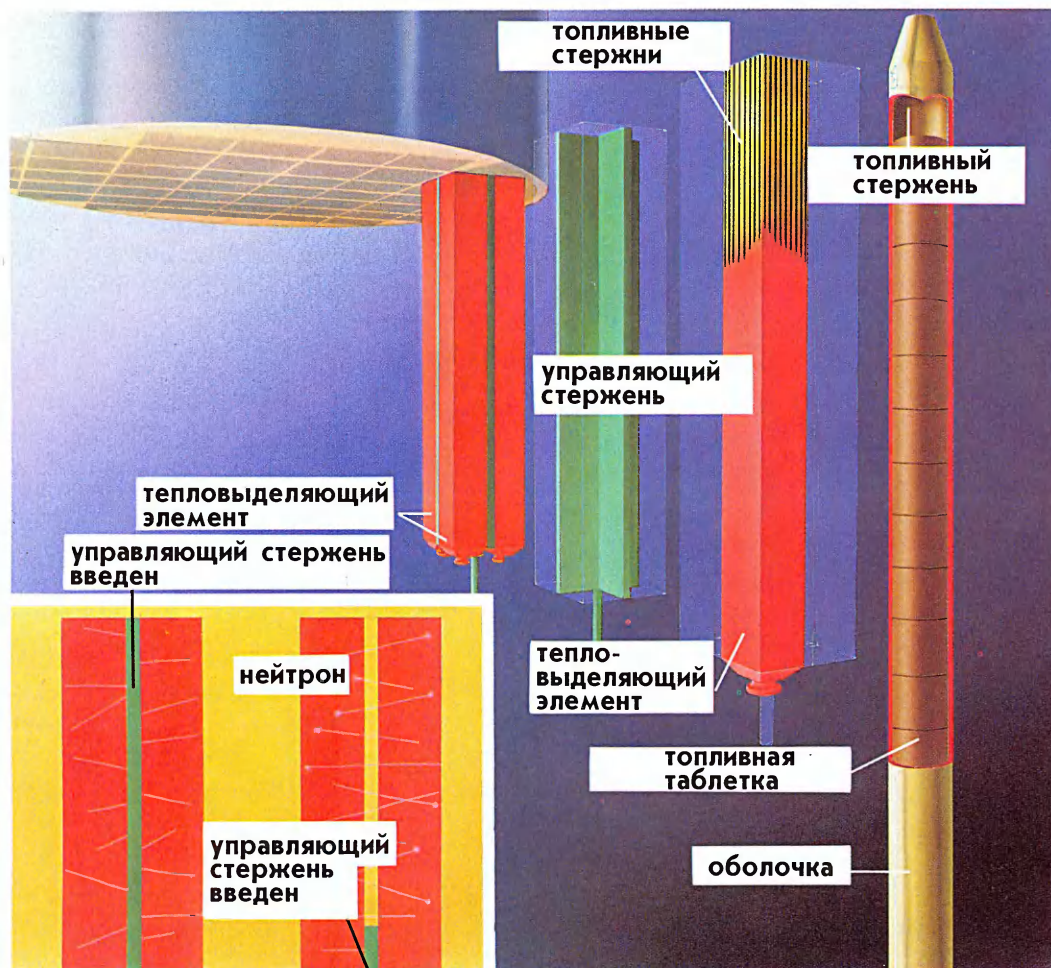
превращения воды в пар получают не путем сжигания ископаемого топлива, а за счет расщепления ядер. Обычный котел

уступает здесь место *ядерному реактору* – устройству для выработки ядерной энергии. В нем проводят управляемую цепную реакцию, при которой допускается расщепление ровно такого количества ядер, которое требуется для выработки электроэнергии.

Что такое атомная электростанция?

Атомная электростанция с кипящим реактором. Здесь пар генерируется ядерной энергией, а не сжиганием угля.





Компоненты сердечника реактора. Если управляющий стержень введен, он поглощает выделяющиеся нейтроны. При выведении управляющего стержня из сердечника нейтроны получают возможность расщеплять все новые ядра.

Как работает кипящий реактор?

Обогреваемый ядерной энергией котел кипящего реактора, заменяющий топочный котел обычной электростанции, также служит для испарения воды. Образуемый пар под давлением около 70 бар приводит в движение турбину, которая, в свою очередь, передает энергию генератору для выработки электричества. В уже упомянутом котле реактора, имеющего в нашем случае стенки толщиной 16 см, находится **сердечник реактора**, через который прокачивают воду для испарения. Он состоит из примерно 800 **тепловыделяющих элементов**. Каждый тепловыделяющий элемент представляет собой вертикальный пакет из 64 топливных стержней, между которыми снизу вверх подается вода. Топливный стержень – это металлическая трубка, напол-

ненная брикетами из ядерного топлива – преимущественно из обогащенного урана в форме диоксида урана (UO_2). При расщеплении ядер урана выделяется энергия, которая в форме тепла передается воде и испаряет ее. Одновременно вода выполняет функцию замедлителя, то есть тормозит испускаемые при распаде свободные нейтроны настолько, что они становятся способны расщеплять следующие ядра.

При распаде каждого уранового ядра испускается, как мы уже знаем, от 2 до 3 нейтронов. Если бы все они вызвали следующие распады, то реактор быстро вышел бы из-под контроля и стал вырабатывать слишком большое количество энергии. Чтобы это предотвратить, каждый реактор содержит специальное вещество, например, кадмий или бор, которое поглощает (абсорбирует) нейтроны в таком количестве, чтобы обеспечить равномерность выработки

энергии.

Эти вещества помещают в так называемые *регулирующие стержни*, которые могут вводиться в сердечник реактора на требуемую глубину или наоборот – выдвигаться наружу. Чем сильнее этот стержень выдвинут из сердечника, тем меньше нейтронов он поглощает и тем больше распадов они вызывают. И наоборот: чем глубже регулирующий стержень введен, тем больше нейтронов поглощается и тем меньше энергии выделяется. Таким образом, манипулирование регулирующим стержнем позволяет четко управлять выработкой энергии, а при необходимости и совсем прекращать ее.

Когда запускают новый реактор, приходится для получения первых свободных нейтронов использовать специальные нейтронные источники. Далее, даже

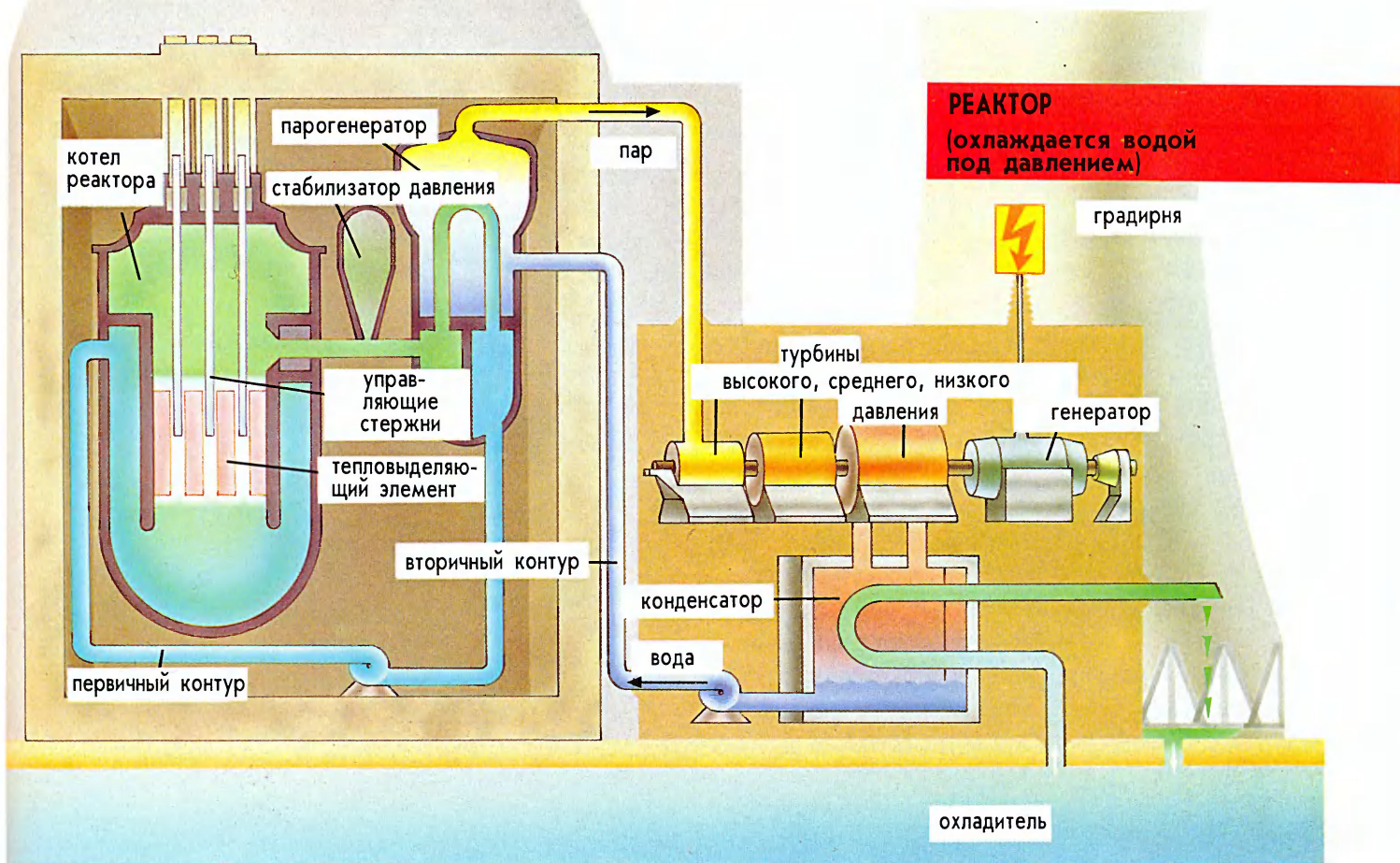
после перерывов в работе реактора, этого уже не требуется, так как топливные элементы уже испускают достаточно нейтронов, чтобы запустить цепную реакцию при выведении регулирующего стержня из сердечника.

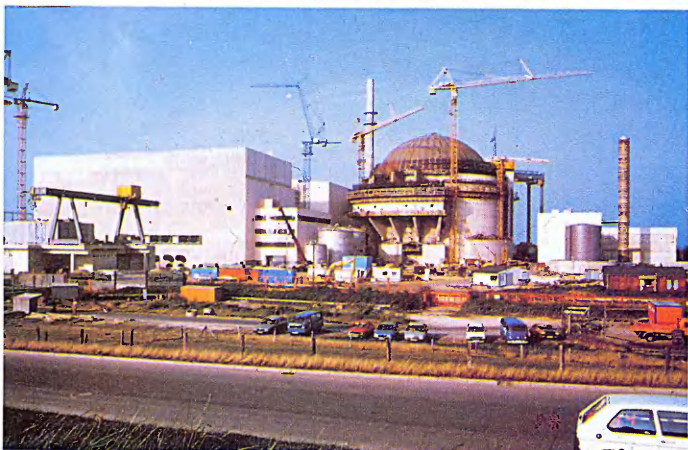
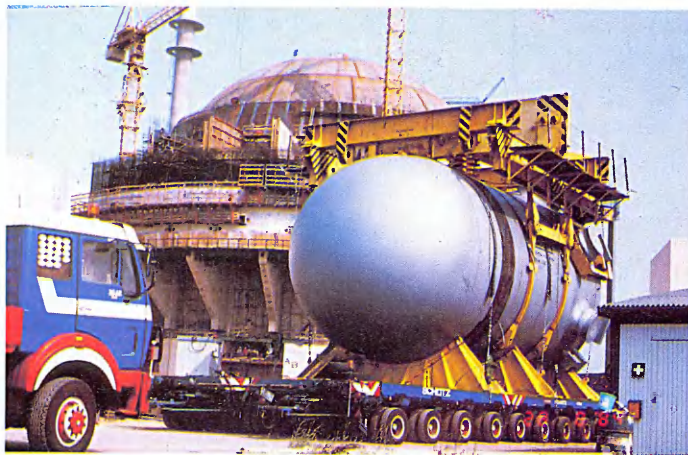
В описанном выше кипящем реакторе

Что такое реактор с водяным охлаждением под давлением?

турбину вращает пар, вырабатываемый непосредственно в котле. Но это не единственный способ. Существуют реакторы с водяным охлаждением под давлением. В них вода, входящая в контакт с сердечником реактора, не кипит, так как находится под таким огромным давлением, что остается жидкой даже при очень высоких температурах. Эта *первичная вода* че-

Атомная электростанция с реактором, охлаждаемым водой под давлением. Вода в первичном контуре находится под высоким давлением и не испаряется. Она нигде не входит в соприкосновение с водой из вторичного контура.





Строительство атомной электростанции. Котел реактора (верхний слева) перевозят на стройплощадку (нижний слева). Справа наверху помещен обзорный снимок машинного зала с турбинами и генератором.

рез трубки парогенератора передает тепло так называемой вторичной воде, не вступая с ней в непосредственный контакт. При этом первичная вода охлаждается с 330°C до 290°C и подается обратно в сердечник реактора, а вторичная — закипает, превращается в пар и приводит в движение турбину и генератор. Первичная вода в сердечнике снова нагревается до температуры около 330°C , а специальное устройство поддерживает неизменное давление в контуре.

В типичном реакторе с водяным охлаждением под давлением мощностью 1300 МВт сердечник состоит из 200 тепловыделяющих элементов по 300 топливных стержней в каждом. Управление реактором осуществляется, во-первых, путем введения в первичный водный контур поглощающего нейтроны материала, со-

державшего бор, и, во-вторых, за счет использования кадмиевых регулирующих стержней, находящихся в верхней части сердечника. Вода первичного контура служит здесь, как и в кипящем реакторе, дополнительным замедлителем нейтронов. Кроме того, она выполняет еще и регулировочную функцию: если реактор слишком разогревается, плотность первичной воды падает, ее способность замедлять нейтроны снижается, число распадов снижается и система охлаждается до нужного уровня.

Оба вышеописанных типа реакторов относятся к классу *легководных реакторов*, то есть работающих на обычной — «легкой» воде (H_2O), в отличие от систем, в которых используется для охлаждения тяжелая вода (D_2O).

Как мы уже видели, быстрые нейтроны

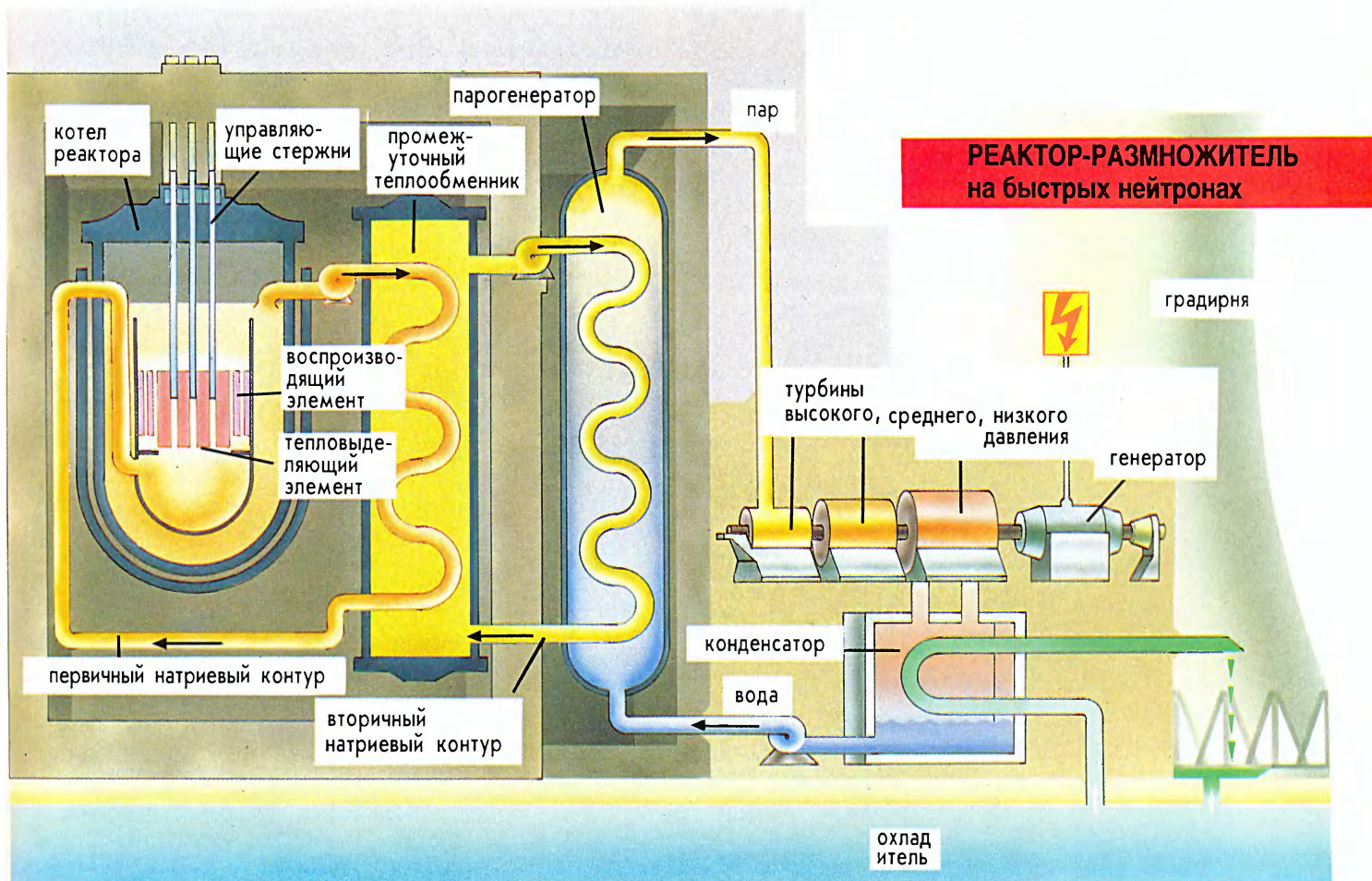
Что такое бридер?

поглощаются ядрами U-238 с образованием легкорасщепляющихся ядер плутония, потенциально пригодных для выработки энергии. Это и используется в

реакторах-размножителях (бридерах). Здесь в качестве расщепляющегося материала применяется плутоний-239, дающий при каждом распаде по 2-3 нейтрона. Один из них расходуется на поддержание цепной реакции, а остальные поглощаются ураном-238 с образованием плутония-239, то есть нового ядерного топлива. Таким образом, реактор как бы сам «высиживает» для себя новое топливо, причем в идеальном случае – даже большее количество, чем расходует. Этот механизм в незначительном масштабе реализуется и в других типах реакторов. U-238 намного более доступен, чем другие изотопы, и если в ближайшие столетия не удастся найти более безопасные энергоресурсы, бридеры, несмотря на большие технические проблемы при их строительстве, вероятно, станут важным элементом мировой энергетики. С помощью бридерной технологии можно вырабатывать энергию из бесполезного для других реакторов U-238, превра-

щая его в расщепляемый материал, и, таким образом, использовать природный уран в 60 раз эффективнее, чем обычно. Превращение U-238 в плутоний лучше проходит под действием быстрых нейтронов, чем медленных. В бридерах на быстрых нейтронах для расщепления используют именно быстрые нейтроны, поэтому для нормальной работы в топливе должно быть повышенное содержание расщепляющегося материала, поэтому тепловыделяющие элементы в таких реакторах содержат 20-30% плутония и всего 70-80% U-238. Вследствие этого в бридеры на быстрых нейтронах загружают в 10 раз больше расщепляющегося материала, чем в ранее описанные типы реакторов, что, конечно, влечет за собой всевозможные трудности, опасности и проблемы. После такого предисловия легко дать

Атомная электростанция с бридерным реактором. Аналогичные реакторы уже работают в других странах, например во Франции. Они обеспечивают оптимальное использование ядерного топлива.



описание бридера на быстрых нейтронах. Собственно реактор состоит из тепловыделяющих элементов, которые вырабатывают энергию, и воспроизводящих элементов, в которых формируется новый расщепляемый материал. Из-за повышенного содержания этого материала очень высок и уровень теплоотдачи. Поэтому реактор охлаждают жидким натрием, имеющим очень высокую теплопроводность, но, в отличие от воды, не выполняющим функцию замедлителя нейтронов. Итак, первичный натриевый контур отводит тепло от сердечника и передает его на вторичный натриевый контур, который превращает воду в пар, вращающий турбины для выработки электроэнергии.

Еще один перспективный тип реактора –

Как работает высокотемпературный реактор?

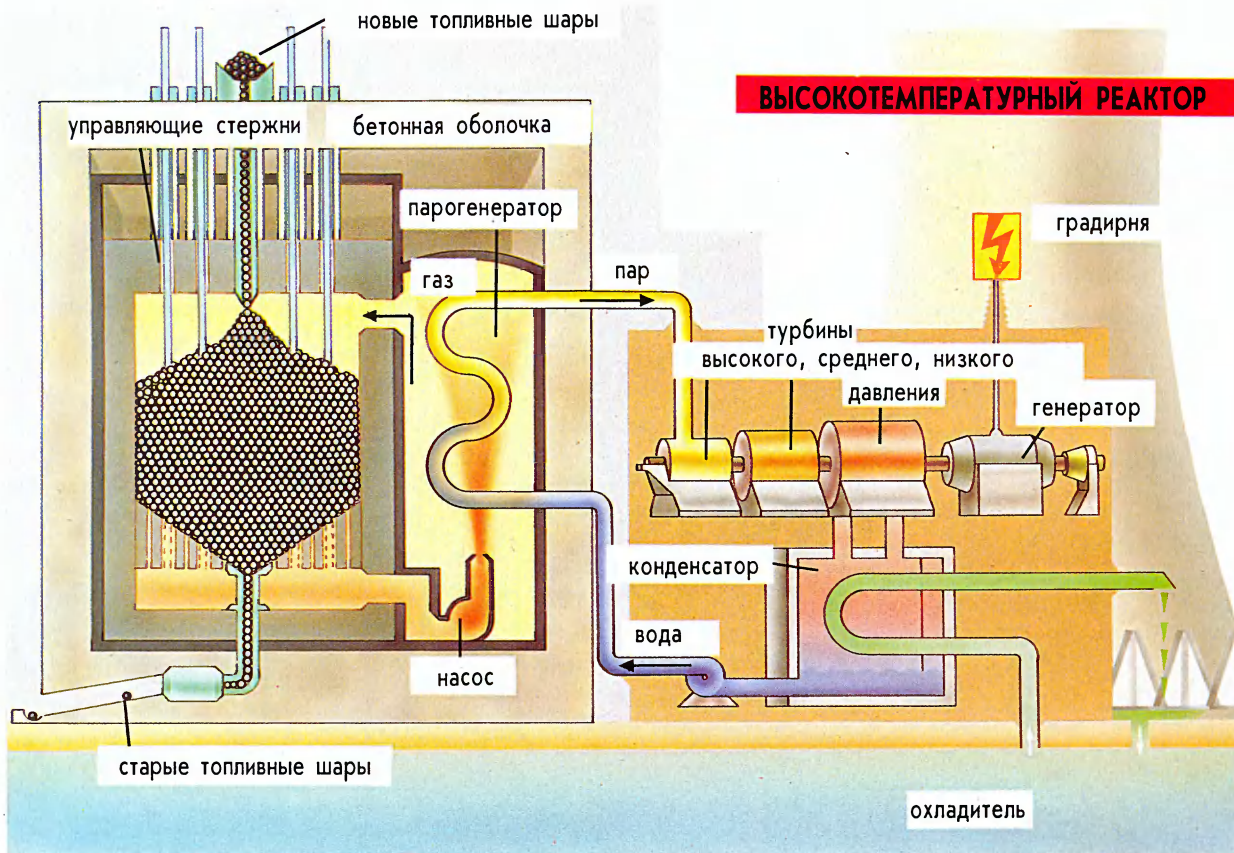
высокотемпературный, где в качестве ядерного топлива, наряду с ураном, применяют торий-232, который, поглощая нейтроны, превращается в расщепляемый уран-233. Топливо гото-

вится в форме мелких частиц с покрытием, помещенных в сферические графитовые капсулы размером с теннисный мяч. Графит служит здесь замедлителем. Вырабатываемую в котле энергию отводит газ, например гелий, нагреваясь при этом до 900°C. Газ передает тепловую энергию воде через теплообменник, вода испаряется, пар вращает турбины. У высокотемпературного реактора много преимуществ: высокий коэффициент полезного действия и высокие эксплуатационные температуры позволяют применять его, например, в химической промышленности при газификации угля.

В то время как кипящий реактор и системы с охлаждением водой под давлением стали для нас такими же обычными, как автомобили и даже бридеры и высокотемпературные реакторы уже

Правда ли, что ядерный синтез – главный источник энергии XXI века?

Атомная электростанция с высокотемпературным реактором. Частицы ядерного топлива заключены в графитовые шары размером с теннисный мяч.



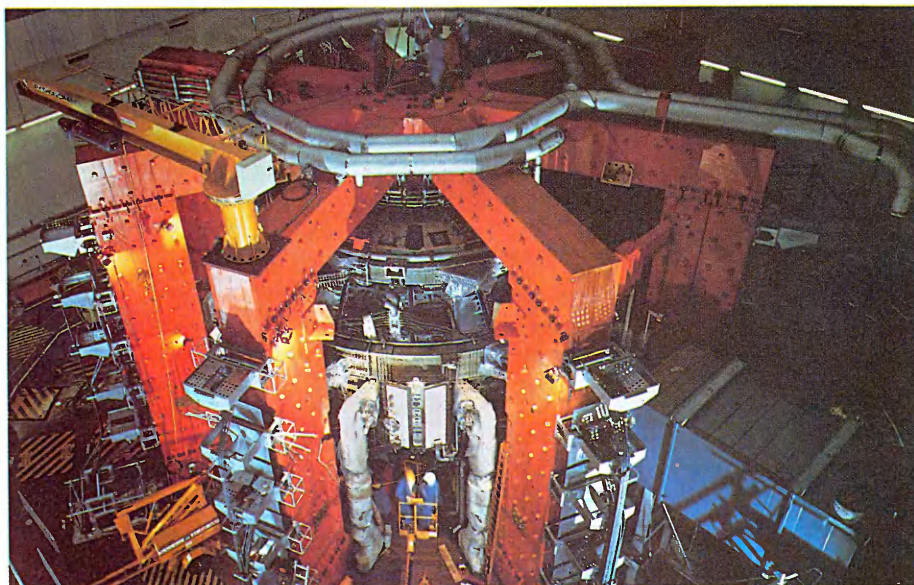


Внешний вид атомной электростанции в Библисе. Справа и слева видны градирни.

прошли основные испытания, промышленный *термоядерный реактор* – дело далекого будущего. Пока остаются нерешенными некоторые технические проблемы. Например, термоядерное топливо – изотопы водорода дейтерий и тритий – необходимо разогревать до температуры 100 миллионов градусов. Наградой за преодоление трудностей было бы решение всех энергетических проблем, так как переработка 1 кг дейтерия дала бы 24 миллиона кВт · ч энергии. Это соответствует энергии, получаемой из 3 миллионов тонн угля. Но ни один сосуд не выдержит таких температур. Поэтому делаются попытки удерживать топливо

с помощью мощных магнитных полей или разогревать малые порции топлива лазерными лучами, чтобы затем оно само выделяло энергию ядерного синтеза. Изучаются и «холодные» методы с применением особых частиц – мюонов, но их рассмотрение выходит за рамки этой книги.

Итак, не считая водородной бомбы, техническое применение ядерного синтеза – дело будущего. Но, учитывая постоянное ускорение технического прогресса, можно предположить, что уже в XXI веке ядерный синтез займет важное место не только в энергетике, но и в освоении космического пространства.



Вид на термоядерный реактор JET (Joint European Torus) – совместный проект Европейского Сообщества в Кэлхеме, Великобритания. Установка представлена на стадии монтажа. Здесь будут сливаться ядра дейтерия и трития при температуре 100 миллионов градусов с образованием гелия и выделением энергии.

Круговорот топлива

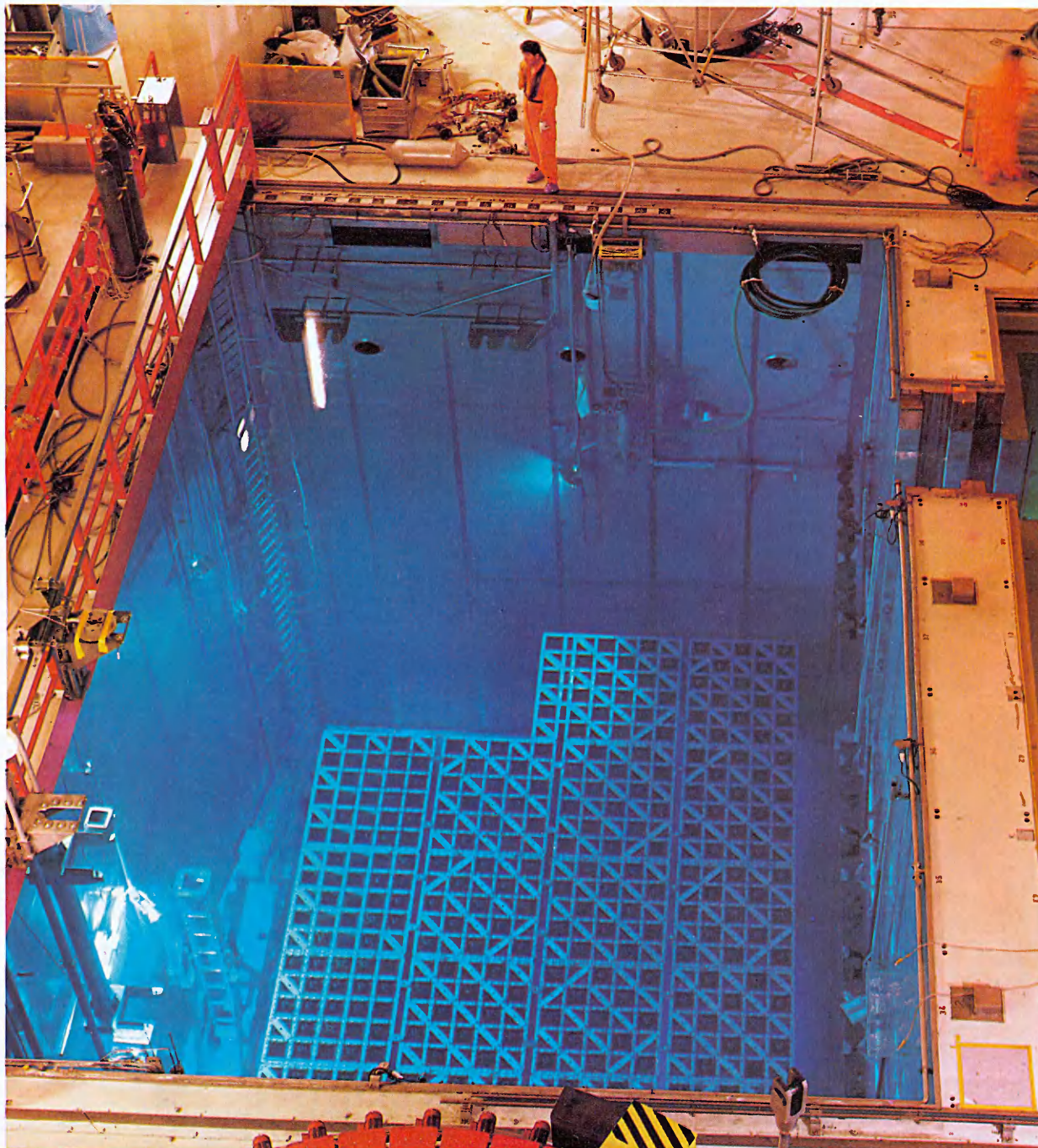
Добыча урана – ликвидация и регенерация
отработанного ядерного топлива

На атомных электростанциях должны быть обеспечены не только поставки ядерного топлива, но и регулярный вывоз отработанных тепло-выделяющих элементов. Из них необходимо извлечь

Что понимают под круговоротом ядерного топлива?

остаток расщепляющегося материала, а непригодные к применению и опасные остатки ликвидировать. Все эти процессы объединены в понятие *круговорот топлива*. Он начинается с добычи урана и то-

Снабжение ядерным топливом и его обезвреживание жизненно важно для атомных электростанций. Здесь показана емкость для сбора отработанных топливных элементов.



рия открытым способом или в шахтах. Далее следуют обработка руды, процессы обогащения и химической переработки, затем изготовление тепловыделяющих элементов и поставка их на атомные электростанции. Это – **снабжение**. Не менее важной частью кругооборота является и **ликвидация отходов**. Она начинается с выемки отработанных тепловыделяющих элементов, которые сначала хранятся в охлаждаемом водой резервуаре, затем на промежуточном складе и, наконец, передается на регенерационную установку. Там радиоактивные отходы отделяют от пригодного к дальнейшему применению расщепляемого материала. Из регенерированного топлива готовят новые тепловыделяющие элементы, а отходы в специальной установке упаковывают и помещают в надежные подземные могильники.

Уран – тяжелый металл, добываемый из урановых руд. Самая известная из этих руд – урановая смолка, состоящая на 95% из оксида урана. Она иногда встречается в виде громадных блоков весом в несколько тонн. К сожалению, в большинстве других руд урана гораздо меньше. Добыча руды становится рен-

Как добывают уран?

Уран добывают из руды, полученной в открытых карьерах или подземных шахтах. На снимке несколько кусков урановой руды.

табельной, если она содержит хотя бы несколько килограммов урана на тонну. Добытая шахтным или открытым способом руда подвергается предварительной обработке: ее измельчают, выщелачивают и через несколько стадий получают концентрат, содержащий более 70% урана – так называемый «Yellow cake», или «желтый кекс». Этот продукт передают на дальнейшую переработку.

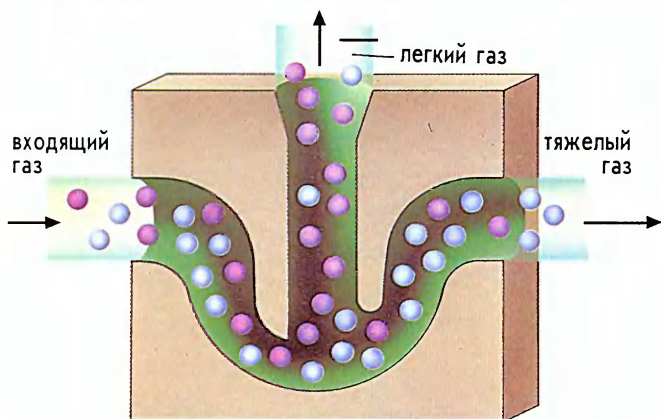
Чистый уран непригоден для использования на атомных электростанциях, так как содержит всего 0,7% расщепляющегося U-235, а остальные 99,3% составляет несколько более тяжелый нерасщепляемый U-238.

Действующие в Германии атомные электростанции работают на топливе, содержащем около 3% U-235, поэтому уран должен быть обогащен до этой концентрации. Поскольку изотопы урана не различаются по химическим свойствам, то для обогащения приходится использовать разницу в массе. Сначала уран с помощью фтора превращают в газообразный гексафторид урана (UF_6) – соединение урана с фтором. Для разделения изотопов существует несколько способов.

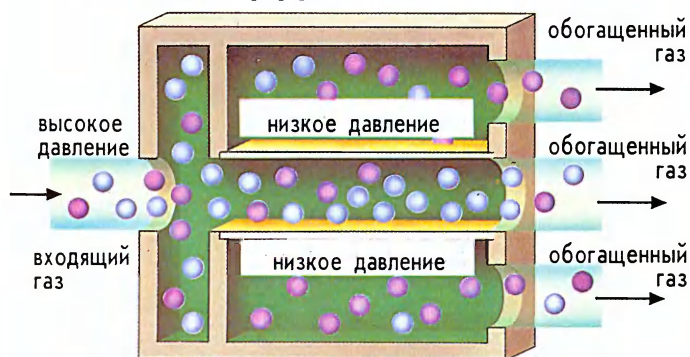
Как получают обогащенный уран?



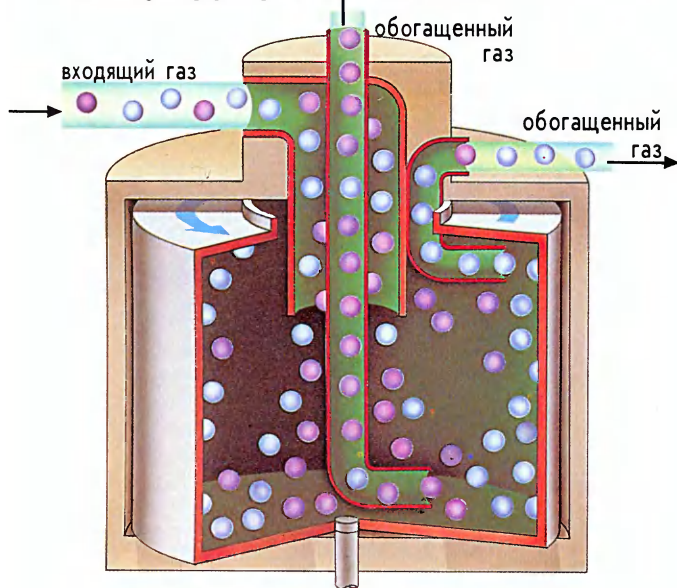
Разделение на фильерах



Каскадная эффузия



Центрифугирование газов

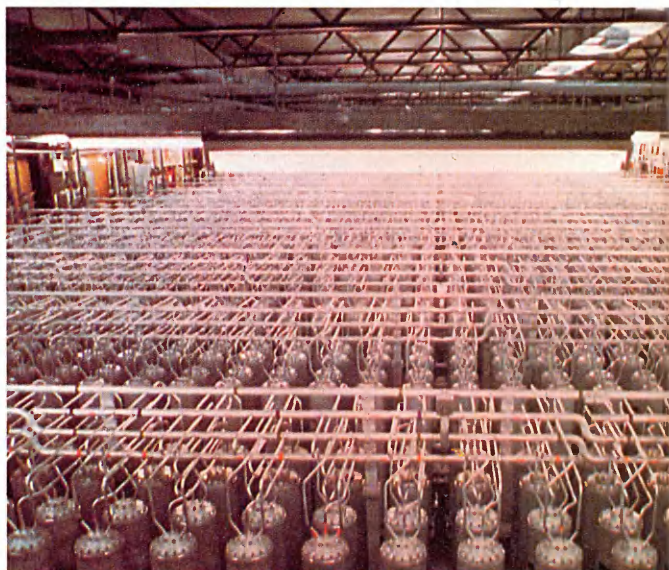


Три известных технологии обогащения. Его цель — повышение содержания урана-235. Уран-235 изображен красным цветом, уран-238 — белым.

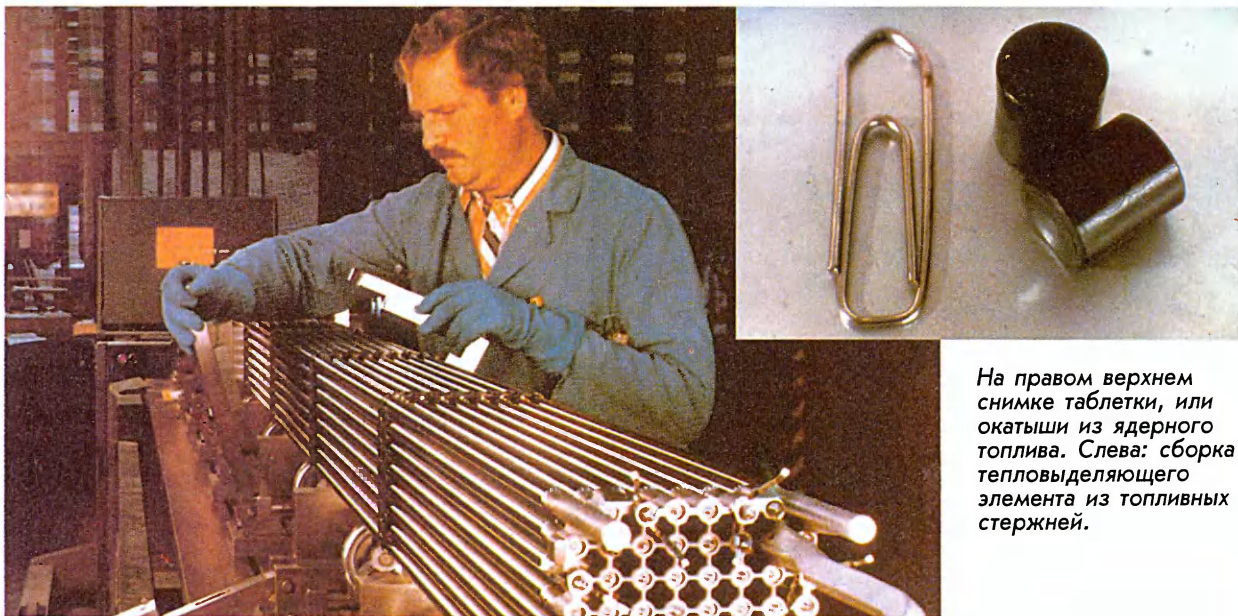
При разделении в фильерах газообразный UF_6 пропускают с высокой скоростью через узкие фильеры дугообразной формы, центробежные силы прижимают более тяжелые молекулы с U-238 к наружной стенке дуги, что позволяет частично разделить изотопы. Конечно, полное разделение в одну стадию провести невозможно, поэтому газ пропускают через ряд расположенных последовательно разделительных ячеек до достижения необходимой концентрации U-235.

Каскадная эффузия. В соответствии с этой технологией газообразный гексафторид урана продавливают через мембраны, причем газ с легким изотопом быстрее проходит через поры, чем тяжелый U-238. Для более полного разделения изотопов устанавливают каскад мембран.

Разделение в газовой центрифуге. Газ вводят в высокоскоростную центрифугу, при вращении которой легкие изотопы концентрируются у оси центрифуги, а тяжелые отбрасываются центробежными силами к ее стенкам и таким образом разделяются. Здесь также необходимо многократное повторение процедуры на последовательно соединенных установ-



Вид установки для обогащения урана. Множество аппаратов, соединенных последовательно.



На правом верхнем снимке таблетки, или окатыши из ядерного топлива. Слева: сборка тепловыделяющего элемента из топливных стержней.

ках, чтобы достичь требуемой степени обогащения.

Другие способы, которые позволили бы провести обогащение всего в одну стадию, пока находятся лишь на стадии разработки.

Как уже было сказано, в топливных

**Как
изготавливают
тепловыделяющие
элементы?**

стержнях на атомных электростанциях находятся брикеты, или окатыши, из диоксида урана (UO_2). Диоксид урана получают из обогащенного UF_6 , затем формируют его в брикеты, обычно называемые «таблетками», диаметром 1 см и толщиной 1,5 см. Эти размеры могут меняться от страны к стране, от электростанции к электростанции, но они, как и другие приводимые здесь количественные данные, являются типичными средними величинами. Сырые отпрессованные таблетки нагревают до $1700^{\circ}C$ для достижения необходимой прочности и плотности, обтачивают до требуемого размера с точностью до $1/10\ 000$ мм и заряжают в оболочку топливного стержня. Оболочку никогда не набивают таблетками полностью, так

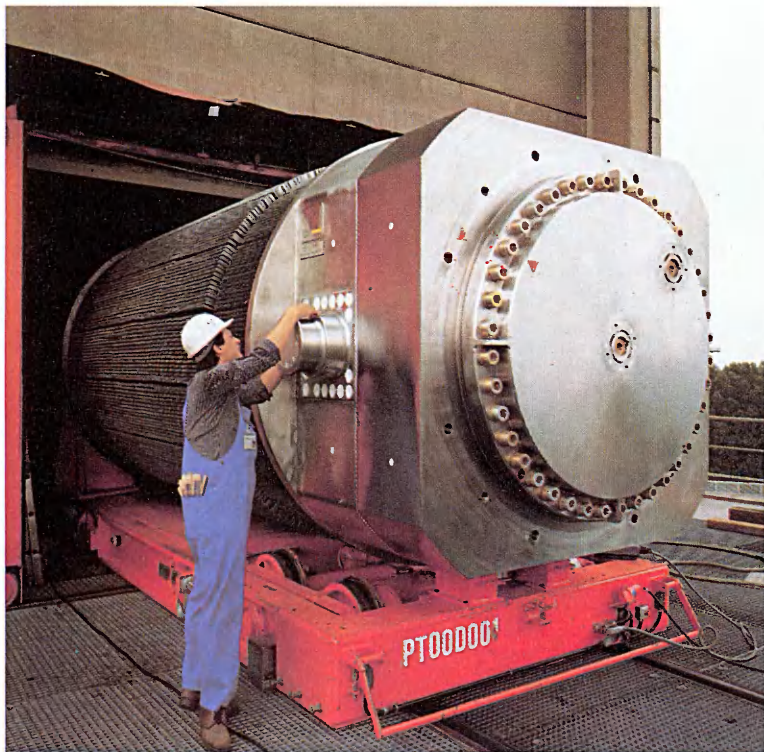
как при расщеплении иногда образуются газы, требующие определенного пространства. Для улучшения теплопроводности свободное пространство в оболочке заполняют гелием.

Наполненные и газонепроницаемо загерметизированные оболочки – топливные стержни – собирают в пакеты с регулирующими стержнями и формируют из них тепловыделяющие элементы, которые, в зависимости от обстоятельств, могут иметь различную конструкцию. В кипящих реакторах для тепловыделяющего элемента применяют обычно пакет 7×7 топливных стержней, в системах с охлаждением водой под давлением – 15×15 или 20×20 стержней. Может также варьироваться способ установки регулирующих стержней.

Как мы уже знаем, в реакторе при рас-

**Как
транспортируют
отработанные
топливные
стержни?**

щеплении массивных ядер образуются высокорadioактивные ядра средней массы, которые испускают опасное излучение. Отработанный тепловыделяющий элемент содержит значительное количество этих опасных для жизни ве-



Транспортировочный контейнер для отработанных тепловыделяющих элементов. Эти контейнеры относятся к наиболее надежным конструкциям в технике.

ществ, а также остатки урана-235 и плутоний. Если отбросить конструкционные материалы и оболочку, то получим следующий состав отработанного топливного элемента: около 3% высокоактивных продуктов распада, 95% урана-238, 1% урана-235 и около 1% плутония, образовавшегося при трансформации урана-238. Для предотвращения попадания этих материалов в окружающую среду необходимы строжайшие меры безопасности.

В ФРГ этот процесс организован следующим образом. После выгрузки из реактора отработанные топливные элементы помещают на некоторое время в резервуар с водой, находящийся в том же здании, что и реактор. Здесь они остывают, и тепловыделение снижается. После этого топливные элементы помещают в специальные транспортные контейнеры со стенками толщиной почти 50 см, которые надежно изолируют содержимое от внешнего мира и гарантируют безопас-

ность даже в случае серьезной аварии. Эти контейнеры должны выдерживать, в частности, падение с высоты 9 м, пребывание в пламени в течение 30 минут, сбрасывание на штырь длиной 1,2 м и даже столкновение с падающим самолетом. В таком контейнере весом до 120 тонн можно осуществлять промежуточное хранение или перевозку до 9 отработанных тепловыделяющих элементов. В настоящее время с немецких атомных электростанций ежегодно вывозится около 250 тонн отработанного ядерного топлива – гигантская нагрузка для всех фирм, занятых ликвидацией отходов.

На атомных электростанциях ежегодно

Что происходит с отработанными тепловыделяющими элементами?

заменяют примерно одну треть действующих тепловыделяющих элементов новыми. На большой электростанции

мощностью 1300 МВт каждый год извлекают из реактора по 30 т урана; до 2000 года в ФРГ накопится почти 11 000 т такого материала.

С одной стороны, эти материалы загрязнены опасными для жизни продуктами распада, но с другой – содержат ценные расщепляющиеся ядра. Поэтому разработать технологию регенерации и ликвидации отработанных элементов важно как с точки зрения окружающей среды, так и с экономических позиций.

Технология такова: сначала отработанные тепловыделяющие элементы выдерживают в течение 1 года в резервуаре с водой, затем помещают в транспортные контейнеры, обеспечивающие полную радиационную безопасность, и передают в промежуточное хранилище, где они дожидаются дальнейшей переработки. В некоторых странах, например во Франции (La Hague) и Великобритании (Sellafield), отработанное топливо регенерируют. При этом пригодное к приме-

нению топливо извлекают и используют для изготовления новых тепловыделяющих элементов, а опасные продукты радиоактивного распада передают для захоронения на вечные времена в так называемых *могильниках*.

Не исключено и прямое захоронение отработанных тепловыделяющих элементов в могильниках без предварительной регенерации.

Регенерационная установка – это устройство для разделения различных компонентов отработанных тепловыделяющих элементов. Особенно важ-

**Что такое
регенерационная
установка?**

но выделить радиоактивные отходы и пригодное для повторного использования топливо – уран и плутоний, так как кроме нерасщепленных ядер U-235 отработанные элементы содержат и плутоний-239, образующийся из U-238 и используемый затем в качестве ядерного топлива.

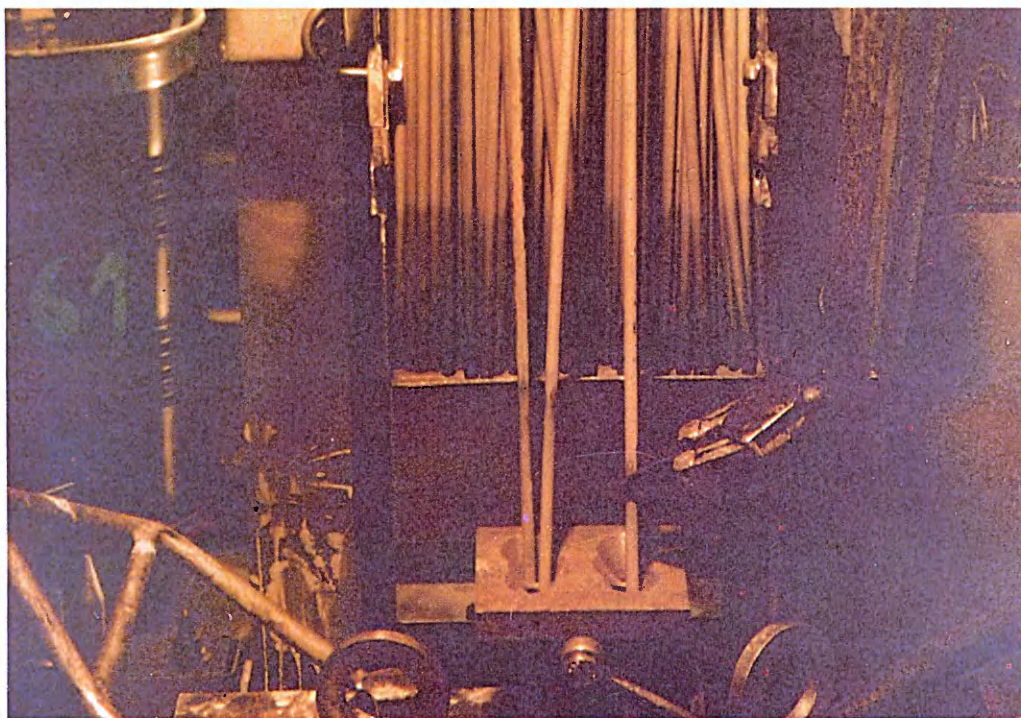
Отработанные тепловыделяющие эле-

менты выдерживают в емкости на электростанции, помещают в контейнеры и после некоторой выдержки в промежуточных хранилищах передают на регенерационные установки. На этом этапе они еще высокоактивны, поэтому весь процесс осуществляется в автоматическом режиме за толстыми бетонными стенами и свинцовыми стеклами, защищающими обслуживающий персонал.

Сначала топливные элементы измельчают и растворяют в азотной кислоте. Уран, плутоний и продукты распада растворяются практически полностью, а обрезки оболочек стержней остаются в осадке. Их отделяют, цементируют и передают на захоронение. Раствор подвергают целому ряду химических превращений и разделяют на фракции, содержащие уран, плутоний и радиоактивные продукты распада.

Уран и плутоний после дополнительной обработки и очистки отправляют на фабрику по производству топливных стержней, а активные продукты распада готовят к захоронению и тщательно упаковывают.

Работа с помощью дистанционного манипулятора на экспериментальной установке по регенерации радиоактивных веществ проводится за свинцовыми стеклами. Топливные стержни измельчают специальными кусачками.



Отходы ядерных реакторов из исследовательских институтов, с атомных электростанций и регенерационных установок характеризуются разным

Куда сбрасывают радиоактивные отходы?

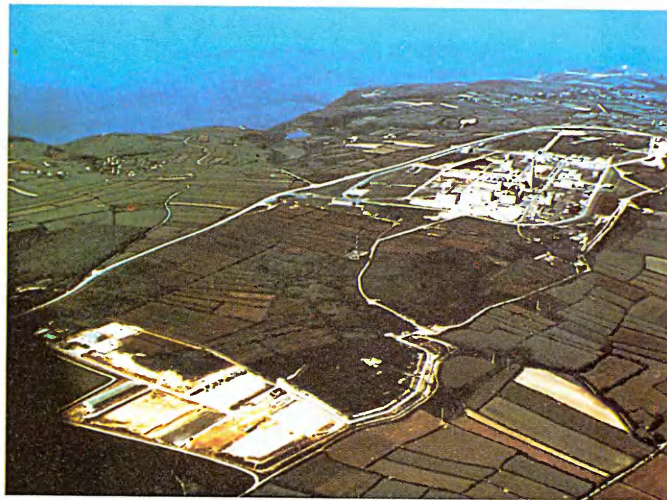
уровнем опасности.

Слабоактивные отходы в твердой или жидкой форме подвергают сначала концентрированию до минимального объема путем прессования, выпаривания или сжигания, а затем помещают в емкости и цементируют.

Среднеактивные отходы, например измельченную оболочку топливных стержней, также цементируют в специальных сосудах.

Высокоактивные отходы, в частности растворенные в азотной кислоте продукты распада, дающие 99% мощности радиоактивного излучения всех ядерных отходов, требуют особой осторожности в обращении. Для этих опасных веществ разработан метод остекловывания: растворы высокоактивных веществ концентрируют, подвергают химической обработке, сплавляют при температуре 1150°C со стеклянным порошком, а расплав сливают в толстостенные емкости из нержавеющей стали.

Одна регенерационная установка выдает на 1 тонну урана 130 л высокоактивных отходов в форме стеклянного блока, 5



Регенерационная установка La Hague (Франция).

емкостей по 400 л со среднеактивными и 15 емкостей – со слабоактивными отходами. И эти материалы должны быть надежно захоронены «на веки вечные», то есть бессрочно, так как еще через много поколений будут представлять реальную опасность.

Наилучшая возможность безопасного

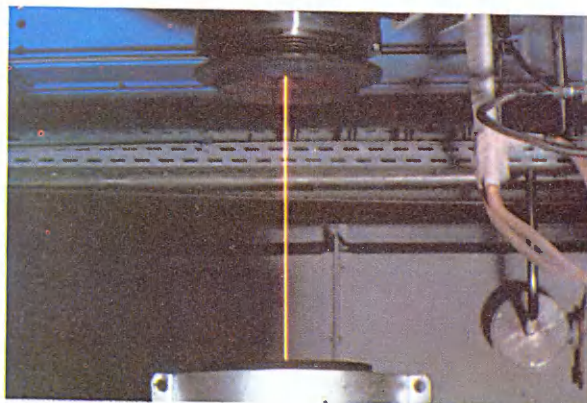
Как обеспечить безопасное хранение радиоактивных отходов?

хранения радиоактивных отходов в течение тысячелетий – это захоронение их в подземных соляных пластах. Емкости со слабоактивными отходами уста-

навливают в соляных штоках и послойно прокладывают солью. После заполнения



Слабоактивные отходы: лабораторные отходы, растворы, отходы от уборки, загрязненные фильтры и одежда.



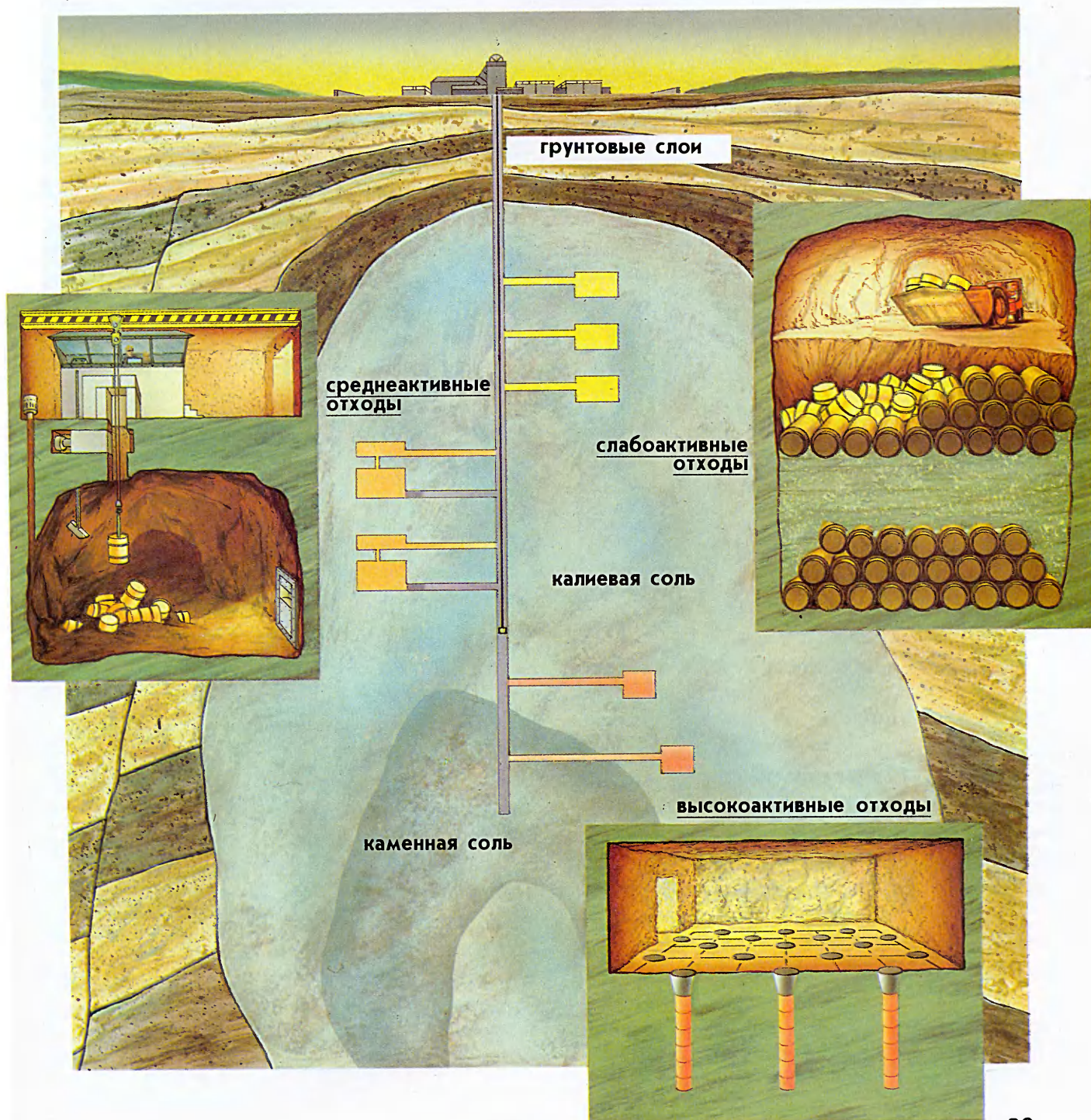
Технология глазурования для высокоактивных отходов: расплав стеклянной массы с опасными веществами стекает в емкость из нержавеющей стали.

штрека доверху его замуровывают. Для захоронения среднеактивных отходов требуется больше мер безопасности: готовят специальную штольню, в которую категорически запрещено входить даже обслуживающему персоналу, оснащают ее телекамерами для контроля и загружают сверху емкости с отходами в бе-

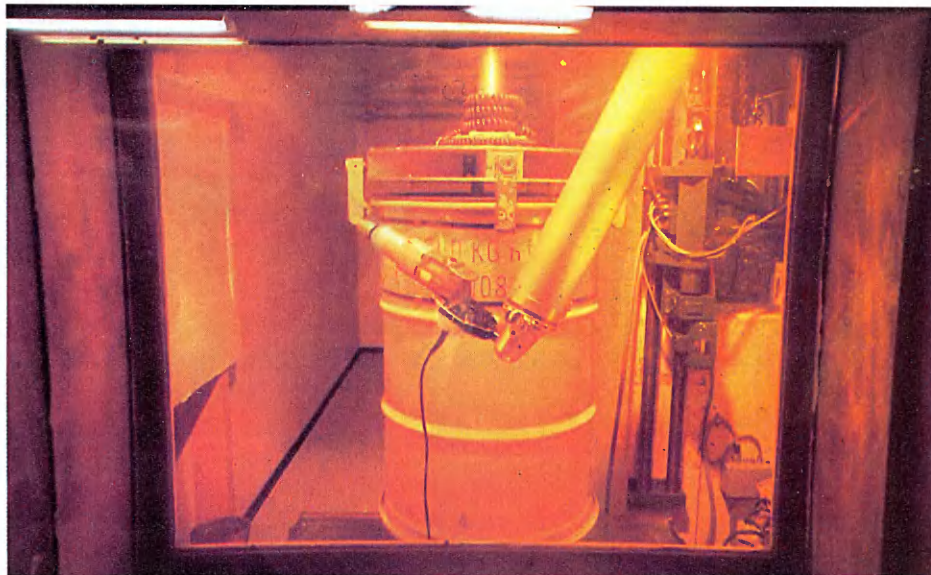
тонных резервуарах.

Захоронение высокоактивных отходов в соляных пластах осуществляют следующим образом: остеклованные отходы в емкостях из нержавеющей стали опускают в скважины глубиной 1000 м и замуровывают. Месторождения каменной соли особенно удобны для захоронения

Радиоактивные отходы лучше всего хранить в соляных штольнях. Технология хранения материалов со слабой, средней и высокой активностью различна.



Передвижная емкость для радиоактивных отходов. Сосуд обслуживается и транспортируется автоматически. Люди с ним никогда не соприкасаются.



из-за своей непроницаемости, поскольку соль не дает радиоактивности проникнуть в окружающую среду, в частности в грунтовые воды.

Существуют и другие проекты захоронения радиоактивных отходов. Например, предлагается хранить опасные материалы в старых шахтах или рудниках, то есть в наиболее глубоко залегающих слоях материковой скалы. Рассматривается также возможность организации могильников на Луне.

Если рассмотреть весь круговорот ядерного топлива, да еще и побочные расходы, например затраты на остановку и консервацию старых атомных

Рентабельна ли ядерная энергия?

электростанций, то может возникнуть ощущение, что ядерная энергия обходится слишком дорого. Однако исследование, проведенное Эссенским университетом, показало, что киловатт-час «ядерной электроэнергии» по стоимости равен киловатт-часу энергии из бурого угля, то есть дешевле, чем киловатт-час электричества, полученного из каменного угля. Соотношение это немного изменится, если учесть разный режим рабочего времени на электростанциях, но результаты исследования однозначно показали конкурентоспособность атомных электростанций по сравнению с обычными.

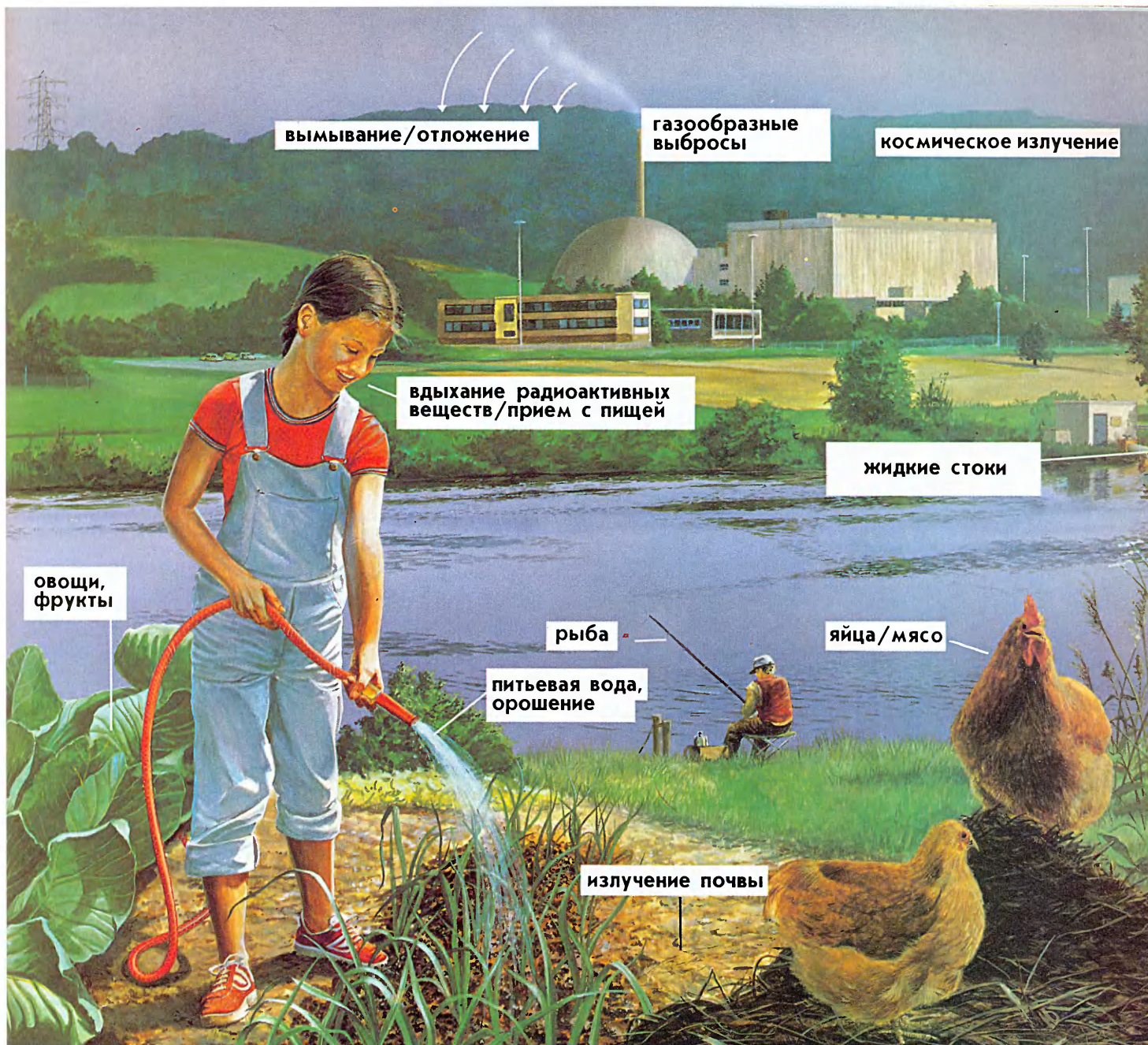
Так же обстоит дело и в Великобритании, где соотношение затрат на выработку электроэнергии из ядерного топлива и угля составляет 16,5:18,5, и в Японии, где оно равно 11:15.

Во Франции, особенно широко использующей ядерную энергию, это соотношение достигает 19:31 (по данным энергосетей и государственных органов).

Эти результаты противостоят пессимистическим данным экологических институтов, которые исходят из завышенных затрат на консервацию реакторов и захоронение отходов. По их представлению, «ядерная электроэнергия» дороже энергии, вырабатываемой из угля, на две трети.

Эти результаты, однако, противоречат экспертным данным независимых институтов. Кроме того, опыт работы по регенерации топлива, захоронению отходов и демонтажу атомных электростанций пока еще так невелик, что, пожалуй, только историки через несколько столетий смогут определить реальную цену киловатт-часа «ядерной электроэнергии». При этом нужно учитывать, что оценить последствия потенциальных аварий вообще не представляется возможным.

Таким образом, путем сравнения мы приходим к выводу, что на сегодняшнем уровне знаний и возможностей цена «ядерной» и «угольной» электроэнергии примерно одинакова.



Радиоактивное загрязнение окружающей среды.

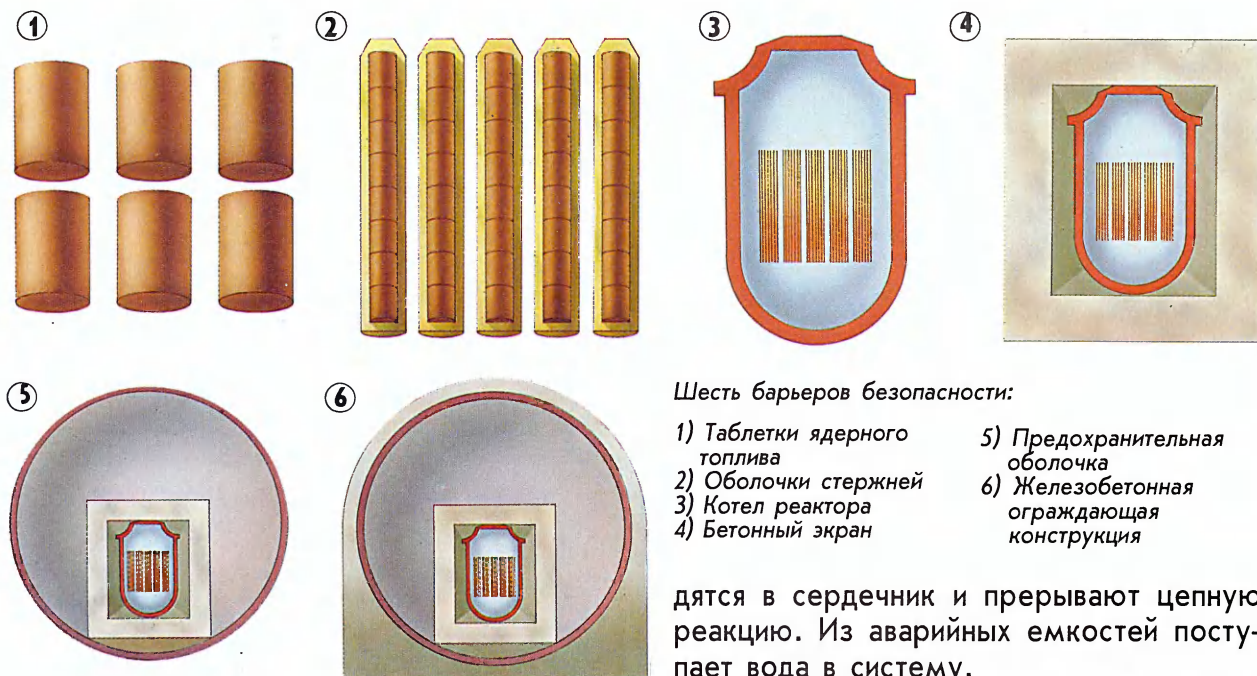
Ядерная энергия и окружающая среда

При эксплуатации атомных электростанций в топливных стержнях образуются радиоактивные продукты распада и ядра плутония, которые ни в коем случае не должны попасть в окружающую среду. Для обеспечения радиационной безопасности на современных немецких

Опасны ли атомные электростанции?

атомных электростанциях существует система из шести барьеров, непреодолимых для этих смертельно опасных ядер.

1. Расщепляемые материалы находятся внутри топливных таблеток.
2. Герметичные оболочки топливных стержней не позволяют опасным продуктам выйти наружу.
3. Следующий барьер образует котел реактора.



Шесть барьеров безопасности:

- | | |
|------------------------------|---|
| 1) Таблетки ядерного топлива | 5) Предохранительная оболочка |
| 2) Оболочки стержней | 6) Железобетонная оградящая конструкция |
| 3) Котел реактора | |
| 4) Бетонный экран | |

4. Все сооружения, из которых может исходить радиационная опасность, экранированы толстыми бетонными стенами. 5. Все это дополнительно заключено в замкнутую стальную оболочку («Containment»).

6. Последний барьер представляет собой бетонную оболочку толщиной более 1 м, которая не разрушится, даже если на него упадет самолет.

Радиоактивные вещества могут в заметном количестве попасть в окружающую среду только в том случае, если они преодолеют все шесть барьеров. Это может произойти только при отказе всех систем охлаждения. Это привело бы, правда, к немедленному обрыву цепной реакции, но из-за прекращения отвода тепла мог бы расплавиться котел реактора. Для предотвращения этого немецкие электростанции оснащены четырьмя независимыми системами охлаждения.

Крупнейшая вероятная авария (КВА) на атомной электростанции – неожиданный разрыв первичного контура охлаждения. При этом предохранительная оболочка (Containment) быстро заполняется перегретым паром, но параллельно автоматически включаются системы безопасности. Регулирующие стержни вво-

дятся в сердечник и прерывают цепную реакцию. Из аварийных емкостей поступает вода в систему.

Даже если начнет плавиться котел реактора, опасный расплав сначала войдет в контакт с мощным фундаментом, состоящим из многих тонн бетона и металла. Произойдет превращение верхних слоев бетона в стеклообразную массу, которая изолирует расплавленный реактор от нижнего слоя фундамента.

Кроме уже упомянутого падения самолета на реактор, атомные электростанции должны быть защищены от возможного землетрясения, штормового наводнения и взрывной волны. К сожалению, эффективно защитить электростанции от боевых действий, особенно от прямого ракетного обстрела, практически невозможно.

Не исключено также проникновение на атомную электростанцию вооруженных диверсантов, которые могут причинить непоправимый вред, однако в нормальное мирное время это предотвращается соблюдением многочисленных мер безопасности.

Итак, можно сделать вывод, что в мирное время наши немецкие атомные электростанции не представляют угрозы. Но при бомбардировке или взрыве на действующей станции мощностью 1300 МВт выброс радиоактивных веществ будет эквивалентен взрыву 1000 таких

бомб, как над Хиросимой. Огромные территории станут в этом случае непригодными для жизни.

Еще большая опасность может исходить от государств, где уровень безопасности в атомной энергетике ниже, чем в Германии. И яркий пример тому – Чернобыльская катастрофа, потрясшая весь мир!

Несмотря на все меры предосторожности,

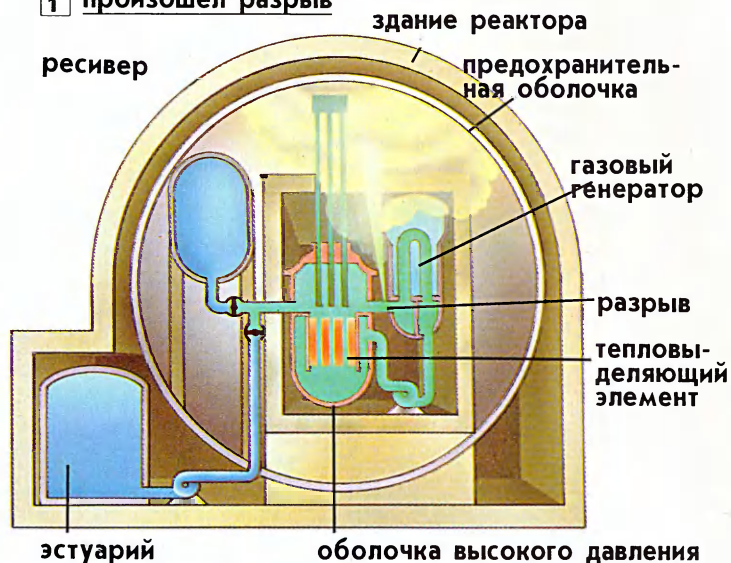
Загрязняют ли атомные электростанции окружающую среду?

предпринимаемые на атомных электростанциях, они выделяют незначительные количества радиоактивных веществ в воду и в атмосферу. И часть этого излучения поглощается человеком. Средняя эквивалентная доза, приходящаяся на душу населения, составляет 0,0005 миллизиверт (мЗв) в год. Это очень низкий уровень, если учесть, что естественные источники, например космическое излучение, приносят в сумме 2 мЗв в год. Сравнима с ней и доза, получаемая в среднем за год при рентгеновских обследованиях – 0,5–1 мЗв.

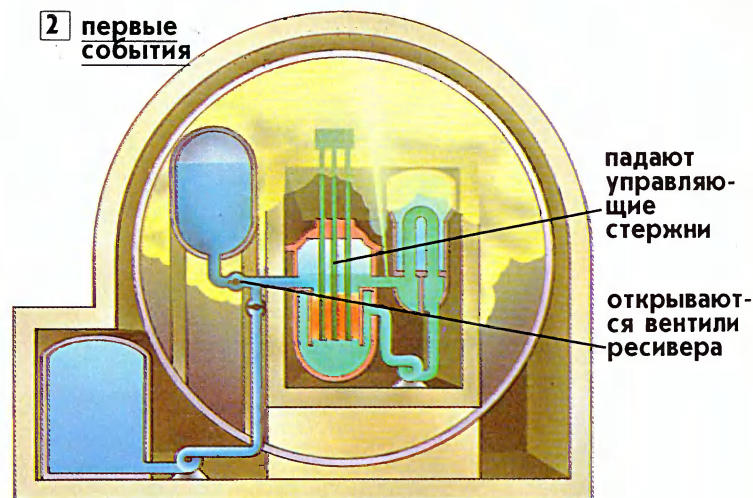
Несколько хуже обстоит дело для сотрудников атомных электростанций: для них годовая эквивалентная доза составляет 4,4 мЗв. В окрестностях электростанций люди также получают дополнительную дозу 0,02 мЗв в год, но это составляет лишь 1% от общего уровня. Эти цифры меняются от замера к замеру, но всегда остаются значительно ниже уровня, опасного для жизни и здоровья человека.

Вместе с этим атомные электростанции снимают часть нагрузки с окружающей среды. Сейчас каждый третий киловатт-час электроэнергии в ФРГ дают атомные электростанции. Таким образом, до 1986 года они по самым скромным оценкам избавили окружающую среду от выделения 2,7 миллиона тонн двуокиси серы, 1,4 миллиона тонн окислов азота и 300 000 тонн пыли, а также от ежегодных

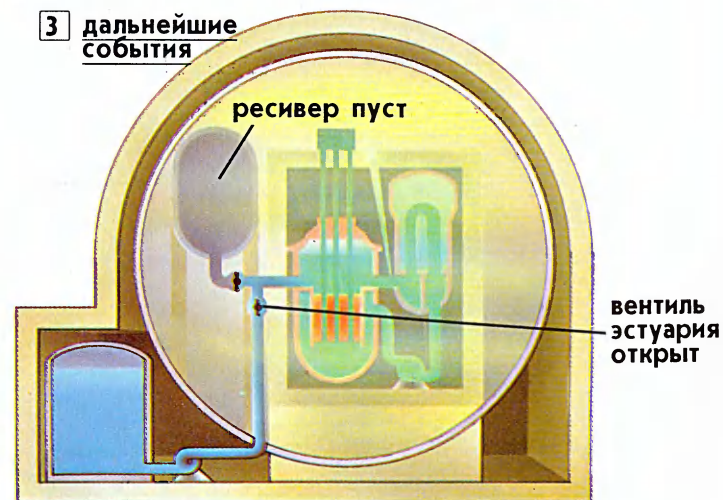
1 произошел разрыв



2 первые события



3 дальнейшие события



Что происходит при серьезной аварии? Разрыв первичного контура охлаждения приводит к выбросу воды и ее испарению. Немедленно опускаются регулирующие стержни и прерывают цепную реакцию. Ресивер и эстуарий обеспечивают подачу воды.

выбросов 150 миллионов тонн двуокиси углерода, которые были бы неизбежны при выработке этой энергии из ископаемого топлива и, несомненно, нанесли бы существенный ущерб окружающей среде и оказали бы вредное воздействие на здоровье людей.

Регенерационные установки, как и атом-

**Опасны ли
регенерационные
установки?**

ные электростанции, подчиняются действующим в ФРГ Нормам радиационной безопасности, согласно которым эквивалентная доза, обусловленная сточными водами и выбросами в атмосферу, не должна превышать 0,3 мЗв в год на душу населения. До 1991 в стране действовала одна небольшая регенерационная установка в Карлсруэ, на которой уровень радиационного загрязнения среды был всегда существенно ниже максимально допустимого.

Однако опасность крупных установок нельзя недооценивать. Ведь при растворении топливных стержней в азотной кислоте выделяются газообразные и летучие продукты распада. Эти вещества, конечно, улавливают разнообразными фильтрами, но стопроцентная очистка все равно невозможна. В окружающую

среду постоянно идут радиоактивные выбросы, например иод-129, особенно опасный для щитовидной железы, и криптон-85. Даже в нормальном режиме работы регенерационные установки дают больше радиоактивных выделений, чем атомные электростанции.

Гораздо страшнее могут быть последствия неисправности или саботажа. Если, например, выйдет из строя система охлаждения промежуточного хранилища для ядерных отходов, то огромное количество опасных для жизни веществ попадет в окружающую среду и сделает целый регион непригодным для жизни. Разумеется, в Германии – стране с высоким уровнем требований по безопасности и охране здоровья, делается все, чтобы не допустить подобных несчастных случаев. Вероятность аварии ничтожно мала.

Тем не менее в Германии, по-видимому, никогда не будет крупной регенерационной установки. От планировавшейся постройки такого объекта в Вакерсдорфе пришлось отказаться.

Топливные элементы из Германии будут передаваться на регенерацию в другие страны.

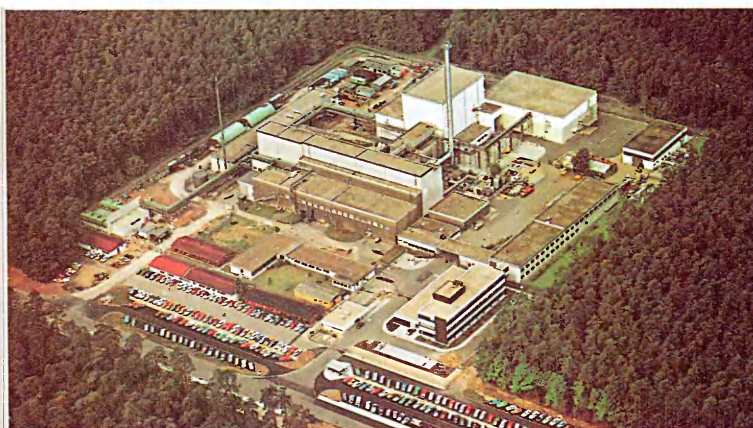
Соляные массивы, которые предназначены для захоронения

**Насколько
безопасно
захоронение
отходов ядер-
ного топлива?**

радиоактивных отходов, представляются нам на современном уровне знаний достаточно надеж-

ными. Благодаря пластичности форм каменной соли в массиве отсутствуют разрывы и трещины, через которые внутрь могла бы попасть вода, а возникающие изредка полости быстро затягиваются.

Кроме того, соляные массивы очень стабильны. Выбранные в Германии для захоронения соляные жилы уже 100 миллионов лет не соприкасаются с водоносными слоями, на них не влияют окружающие геологические изменения,



В Карлсруэ находилась единственная в ФРГ регенерационная установка. От эксплуатации промышленной установки в Вакерсдорфе (Бавария) отказались в 1989 году.



Градирни на атомной электростанции, находящейся в Библисе. Каждая из этих градирен за год выбрасывает огромное количество воды — 30 миллионов тонн.

например такие, как формирование гор.

Каменная соль обладает высокой теплопроводностью, что является очень важным фактором в первые несколько сотен лет после захоронения.

Особенно высокоактивные отходы, как уже было сказано выше, заплываются в стекло, становясь его частью, и уже не могут из него вымываться. Кроме того, это стекло находится в коррозионно-стойкой оболочке. Вследствие этого утечка радиоактивности практически невозможна, даже если вопреки всему вода проникнет в могильник.

Радиоактивное загрязнение окружающей среды становится возможным только в том случае, если зараженная радиоактивными отходами вода могла бы подняться сквозь сотни метров скальных пород и смешаться с грунтовыми водами. С точки зрения современной науки это не может произойти.

Добавим к этому также, что интенсивность радиоактивного излучения и тепловыделения уже приблизительно через 1000 лет в значительной мере снизится.

Градирни атомных электростанций мощностью 1500 МВт каждую секунду выбрасывают в атмосферу около тонны водяного пара. За год испаряется примерно 32 миллиона тонн воды, что составляет 16% от испарения всего озера Бодензее. На озере эта влага выпаривается с большой открытой поверхности, тогда как в градирне выброс пара сконцентрирован на малом пространстве. Это при определенных метеорологических условиях может изменить локальный климат, что выражается в появлении тумана и облаков, уменьшении солнечного излучения и более частых осадках. Особенно большие проблемы возникают осенью, когда влажность воздуха особенно высока; в сухую погоду влияние выбросов несущественно. На макросиноптическую ситуацию градирни не оказывают влияния.

Впрочем, все сказанное относится не только к атомным электростанциям, но и к любым электростанциям, где применяются градирни.

До недавнего времени во многих странах с радиоактивностью обращались, да и до сих пор часто обращаются весьма легкомысленно. Взрываются атомные

Могут быть опасны для нас ядерные реакторы других стран?

бомбы всех типов, ядерные отходы закапывают в землю без соблюдения каких-либо правил, либо сбрасывают в море. Так, в бывшем СССР по данным футуролога Р.Юнгка еще до Чернобыльской аварии целые населенные пункты были переселены из-за радиоактивного заражения, во Франции на регенерационной установке La Hague произошла целая серия мелких аварий, повлекшая за собой более или менее значительные радиоактивные выбросы. После запрещения испытаний ядерного оружия в трех сферах (в атмосфере, в космическом пространстве и под водой; Московский договор 1963 года) загрязненность окружающей среды радиоактивными веществами пошла на убыль. Но наличие соседних стран, не обладающих такими традициями экологической безопасности, как Германия, продолжает вызывать беспокойство.

Страшная авария на реакторе в Чернобыле со всей очевидностью показала нам, какая опасность исходит от атомных электростанций в других странах. А против уголовников, террористов или военной угрозы нет стопроцентной защиты и в Германии.

Ядерный взрыв на атомной электростанции

Может ли атомная электростанция стать атомной бомбой?

невозможен даже при выходе из строя всех систем безопасности или оккупации станции террористами, потому что ядерное топливо в реакторе содержит всего 3% из расщепляющегося U-235, тогда как для ядерного взрыва потребовалась бы гораздо более высокая степень обогащения. Даже топливо бри-

деров на быстрых нейтронах не настолько обогащено, чтобы взорваться, подобно атомной бомбе, как часто утверждают противники этих реакторов. В их тепловыделяющих элементах содержится всего 20–30% расщепляющегося материала, а в атомной бомбе – почти 100%.

На атомных электростанциях энергия

Что такое атомная бомба?

ядра освобождается, но тут же снова связывается. Цепные реакции протекают здесь под полным контролем и обеспечивают равномерную подачу электроэнергии. В атомной бомбе неконтролируемые цепные реакции протекают с расщеплением такого количества ядер, что за доли секунды выделяется огромное количество энергии, способное вызвать невероятные разрушения. Для такого взрыва необходим практически чистый уран-235 или плутоний-239. Пассивный U-238, способный предотвратить катастрофу, отделяется изотопными фильтрами.

Кроме того, необходимо наличие определенного минимального количества расщепляющегося материала, *критической массы*, чтобы нужное количество нейтронов могло вызвать расщепление ядер, не вылетая за пределы заряда. Эта критическая масса составляет для урана, как мы уже упоминали, 23 кг, а для плутония-239 всего 5,6 кг – шарик размером с теннисный мяч.

Есть разные типы атомных бомб. Например, можно над целью соединить два куска урана с массой каждого ниже критической; соединившись, они превзойдут критическую массу.

Исходный импульс для начала цепной реакции обеспечивает источник нейтронов. И тут начинается ад! Почти каждый нейтрон расщепляет новое ядро, возникающие при этом 2-3 новых нейтрона вызывают новые распады.



Взрыв водородной бомбы.

Никакой регулирующий стержень не остановит нарастающую нейтронную лавину. За несколько миллиардных долей секунды в результате бесчисленных ядерных распадов выделяется не только колоссальная энергия, но и смертельная радиация. Высокоактивные продукты распада, которые в мирное время заливают стеклом и хранят в соляных пластах, сыплются с неба на поля, леса и города, неся гибель всему живому.

Исчезающая при взрыве масса сравнительно невелика. При взрыве бомбы в Хиросиме превратился в энергию всего 1 г вещества, но это унесло 200 000 человеческих жизней.

Водородная бомба – еще более страшное оружие, чем атомная бомба. В ней за счет взрыва урана или плутония достигаются температуры порядка не-

Что такое водородная бомба?

скольких миллионов градусов. При этих условиях находящиеся внутри бомбы изотопы водорода сливаются в ядра гелия и освобождают неописуемое количество энергии. Здесь мы видим дьявольскую комбинацию расщепления

ядер и ядерного синтеза.

Сравнительно небольшая атомная бомба, разрушившая японский город Хиросиму в 1945 году, обладала взрывной силой в 20 килотонн тринитротолуола (тротила) – обычной взрывчатки, используемой в качестве эталона. Мощность же самой большой из взорванных водородных бомб составила 58 мегатонн, что примерно соответствует 3000 таких бомб, как та первая, взорванная в Хиросиме.

Только в США и бывшем Советском Союзе вместе взятых имеется около 40 000 ядерных зарядов разной мощности. Лишь малой части этого запаса хватило бы для полного уничтожения жизни на Земле.

Ядерная мировая война – ужаснейшая из

Как мог бы выглядеть мир после ядерной войны?

возможных катастроф, куда хуже, чем любые эпидемии и чумы, землетрясения, извержения вулканов и химические экологические катастрофы вместе

взятые. Конечно, все правительства на Земле сейчас делают все возможное, чтобы предотвратить такой конфликт, поскольку, в отличие от прежних завоевательных войн, в этой войне победителей не будет, будут только потерпевшие.

Однако абсолютно исключить возможность такой войны при сегодняшней напряженности в международных отношениях нельзя, тем более что она может разразиться из-за технической неисправности или по воле сумасшедшего диктатора. Результатом был бы не только счет жертвам на миллионы и миллиарды, но и радиоактивное заражение всего уцелевшего, особенно генфонда растений, животных и людей. Многие виды вымрут, поскольку поднятая ядерными взрывами пыль на многие месяцы закроет Солнце, поглотит часть солнечного излучения, вызо-



вет новый ледниковый период. Вся человеческая цивилизация, от транспорта до здравоохранения, будет разрушена, если вообще в этой войне будут выжившие. Пройдут многие столетия, прежде чем Земля сможет хотя бы частично восстановиться после страшной катастрофы.

Описанные в этой главе опасности ядерной энергетики не должны заслонять от нас ее преимущества. Сейчас на Земле живет более 5 миллиардов человек, скоро их станет 8 миллиардов. Всем им необходима энергия. Хищническое сжигание ископаемого топлива погубило бы окружающую среду, неизбежно привело бы к изменениям климата, лишило бы наших потомков запасов этого ценного сырья.

Наиболее чистый и, к сожалению, малопопулярный источник — солнечная энергетика — лишь начинает развиваться. Энергия воды, ветра и приливов явно недостаточна для удовлетворения растущих потребностей многомиллиардного населения.

Ядерные реакторы при нормальной эксплуатации, когда соблюдаются все необходимые правила, являются экологически безопасными. Они расходуют сырье (уран и плутоний), которое ни для чего

Хиросима. Разрушение этого города атомной бомбой привело к завершению второй мировой войны. Японии пришлось капитулировать.

другого не пригодно. К тому же из малого количества урана можно получить большое количество энергии, что дает возможность создать долгосрочные запасы ядерного топлива без значительных складских расходов.

Итак, перед нами огромные преимущества ядерной энергии против возможности крупномасштабного радиоактивного заражения. Вообще-то вероятность такого несчастного случая можно свести к ничтожному уровню, если все страны согласятся принять немецкий стандарт безопасности, что совершенно неизбежно после предупреждения, которое получил весь мир после катастрофы на атомном реакторе в Чернобыле. Более того, отметим, что дальнейшее хищническое сжигание ископаемого топлива может привести к экологической катастрофе, последствия которой поистине непредсказуемы для всего живого на земле.

В конечном счете уголь и нефть, также как и уран с плутонием, в перспективе должны уступить место более надежным и экологически безопасным технологиям в энергетике, разработке которых ученые должны посвятить свои будущие проекты и научные исследования.

Следует ли мне выступать за или против ядерной энергии?