

Ян Гор-Лесси

ЯДЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

**Урановый информационный центр,
Совет полезных ископаемых, Австралия**

Перевод с английского
доктора физико-математических наук **В.С. Малышевского**

**Ростиздат
Ростов-на-Дону
2002**

Nuclear Electricity

by

Ian Hore Lacy

Sixth edition, August 2000

Uranium Information Centre Ltd

in association with Minerals Council of Australia

ISBN 0-9593829-8-4

Ростовский информационно-аналитический центр РоАЭС

Я 44, Ян Гор-Лесси, Ядерное электричество, монография, перев. с англ., Ростов-на-Дону, ОАО "Ростиздат", 2002 -112 с. илл.

Книга знакомит читателей с положением дел в энергопотреблении и развитии энергетики в мире. Приводятся прогнозы, перспективы и тенденции в производстве и потреблении электроэнергии. Дается сравнительная характеристика различных способов производства электроэнергии и ресурсов энергоисточников. Подробно рассматриваются проблемы безопасности атомной электроэнергетики, ядерного топливного цикла и его воздействия на окружающую среду. Книга рассчитана на широкий круг читателей, а также на специалистов, студентов и учителей.

© Uranium Information Centre Ltd, 2000

© Перевод на русский язык В.С. Малышевский, 2002

© Оформление "Студия "Князь Гвидон" , 2002

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ	5
ОБРАЩЕНИЕ АВТОРА К РОССИЙСКИМ ЧИТАТЕЛЯМ	8
ВВЕДЕНИЕ	10
ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ.....	12
1.1 Энергия сегодня	12
1.2 Потребности в энергии.....	13
1.3 Производство энергии	14
1.4 Изменения в энергопотреблении и энергопроизводстве	16
1.5 Энергопотребление и энергопроизводство будущего	18
ГЛАВА 2. ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА	20
2.1 Спрос на электроэнергию	20
2.2 Снабжение электроэнергией.....	22
2.3 Топливо для производства электроэнергии сегодня	24
2.4 Ресурсы для будущего производства электроэнергии	26
2.5 Возобновляемые источники энергии.....	30
2.6 Сравнение угля и урана	35
2.7 Экономические факторы	36
ГЛАВА 3. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ.....	41
3.1 Масса и энергия	41
3.2 Ядерные реакторы	42
3.3 Доступность урана.....	46
3.4 Энергетическая отдача ядерных реакторов	48
3.5 Ядерное оружие как источник топлива.....	49
3.6 Торий как ядерное топливо	50
3.7 Исследовательские реакторы	51
3.8 Атомный флот.....	51
3.9 Другие приложения ядерной энергии.....	51
3.10 Системы, управляемые ускорителем	51
ГЛАВА 4. НАЧАЛО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА	52
4.1 Добыча и переработка урановой руды	52
4.2 Ядерный топливный цикл.....	55
4.3 Реакторы нового поколения.....	60
4.4 Реакторы на быстрых нейтронах	64
4.5 Ториевый цикл.....	65
ГЛАВА 5. ОКОНЧАНИЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА	68
5.1 Ядерные "отходы"	68
5.2 Переработка отработанного топлива	71
5.3 Высокоуровневые отходы после переработки	73
5.4 Размещение и хранение отработанного топлива	75
5.5 Размещение и хранение остеклованных отходов	78
5.6 Снимаемые с эксплуатации реакторы	81
ГЛАВА 6. ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА, ЗДОРОВЬЕ И ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ	84
6.1 Влияние на окружающую среду	84
6.2 Парниковый эффект.....	86
6.3 Излучение и здоровье	87

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

6.4 ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ.....	93
6.5 БЕЗОПАСНОСТЬ РЕАКТОРОВ	94
ГЛАВА 7. ПОЛИТИЧЕСКИЕ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ	98
7.1 МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО	98
7.2 МЕЖДУНАРОДНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	100
7.3 ЯДЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	102
7.4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРУЖЕЙНОГО УРАНА И ПЛУТОНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	106
7.5 ПОЛИТИКА АВСТРАЛИИ И КАНАДЫ В СФЕРЕ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ	108
РАДИОАКТИВНОСТЬ И ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	108
СЛОВАРЬ НЕКОТОРЫХ ТЕРМИНОВ	113
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	120

Предисловие к русскому изданию

В декабре 2001 года произошло знаменательное событие - в России пущена в промышленную эксплуатацию десятая атомная электростанция - Волгодонская АЭС. Ввод в эксплуатацию первого энергоблока Волгодонской АЭС обеспечит энергетическую независимость Северокавказского региона страны и позволит в будущем решать проблемы энергоснабжения Ростовской области и, как следствие, обеспечивать рост промышленного производства предприятий региона.

В целом по России, действующие мощности АЭС являются системообразующими в европейской части нашей страны, и доля производства ими электроэнергии составляет почти 15%. Сегодня для специалистов ясно, что **перспективы роста энергопотребления в России напрямую связаны с ростом производства электроэнергии на атомных станциях.**

Но, как пишет автор, предлагаемой Вашему вниманию, книги: "всякий раз, когда вопрос об использовании ядерной энергии возникает вновь, появляются такие, кто желал бы поместить джина обратно в бутылку и вернуться к эпохе "до ядерной невинности". Насколько обоснованы такие желания и как они вписываются в стандарты современной жизни?

Представьте себе мир без энергии - ржавеют в гаражах и у подъездов автомобили, навсегда застыли на опустевших вокзалах поезда, о самолетах и кораблях вспоминают, как о чудесах Атлантиды. В морозные, долгие зимы темные, заледенелые дома освещают только огни костров, у которых греются люди, у колодцев стоят длинные очереди - за водой, а магазины, театры и клубы - закрыты. Глашатаи на площадях заменят нам радио, разговоры с соседями - телевидение, почтовые голуби - телефон. Нет энергии - нет движения. А чем мы со временем будем заменять ткани, бумагу, металл? Ведь все заводы, все производства остановлены, век прогресса окончен. Мир погружается во мрак и голод, возвращаются страшные, глухие времена. Всего лишь из-за недостатка в энергии? Именно так! Без пищи, без энергии остановится и погибнет не только человеческий организм, но и огромный, сложный хозяйственный организм страны и мира. А «пищей», обеспечивающей промышленный комплекс энергией, являются так называемые энергоносители - уголь, нефть, газ. Иначе говоря, ископаемое органическое топливо. Когда-то даже говорили, что нефть - кровь экономики. И в этом была своя правда.

Однако времени с тех прошло много, и в мировой экономике многое изменилось. Меняется стратегия получения и расходования энергии, приходит понимание необратимого характера процессов потребления энергии, ограниченности мировых энергетических ресурсов. Появилось, наконец, и точное знание о размерах этих запасов - увы, в этом случае нельзя успокоить себя мыслью, что "на наш век хватит". Не надо забывать, что чем выше уровень экономического развития общества, чем шире круг его интересов, планов, желаний - тем больше его энергетические потребности.

Обеспечение человечества энергией является одной из главных проблем, решение которой определяет его устойчивое развитие, то есть развитие без истощения экологических и социальных ресурсов и без переноса непропорционально тяжелого бремени на будущие поколения. Только найдя экологически устойчивый путь к производству и использованию энергии, мы можем рассчитывать на энергетически обеспеченное будущее. Иными словами, условием устойчивого развития является достижение ситуации, когда человечество во всех сферах жизни и деятельности в любой момент времени распо-

лагают необходимым количеством энергии, доступным индивидуально, локально или глобально наиболее экономным и безопасным способом. Поэтому постоянное увеличение производства энергии имеет жизненно важное значение для достижения целей экономического и промышленного развития.

Некоторые защитники окружающей среды полагают, что проблемы экологии, связанные с использованием энергии, могут быть решены путем меньшего ее потребления. Однако, при безусловной необходимости развития и совершенствования энергосберегающих технологий, нереально думать, что глобальное потребление энергии может быть уменьшено.

По данным Международного энергетического конгресса, **после 2000 года будет достигнут максимум использования ископаемых источников, после чего ожидается заметное истощение их запасов.** К настоящему времени свыше 20% основных мировых потребностей в энергии для производства электричества удовлетворяется за счет возобновляемых источников. Основной вклад обеспечивают гидроэлектростанции, однако, возрастают темпы развития и новых возобновляемых источников. Заменяя ископаемое топливо, возобновляемые источники уже ежегодно снижают выбросы двуокиси углерода на полтора миллиарда тонн (около 7% выбросов), а к 2020 году это сокращение может достигнуть девяти миллиардов тонн - 40% современного уровня выбросов.

Однако, возобновляемые источники энергии не лишены собственных экологических недостатков. Необходимо учитывать весь цикл их использования, а не только воздействие на окружающую среду во время эксплуатации. Для возобновляемых источников выбросы (и прочие воздействия) на всех этапах, помимо непосредственной эксплуатации, эквивалентны или превышают выбросы на тех же этапах рабочего цикла традиционных технологий производства энергии. Причина состоит в том, что при использовании возобновляемых источников, последние имеют относительно низкую плотность энергии по сравнению с концентрированными ископаемыми видами топлива и ураном. Сбор этих источников и их преобразование, как правило, требуют на единицу произведенной электроэнергии больше технических устройств и более крупных сооружений, которые, в свою очередь, нуждаются в дополнительной энергии для их изготовления и строительства. Кроме этого крупные проекты гидроэнергетики связаны с переселением, потерей мест обитания, изменением уровня грунтовых вод и т.д. В фотоэлектрических батареях и аккумуляторах значительная часть используемых материалов токсична. Геотермальные источники нередко сопровождаются выбросами тяжелых металлов, которые могут попасть в грунтовые воды. Ветроэнергетические установки создают мощные акустические колебания небезвредные для здоровья и создающие помехи для радиосвязи.

Структура используемых источников энергии весьма различна в разных странах при общей тенденции более широкого применения органических видов топлива. Не отрицая очевидных преимуществ использования возобновляемых источников энергии, современная оценка этого пути развития дает основания полагать, что **главным источником в обозримом будущем будет ядерная энергетика.** Конкуренции в долговременной перспективе у нее нет, кроме, пожалуй, использования термоядерной энергии, но этой технологии еще предстоит доказать свою эффективность. Несомненным препятствием к широкомасштабному использованию ядерной энергетики является наличие ряда негативных тенденций в восприятии ее обществом. Понятна озабоченность общества этими проблемами после аварии на Чернобыльской АЭС. Постоянно инициируется средствами массовой информации - и, соответственно, возбуждает общественное мнение - проблема

хранения и переработки отходов ядерной промышленности и энергетики. К сожалению, недостаток объективных сведений затрудняет непредвзятое отношение к этим проблемам. Неоправданно эмоциональная реакция ведет к потере точек соприкосновения с действительностью и может приводить к необоснованным решениям с печальными последствиями для развития общества. Трудно не согласиться с автором книги, когда он пишет, что "каждый способ производства и преобразования энергии оказывает влияние на окружающую среду и несет определенные риски. Ядерная энергетика не исключение, но ее влияние часто неправильно истолковывается, а риски излишне завышаются. Ядерная энергия остается безопасным, доступным и экономичным источником электроэнергии". И "если большие усилия направлять в обеспечение безопасности и эффективности коммерческой ядерной энергетике, и, соответственно, меньше в идеологические сражения с теми, кто желал бы видеть мир без нее, мировое сообщество значительно выиграло бы материально".

В предлагаемой Вашему вниманию книге все эти аспекты освещаются на основе достоверных фактов и непредвзятого, научного анализа. Автора книги, Яна Гора-Лесси, директора Австралийского уранового информационного центра, трудно заподозрить в лоббировании интересов ядерной индустрии. В Австралии нет ни одной атомной электростанции, но есть богатейшие запасы угля. Именно поэтому точка зрения автора, уверен, будет важна для заинтересованного читателя в формировании объективной позиции, основанной на научном понимании предмета.

В отличие от английского издания, в перевод книги на русский язык не включена восьмая глава, посвященная анализу природных ресурсов Австралии и Канады. Кроме того, сокращены и переработаны Приложения и список рекомендуемой литературы.

А.С. Боровик

Директор Ростовского информационно-аналитического центра РоАЭС

Обращение автора к российским читателям

В каждой стране мира имеются люди, которые противятся новым технологиям и тоскуют по более простой, приближенной к природе, жизни. Хотя мы и уважаем такую точку зрения, она, однако, несовместима с проживанием в современном густонаселенном мире, в котором люди желают быть мобильными, и стремятся к высокому уровню жизни. Важнейшей надеждой людей в этом является безопасное производство электроэнергии на непрерывной и стабильной основе.

Новая Российская атомная электростанция в г. Волгодонске поможет оправдать надежды населения вашей страны. Она построена с учетом многолетнего Российского опыта, накопленного в ядерной энергетике, начиная от производства электроэнергии до использования в морском флоте и в космических исследованиях. Ростовские реакторы аналогичны четырем на Балаковской атомной электростанции и нескольким в Восточной Европе: пятому и шестому энергоблокам в Козлодуде (Болгария), первому энергоблоку в Темелине (Чешская республика), энергоблокам в Хмельнице, Ровно и шести Запорожским на Украине. Вместе они много лет безопасно эксплуатируются, начиная с 1985 года.

Книга "Ядерное электричество" обобщает такой опыт в более широком мировом контексте и содержит много сведений о том, как работает реактор, как утилизируются отходы, что такое радиация и безопасность, как решаются проблемы охраны окружающей среды. Прочтя эту книгу, вы поймете, почему тщательно разработанные и должным образом управляемые ядерные реакторы являются хорошими соседями, в отличие от грязных индустриальных объектов прошлых столетий.

Благодарности

В отличие от 4-го издания, книга включает в себя существенный вклад сотрудников корпорации "Атомная энергия Канады" (АЕС Ltd.), которые значительно помогли в развитии более широкого подхода к теме и в написании нескольких глав. Дебора Блакстон координировала эту работу. Многие сотрудники АЕС Ltd. помогли проверить некоторые разделы книги и внесли существенный вклад в обеспечение их точности и законченности. Им я очень благодарен за оказанную помощь, как в подготовке данной книги, так и в содействии функционирования Уранового информационного центра.

Ян Гор-Лесси

Генеральный директор Уранового информационного центра, Мельбурн, Австралия

Об Авторе

Ян Гор-Лесси, биолог, с 1995 года Генеральный директор Уранового Информационного Центра. Он посетил множество ядерных реакторов и центров по переработке и хранению ядерного топлива в нескольких странах, включая перерабатывающие заводы Великобритании, Шведские хранилища и Французские обогатительные фабрики.

В 1974 году как ученый эколог начал изучение горнодобывающей промышленности и получил некоторое знакомство с добычей и производством урана. С 1988 по 1993 написал несколько книг по экологии и горнодобывающей промышленности.

Научные интересы сосредоточены в сфере использования природных ресурсов (от технических до этических и теологических аспектов).

Более ранние издания этой книги написаны вместе Роном Хоубери. Рон Хоубери инженер химик, ныне пенсионер, провел восемь лет на службе в Австралийской комиссии по ядерной энергии.

Предисловие к шестому изданию

В течение первых пятидесяти лет 20-го столетия стратегические решения, которые принимали власти в разных странах, были сравнительно прямыми и простыми. Сегодня многие факторы, включая появление новых технологий, рост численности населения, свобода перемещения, использование глобальных средств связи, сделали вопросы принятия жизненно важных для общества решений намного более сложными.

Производство и использование энергии во всех своих формах требует серьезного научного понимания. Решение следовать той или иной энергетической политике приводит к определенным социальным и экологическим последствиям. Во многих случаях эти последствия трудны для предсказаний и могут приводить к противоречиям в обществе.

Именно педагоги несут ответственность за информированность молодых людей относительно понимания причин этих противоречий с экономической, научной и социальной точки зрения. Студентам нужно давать возможность взвешивать противоположные точки зрения для формирования их собственного мнения на основе всестороннего понимания предмета.

Более ранние издания книги "*Ядерное электричество*" содержат полезные данные и ссылки о ядерной энергетике, о других способах производства электрической энергии и о воздействии на окружающую среду альтернативных источников электроэнергии.

Шестое издание книги "*Ядерное электричество*" продолжает основную концепцию предыдущих изданий и включает в себя более современные данные и ссылки. Книга будет интересна всем, особенно ученым, педагогам и нашим молодым людям, которым предстоит строить общество 21-ого столетия. Они должны быть непредубежденными и хорошо информированными о всех спорных проблемах. Это поможет будущим поколениям быть хорошо подготовленными для лучшей заботы о среде своего обитания и о себе.

М. Колвилл

Президент
Австралийской научной ассоциации учителей

ВВЕДЕНИЕ

Единственное использование неоружейного урана осуществляется лишь в мощных ядерных реакторах. Во всем мире сегодня эксплуатируются более 1000 ядерных реакторов:

- Приблизительно 280 малых реакторов используются для научных исследований и производства изотопов для медицины и промышленности. *
- Более 400 реакторов приводят в движение морские суда, главным образом, атомные подводные лодки.
- Более 430 мощных реакторов используются для производства электроэнергии.

*Австралия имеет только один исследовательский действующий реактор, который будет заменен в 2005 году. Канада имеет несколько малых исследовательских реакторов в университетах и два малых реактора, предназначенных для производства изотопов, которые находятся в стадии строительства.

Фактически весь уран, производимый сегодня, идет на производство электроэнергии (хотя незначительное его количество используется для создания радиоизотопов). Его использование в этих целях уже конкурирует с углем и с природным газом.

Более чем за 40 последних лет ядерная энергия стала одним из главных источников электроэнергии в мире. Сейчас вклад ядерной энергетики в мировое производство электроэнергии составляет 16 процентов, что эквивалентно полному производству электроэнергии "тринадцатью Австралиями" или "пятью Канадами". Ядерная энергия может внести вклад и намного больший, особенно если по экологическим соображениям она будет признана экономически более выгодной и этически желательной. А Австралийский и Канадский уран будет необходим для того, чтобы снабжать топливом часть этого мирового производства электроэнергии.

Дебаты вокруг урана, ядерной энергетики и иных способов производства электроэнергии говорят нам о том, что ни один из них не обходится без некоторого риска или побочных эффектов

После первого издания этой книги в 1978 многие из оптимистических прогнозов относительно альтернативных источников энергии оказались совершенно нереалистичными (также как и некоторые прогнозы относительно ядерной энергии). Однако, важно понять, что возвращение к действительности не должно привести к их полному пренебрежению. Альтернативные источники энергии должны и дальше исследоваться и применяться там, где они соответствуют своему назначению. В особенности большой эффект может быть достигнут при правильном согласовании расположения, масштаба и термодинамических характеристик источников энергии со специфическими энергетическими потребностям. Такие действия должны иметь более высокий приоритет по сравнению с прямым увеличением производства "высокосортной" электроэнергии в условиях, где требуется только "низкосортная" теплота..

Всякий раз, когда вопрос об использовании ядерной энергии возникает вновь, появляются такие, кто желал бы поместить джина обратно в бутылку и вернуться к эпохе "до ядерной невинности". Такие настроения становятся преобладающими и в Австралии, потому что эта страна никогда не использовала ядерную энергию. Австралия, вероятно,

единственная развитая страна, в которой, жители не получают никакой доли "ядерного электричества". Заметим, что Франция вырабатывает 75 процентов всей электроэнергии только за счет своей ядерной энергетики. Это самый крупный в мире экспортер электроэнергии, получающий почти пять миллиардов долларов в год от такого экспорта. По соседству - Италия, одна из индустриальных стран без каких-либо работающих атомных электростанций. Это самый крупный в мире импортер электроэнергии, большая часть которой поступает из Франции.

Весь Австралийский и Канадский уран продается исключительно на мирное использование, преимущественно для производства электроэнергии. Ничего не идет на изготовление оружия - это гарантировано международными мерами безопасности.

И я надеюсь, что наши следующие поколения будут смотреть на ядерное оружие скорее как на начальную "болезнь роста" ядерного века, чем как на главную его характеристику (что было характерно для бронзового и железного веков).

При написании этой книги были предприняты значительные усилия, чтобы учесть все многообразие современной информации о производстве электроэнергии с помощью ядерных установок. Приводимые в книге данные и цифры являются общепризнанными, и обобщения не нарушают строгости нашего исследования. Читатель не увидит на страницах многих из часто повторяемых утверждений сторонников или противников ядерной энергетики. В книге мы не будем обсуждать и социальные проблемы. Начиная с первого издания, намерение авторов состояло в том, чтобы отойти от споров, от предвзятого подбора аргументов, а представить только факты относительно энергетических потребностей человечества и как они могут удовлетворяться, в том числе и ядерной энергией. Текст был полностью проверен экспертами, которые несут ответственность перед обществом за свой профессионализм. Четвертое издание книги для школ и населения было подготовлено в рамках совместной Австралийской и Канадской инициативы и это сотрудничество продолжается до сих пор.

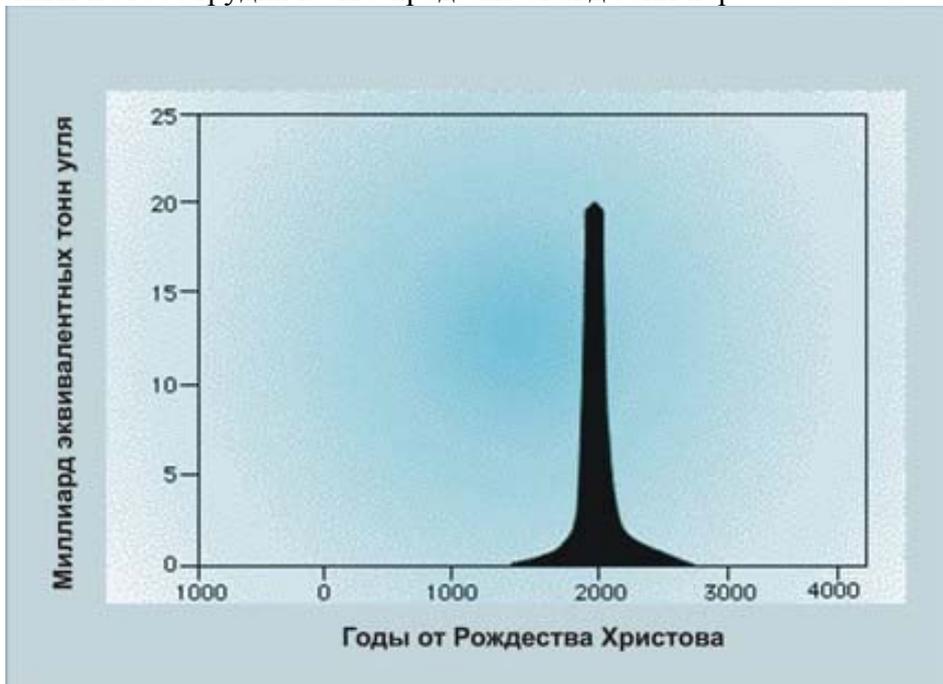


Рисунок 1. Расход органического топлива

Мы не можем неограниченно использовать органическое топливо с таким темпом, как мы делаем это сегодня.

Каждый способ производства и преобразования энергии оказывает влияние на окружающую среду и несет определенные риски. Ядерная энергетика не исключение, но ее влияние часто неправильно истолковывается, а риски излишне завышаются. Ядерная энергия остается безопасным, доступным и экономичным источником электроэнергии.

Настоящее 6-ое издание этой книги выходит в то время, когда нарастает беспокойство за непрерывное загрязнение среды, усиливается недоверие к науке и технике, "демонизируется" ядерная энергетика. Это беспокойство обусловлено с одной стороны появляющимися доказательствами увеличения глобальных температур, вызванных сжиганием органического топлива, а с другой стороны - Чернобыльской катастрофой 1986 года. Во введении к первому изданию этой книги в 1970-ых выражалось мнение, что, если большие усилия направлять в обеспечение безопасности и эффективности коммерческой ядерной энергетике, и, соответственно, меньшие в идеологические сражения с теми, кто желал бы видеть мир без нее, мировое сообщество значительно выиграло бы материально. После трагического опыта Чернобыля и последовавших существенных изменений в оценке безопасности ядерных объектов, появившихся сегодня возможностях рециркуляции оружейного урана для производства электроэнергии, кажется, что сегодня мы наиболее близки к такому состоянию дел.

ГЛАВА 1 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

1.1 Энергия сегодня

Вся потребляемая энергия приходит к нам, в конечном счете, или от солнца или из недр земли. Солнце согревает нашу планету, снабжает требуемым светом и теплом растения для роста. В далеком прошлом солнце таким же образом снабжало нашу планету энергией. Эта энергия преобразовывалась в растения, поддерживала жизнь животных. Благодаря этому мы получаем сегодня уголь, нефть и природный газ - так называемые органические топливные ресурсы, от которых существенно зависит наша цивилизация.

Единственный альтернативный источник энергии не органического происхождения, находящийся в земле, - это атомы некоторых элементов, которые сформировались задолго до появления солнечной системы. Они находятся сегодня в земной коре*.

* Уран, содержащийся в земной коре, сформировался приблизительно 6.5 миллиардов лет назад, и его концентрация в среднем составляет 0.14 %. Теплота от радиоактивного распада этого урана сегодня управляет процессами конвекции в земной коре.

Количество энергии на единицу массы атома зависит от размера атома: минимальное количество энергии на единицу массы содержится в атомах средних размеров (таких как углерод и кислород), в то время как большее количество содержится в малых атомах (таких как водород) или больших (таких как уран). Энергия поэтому может быть получена либо путем соединения малых атомов в атомы средних размеров (синтез),

либо путем деления больших атомов на атомы средних размеров (расщепление). Освоение человечеством энергии синтеза и энергии расщепления является одним из наиболее важных достижений последнего столетия.

Начиная с 1970-ых годов, было много написано о надвигающемся "мировом энергетическом кризисе", который обычно связывают с кризисом нефтедобывающей промышленности. Рисунок 1 во Введении очень наглядно иллюстрирует важное значение сохранения ископаемых топливных ресурсов для будущих поколений.

Хотя с 1970-ых годов и проводится политика сохранения природных запасов сырой нефти, тем не менее, лет через 50 все ресурсы органического топлива кроме угля будут исчерпаны. Уголь к тому времени займет ту же роль, какую нефть занимает сегодня, особенно в качестве ценного химического сырья.

Большое значение сохранения органических источников энергии очевидно даже в областях, где пока их использование достаточно дешево. Постепенное выравнивание энергетических потребностей в развитых странах за последнее десятилетие является результатом увеличения производства энергии. Однако, непрерывный рост энергетических запросов в развивающихся странах постоянно увеличивает расход природных ресурсов планеты, несмотря на стремление к их сохранению.

Многие люди в развивающихся странах стремятся к уровню жизни, характерному для развитых стран. Осуществление этих надежд зависит от доступности энергетических ресурсов. Рост населения земли от сегодняшнего уровня в 6 миллиардов к прогнозируемому в 7.5 миллиардов в 2020 году значительно увеличит потребности в энергии.

1.2 Потребности в энергии

Энергетические потребности индустриальных стран определяются тремя основными факторами:

- Коммунальное хозяйство и торговля
- Промышленность и сельское хозяйство
- Транспорт

Во многих странах каждая из этих позиций составляет примерно одну треть всех энергетических потребностей, хотя размер коммунального потребления существенно зависит от климатических особенностей страны. В Австралии, например, внутренние потребности относительно малы, а в Канаде несколько больше из-за более холодного климата.

Более определенно можно говорить о специфических потребностях, если учитывать следующие факторы:

- Требуется ли для снабжения теплом населения и производственных процессов вода с температурой до 110 °С.
- Требуется ли для снабжения теплом населения и производственных процессов вода с более высокой температурой (более чем 110 °С).
- Каковы потребности в освещении.
- Каково энергопотребление в производстве.
- Насколько развит общественный и частный транспорт.

Некоторые из них удовлетворяются поставками электрической энергии, потребность в которой во всем мире постоянно растет (см. ниже раздел 2.1).

Таблица 1.
Производство электроэнергии
Тераватт часы (ТВтч, или миллиард кВтч)

	1987	1997	Темпы роста за последние десять лет
Все страны, входящие в "Организацию экономического сотрудничества и развития"	6232	8839	42 %
Все страны, не входящие в "Организацию экономического сотрудничества и развития"	4368	5110	17 %
Во всем мире	10600	13949	32 %
Страны, не входящие в "Организацию экономического сотрудничества и развития"			
Страны бывшего СССР	1660	1234	-17 %
Африка	280	399	42 %
Латинская Америка	542	688	27 %
Азия (исключая Китай)	613	1053	72 %
Китай	497	1163	134 %
Ближний Восток	197	366	86 %

1.3 Производство энергии

Многообразие существующих сегодня источников энергии можно разбить на три основные категории:

- **Возобновляемые источники энергии:** древесина и некоторые зерновые культуры, пригодные для производства, например, этилового спирта или метанола.
- **Невозобновляемые источники энергии:** уголь, газ и нефть (органические топливные ресурсы), уран и торий (энергия расщепления), тритий и дейтерия (энергия синтеза) *.
- **Возобновляемые естественные источники энергии:** солнечная теплота и свет, энергия ветра, энергия океанских волн, энергия течения рек, геотермальное тепло, океанские температурные градиенты.

*Если дейтерий (тяжелый водород) будет когда-либо использован для реализации устойчивой реакции синтеза, то большие количества этого элемента, находящегося в морской воде, делают его практически безграничным энергетическим ресурсом. Поэтому его можно классифицировать как возобновляемый источник энергии (см. также 2.4).

Эти основные энергоисточники позволяют получать следующие энергоносители:

- Электроэнергия, которая может быть получена от многих основных источников.

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

- Водород, который получают, главным образом, электролизом воды.
- Этиловые спирты, получаемые из древесины и других растительных материалов.
- Бензин и газ, которые получают из нефти и угля.

На сегодняшний день важнейшее значение для человечества имеет электроэнергия, хотя и водород имеет перспективы играть существенную роль в будущем.

Многие энергетические потребности могут быть удовлетворены более чем одним видом энергоносителя. Например, теплота может производиться либо с помощью любого органического топлива, либо с помощью электроэнергии, либо с помощью энергии солнца. Энергоноситель для транспорта (бензин, керосин и проч.) может быть получен из нефти или газа. В будущем, возможно, водород здесь займет главную роль.

Экономическая целесообразность подразумевает, что источники энергии типа нефти и ее производных должны не использоваться там, где они могут быть замещены более подходящим топливом.

Основные энергетические ресурсы Австралии и Канады показаны в Таблицах 2А и 2В. Австралия имеет большие природные запасы угля и урана, и намного меньше нефти и газа. Это находит свое отражение в торговле энергетическими ресурсами. Обе страны импортируют нефть и экспортируют уголь и уран. Канада имеет большие природные запасы урана, который составляет важную часть ее экспорта, наряду с углем и газом.

Таблица 2А
Энергетическое состояние Австралии*
(Петаджоули - 10^{15} Джоулей)

	Экономические ресурсы (ПДж)	Полный расход 1997-78	Торговля 1997-78
Каменный уголь	1 323 000	1 374	4 617 (экспорт)
Бурый уголь	398 000	630	2 (экспорт в брикетах)
Нефть	15 650	1 657	421 (импорт)
Сжиженный нефтяной газ	4 611	7	148 (экспорт)
Природный газ	53 040	860	412 (экспорт)
Уран (для легко-водных реакторов)	444 000	-	3 015 (экспорт)
Гидроэлектроэнергия		56	
Древесина и прочее		226	
	Всего	4 810	8 615 (экспорт)

*Таблица не включает большое количество солнечной энергии, используемой внутри страны. Например, Австралийская солевая промышленность использует приблизительно 1000 ПДж в год на производство соли естественным испарением воды, что составляет, примерно, 2/3 всей энергии, вырабатываемой в стране с помощью нефти.

Таблица 2В

Энергетическое состояние Канады
(Петаджоули - 10^{15} Джоулей)

	Экономические ресурсы (ПДж)	Полный расход 1998	Торговля 1998
Уголь: антрацит и битуминозный	120 000		517 (экспорт)
Уголь: весь		1271	
Уголь: подбитуминозный и лигнит	76 000		
Нефть	53 200	4 098	1 832 (экспорт)
Природный газ	74 400	2 646	3 356 (экспорт)
Уран (для легко-водных реакторов)	255 000		4 137 (экспорт)
Уран (для реакторов CANDU)	332 000	780	
Гидроэлектроэнергия		1 085	99 (экспорт)
Другие		569	
	Всего	10 449	9 941 (экспорт)

1.4 Изменения в энергопотреблении и энергопроизводстве

Распределенность энергетических ресурсов на планете означает, что с ростом их потребления, увеличивается и роль международной торговли в этой сфере. Энергетически бедные страны становятся зависимыми от поставок энергоносителей странами, богатыми энергоресурсами. Из-за фундаментального значения энергии для экономики, такие страны-импортеры становятся уязвимыми как с политической так и с экономической точек зрения.

Наглядная иллюстрация этого - существенное изменение роли нефти. До начала 1970-ых годов многие страны пришли к зависимости от импорта нефти из-за ее относительно низкой цены, а мировое производство нефти выросло втрое за период с 1960 по 1973 годы. Внезапное, почти четырехкратное повышение цен на нефть привело к тому, что в 1979 году разразился "нефтяной кризис". В результате, мировое потребление нефти в 1986 году осталось таким же, как и в 1973, несмотря на существенное увеличение полного энергопотребления в мире. Прогнозы же 1972 года предсказывали двойное увеличение потребления нефти через десять лет (т.е. к началу 1980-ых годов).

Япония, например, имеет незначительные собственные запасы угля, нефти и гидроэнергоресурсов. Это означает, что без увеличения импорта нефти она не в состоянии покрыть три четверти своих потребностей в энергии. Даже США, имеющие собственные запасы нефти, сталкиваются с трудностями по оплате импорта необходимого количества нефти, покрывающего снижение собственного производства.

Проблемы с ценами на нефть и ее поставками в 1970-ых годах стимулировали более активное использование других энергетических ресурсов:

- Увеличилась добыча угля и международная торговля углем для частичного замещения использования нефти.

- Увеличился интерес к использованию ядерной энергии в энергодефицитных странах.
- Во всех странах стали более внимательно рассматривать вопросы снижения потребления энергии.
- Более серьезное внимание стали уделять возобновляемым источникам энергии.

Эти тенденции продолжились и в 1990-ых годах. Во всем мире происходит значительное снижение энергозатрат в экономике. Сокращено использование нефти для производства электроэнергии. Увеличилось использование природного газа. Исключение составили лишь надежды некоторых государств на внесение существенного вклада в производство энергии от возобновляемых источников.

Следствием тенденций, порожденных нефтяным кризисом, явилось уменьшение потребления энергии на единицу валового национального продукта на 1.3% в странах, членах ОЭСР (Организация экономического сотрудничества и развития), и это, как ожидается, будет иметь место и для других развивающихся стран в будущем. Однако, в то же самое время потребление электроэнергии на единицу валового национального продукта постоянно растет, что отражает ее постоянно возрастающую роль практически во всех странах.

Роль электроэнергии увеличивается потому, что она является чрезвычайно мобильным энергоносителем, который может быть произведен при использовании самого различного топлива, может быть легко доставлен потребителям по линиям электропередач. В настоящее время производство электроэнергии составляет 40 % от производства всей энергии в мире.

Электроэнергия уникальна с точки зрения приведения в действие машин и механизмов, освещения предприятий и домов. Она используется для получения тепла и для других целей, где традиционно используются иные альтернативные способы. С одной стороны, можно согласиться, что ввиду низкой эффективности превращения любой энергии в электрическую (КПД обычно 30-35 процентов) использование, например, природного газа должно быть более предпочтительным везде, где требуется получение тепла (эффективность в этом случае вдвое больше)*. С другой стороны, можно согласиться, что урановые и угольные ресурсы, которых намного больше газовых, должны применяться везде, где это возможно, и что использование произведенного таким образом электричества для получения тепла будет более желательным, несмотря на большой расход топлива. Большинство людей считают, что солнце самый обильный источник энергии в мире и с радостью использовали бы его энергию не только для получения тепла, но и для крупномасштабного производства электроэнергии. Вопросы, связанные с преобразованием солнечной энергии в электрическую обсуждаются более подробно в разделе 2.4.

*Принимая во внимание всю цепочку энергетических затрат, начиная от добычи до окончательного использования, получаем, что эффективность газа и нефти для производства тепла (КПД) составляет приблизительно 40-45 %. Для современных газовых печей высокой производительности это значение увеличивается до значений, близких к 70 %, но сильно зависит от удаленности газовых месторождений.

В следующих главах подробно рассматриваются вопросы потребления и производства электроэнергии. Особое внимание уделяется использованию ядерной энергии для производства электроэнергии. Основное ядерное топливо - это уран - металл,

который в настоящее время не имеет фактически никаких других гражданских приложений. Однако, прежде чем мы обратимся к этой теме, важно обсудить некоторые вероятные будущие тенденции в мировом энергопроизводстве и энергопотреблении более подробно.

1.5 Энергопотребление и энергопроизводство будущего

Как мы будем удовлетворять свои энергетические потребности в будущем? Здесь имеется некоторая неопределенность:

- Производство нефти было максимальным в 1979 году и до 1994 года не возвращалось к этому уровню. Издержки производства по существу остались на уровне 1973 года. Цена на нефть в значительной степени зависит от политических факторов.
- Производство природного газа, при увеличивающихся сегодня темпах, вероятно, приблизится к своему пику в многих странах через пару десятилетий.
- Затраты на добычу угля постоянно возрастают, а его использование приводит к повышению глобальных температур на планете (парниковый эффект).
- Имеется неопределенность по реализации ядерных программ во многих странах.
- Имеются существенные ограничения в практическом использовании возобновляемых энергетических ресурсов,
- Дальнейшие возможности энергосбережения ограничены без радикальных перемен в образе жизни в развитых странах, и фактически исчерпаны в развивающихся странах.

До начала 1970-ых годов мировые энергетические потребности легко и дешево удовлетворялись нефтью и природным газом всякий раз, когда энергопотребление имело тенденцию превышать энергопроизводство. Однако, после 1973 года, когда возникли серьезные сомнения относительно беспредельной доступности нефти, многие индустриальные страны стали разрабатывать иные стратегии своего развития, предполагающие гораздо большее использование ядерной энергии.

Решение будущих задач энергопроизводства на основе использования возобновляемых источников энергии оказалось непрактичным. Их непостоянность, высокая стоимость, недостаточный уровень технологического развития существенно ограничивает их потенциал.

Несмотря на все эти неопределенности, стратегическое планирование в сфере энергопроизводства должно обеспечивать будущие потребности. Для этого планирование должно базироваться на темпах прироста населения, темпах экономического и социального развития и доступности энергоресурсов (что касается и их цен).

Мировое потребление энергии устойчиво растет на протяжении многих десятилетий. Даже после временного повышения цен на нефть в 1973 году и последующего экономического спада, мир продолжает использовать все большее количество энергии каждый год и можно ожидать, что так будет и в будущем. Хотя темпы роста никогда, по-видимому, не будут столь же высоки, как до 1973 года, очевидно, что экономический рост происходит в большинстве наций и увеличение энергопотребления является неизбежной частью этого роста. Население земного шара, как ожидается, достигнет к 2020 году 7.5 миллиардов, что также будет способствовать росту энергопотребления. Быстро возрастающие потребности в питьевой воде во многих частях

нашей планеты (например, в Северной Африке и странах Персидского залива) должны удовлетворяться развитием опреснительных систем, которые также увеличат потребности в энергии.



Рисунок 2

Если принять все эти факторы во внимание, то окажется, что минимальный рост энергопотребления в будущем мире будет составлять 1.5 - 2.0 процента в год. Для достижения даже такого уровня ежегодного роста требуется как расширение традиционных способов производства энергии, так и продолжение усилий по энергосбережению и увеличению эффективности использования энергии. Повышение эффективности использования энергии позволит на основе существующих ресурсов производить с большим КПД полезную работу, свет и теплоту чем это было до настоящего времени.

Начиная с 1970-ых годов, экономические факторы ограничивали энергозапросы, что привело к беспрецедентному увеличению эффективности использования энергии в промышленности и транспорте, по крайней мере, в странах, членах OECD. Прогнозируемое потребление энергии в этих странах увеличится незначительно, в то время как, в развивающихся странах, как ожидается, оно будет расти очень быстро.

Потребление электроэнергии возрастает намного быстрее, чем полное энергопотребление. Там, где за период с 1980 по 2020 годы потребление всей энергии удвоится, потребности в электроэнергии возрастут в три и более раза за тот же самый период (сравните рисунки 2 и 5).

В 1998 году Мировой энергетический совет (IASA) опубликовал прогноз мирового потребления электроэнергии на 2020 год в 20000 ТВт (14000 ТВт в 1997 году). Прогноз был сделан на основе сегодняшних моделей потребления энергии и предположения о сравнительно медленном прогрессе развивающихся стран (другие сценарии развития дают значения от 16000 до 23000 ТВт).

Будущие возможности энергосбережения существенно зависят от того, в каком секторе экономики они используются. Там, где энергия существенно используется в промышленных процессах или на транспорте, главные шаги по повышению эффективности и снижению затрат уже предприняты. Но там, где энергетические затраты относительно менее существенны (в коммунальном хозяйстве, например), имеется намного больше возможностей для дальнейшего развития возможностей энергосбережения.

Энергосбережение очень трудно прогнозировать. Для большей его эффективности требуется постоянный учет будущих перспектив более высоких энергетических затрат. В большой степени это зависит от образа жизни, который все более и более ориентируется

на энергосбережение. Несмотря на популярные идеи охраны окружающей среды, гораздо больший приоритет в мире имеют идеи удобного и комфортного проживания.

Таблица 3
Теплотворная способность различного топлива и коэффициенты выброса CO₂

	<i>Теплотворная способность</i>	<i>Единицы</i>	<i>% содержания углерода</i>	<i>CO₂</i>
Сырая нефть	45-46	МДж/кг	89	70-73 г/МДж
	37-39	МДж/л		
LPG	49	МДж/кг	81	59 г/МДж
Природный газ	39	МДж/м ³	76	51 г/МДж
	55	МДж/кг		
Каменный уголь (NSW и Qld)	21.5-30	МДж/кг	67	90 г/МДж
Каменный уголь (SA и WA)	13.5 - 19.5	МДж/кг		
Каменный уголь (Канадский битуминозный)	27.0 - 30.5	МДж/кг		
Каменный уголь (Канадский подбитуминозный)	18	МДж/кг		
Бурый уголь (в среднем)	9.7	МДж/кг	25	
Бурый уголь (Loy Yang)	8.15	МДж/кг		1.25 кг/кВт
Древесина (сухая)	16	МДж/кг	42	94 г/МДж
Естественный уран (в легко-водных реакторах)	500	ГДж/кг	-	-
Естественный уран (в легко-водных реакторах с U и Pu повторного цикла)	650	ГДж/кг	-	-
Естественный уран (в CANDU)	650	ГДж/кг	-	-
Естественный уран (в реакторах на быстрых нейтронах)	28000	ГДж/кг	-	-
Уран, обогащенный до 3.5 % (в легко-водных реакторах)	3900	ГДж/кг	-	-

ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ СЕГОДНЯ И ЗАВТРА

2.1 Спрос на электроэнергию

Спрос на электроэнергию в индустриальном обществе определяется многообразием источников его потребления, включая:

Промышленность

- предприятия, работающие в непрерывном режиме 24 часа в сутки.
- предприятия, работающие 8-10 часов по будним дням.

Торговлю

- большая часть предприятий, работающих по 10-15 часов в будние дни.

Общественный транспорт

- работающий в течение дня и вечером.

Дома и коммунальное хозяйство

- отопление или кондиционирование, главным образом в течение дня и вечера.
- приготовление пищи (утром и вечером).
- изменение уровня подачи воды и потери тепла, особенно в течение ночи.

Как следует из перечисленных факторов, уровень потребления электроэнергии колеблется в течение суток, в течение недели и в течение смены сезонов. Эти колебания различны в разных районах, в разных странах и зависят как от климатических условий, так и от многих других факторов. Примерный средне-суточный график нагрузки для электросетей показан на Рис. 3. Заметим, что базовая нагрузка составляет приблизительно 60% от максимальной нагрузки в течение типичного буднего дня.

Соответствие реальной базовой потребности и количества непрерывно производимой электроэнергии - ключевой фактор в любой энергетической системе. Каждый потребитель должен надежно получать необходимую ему электроэнергию.

Аналогично ежедневным и еженедельным колебаниям в потреблении электроэнергии существуют изменения в картине потребления из года в год. Поэтому при прогнозировании уровня потребления электроэнергии на десятилетия и более, необходимо принимать во внимание такие факторы как:

- Сезонные колебания потребления, связанные, например, с летним кондиционированием воздуха.
- Постоянно увеличивающаяся электрификация общественного транспорта.
- Возможная электрификация частного транспорта, или его переход на водородное топливо, производимое с помощью электролиза.
- Использование солнечной энергии, заменяемой электроэнергией в течение периодов неблагоприятной погоды.
- Влияние факторов, увеличивающих непиковое потребление электроэнергии.
- Практический эффект от использования энергосберегающих технологий.
- Целесообразное использование малогабаритных возобновляемых источников электроэнергии.
- Потери при генерации и транспортировке электроэнергии.
- Изменение потребностей промышленности.
- Развитие новых способов передачи электроэнергии на большие расстояния (пятьдесят лет назад расстояние в 600 км было максимально возможным для эффективной передачи электроэнергии, а с 1960-ых новые технологии допускают уже передачу более чем на 2000 км).

Некоторые из этих факторов влияют на полное потребление электроэнергии, в то время как другие определяют относительное значение базисного потребления. Экономика

требует, чтобы потребности в энергии удовлетворялись, насколько это возможно, из базисного уровня производства электроэнергии, с возможным подключением в некоторых случаях резервных возобновляемых источников.

2.2 Снабжение электроэнергией

Из-за больших флуктуаций в потреблении электроэнергии в течение дня, необходимо иметь несколько типов электростанций, покрывающих как базисные и промежуточные, так и пиковые нагрузки. Базисные нагрузки обычно компенсируются крупными электростанциями на уровне их номинальной мощности. В Австралии, например, это тепловые электростанции, работающие на органическом топливе, в то время как в Канаде это комбинация атомных электростанций, гидроэлектростанций и тепловых электростанций. Станции для снабжения промежуточных и пиковых нагрузок должны выравнять общие нагрузки в сети при нескольких включениях в течение суток. Для этих целей используются различные методы и устройства, включая газовые турбины, паровые котлы, работающие на жидком топливе, гидроэлектростанции. Оборудование для компенсации пиковых нагрузок характеризуется низкой стоимостью основных средств, и относительно высокой стоимостью топлива. Станции же для базисного снабжения электроэнергией разрабатываются таким образом, чтобы минимизировать стоимость топлива, а относительно высокая стоимость основных средств может быть скомпенсирована доходами от производства и продажи энергии в течение нескольких лет.

Самую дешевую электроэнергию потребитель получает в том случае, когда возрастание пиковой нагрузки очень мало, и установившийся базисный уровень потребления достаточен для бесперебойных поставок энергии. Однако, любая действующая система энергоснабжения должна учитывать возможные аварийные и профилактические остановки оборудования. Базисные электростанции в Виктории (Австралия), например, составляют более половины всех генерирующих мощностей и производят более 85 процентов полного производства электроэнергии. Примерно одна третья часть генерирующих мощностей используется для компенсации промежуточных нагрузок в течение суток. Пиковые нагрузки компенсируются имеющимся небольшим резервом энергии в моменты значительного увеличения потребления электроэнергии. Система энергоснабжения в Виктории достаточно типична для многих развитых стран. Стоимость оборудования электростанций пиковой нагрузки, типа газовых турбин, примерно в два раза ниже стоимости базовых станций, работающих на угле. Кроме того, такие станции достаточно быстро строятся и вводятся в эксплуатацию. Однако, стоимость газового топлива намного дороже стоимости угля, затраченного на единицу произведенной энергии. Использование современных газотурбинных установок, имеющих более высокую эффективность, может уменьшить это различие. В местах, где позволяют географические условия местности, можно создавать запасы воды в водохранилищах и использовать ее для производства электроэнергии с помощью гидроэлектростанций для компенсации пиковых нагрузок. Стоимость таких станций может быть столь же низка как и стоимость электростанций, использующих газовое топливо, а их эксплуатация позволит увеличить продолжительность вклада базовых станций в общую нагрузку электрической сети.



Рисунок 3 График нагрузки Викторианской (Австралия) электросети

График нагрузки Викторианской (Австралия) электросети в течение одного зимнего буднего дня. Показаны относительные вклады пиковой, промежуточной и базовой нагрузки. Форма кривой заметно изменяется в соответствии с характером потребления электроэнергии: пики отражают увеличение потребления в течение дня, связанное с необходимым отоплением помещений. Заметим, что при базисном потреблении приблизительно в 4100 Мегаватт, общее

производство электроэнергии должно иметь резерв, по крайней мере, на 50 % больше этой величины. Последнее может быть обеспечено дополнительной электростанцией с промежуточной загрузкой мощности или регулируемым выходом мощности основной электростанции. Максимальные нагрузки обычно компенсируются дополнительными гидро- или газо-турбинными генераторами. Конкуренция на рынке производителей электроэнергии, несомненно, может способствовать принятию более оптимальных решений при определении необходимых источников дополнительной энергии в моменты пиковых нагрузок.

Различные способы рационального использования базисных электростанций дают им возможность работать в соответствии с нагрузкой в сети, варьируя свою выходную мощность. Как и в других отраслях промышленности, в производстве электроэнергии действуют свои экономические законы. Большие паровые энергоблоки уменьшают себестоимость произведенной электроэнергии, особенно если они используются на базисных электростанциях. Их местоположение, как правило, определяется вблизи источников топлива и охлаждающих водоемов. Однако, большие электростанции требуют для их эффективной эксплуатации протяженных линий транспортировки электроэнергии и возможностей ее преобразования. Следовательно, имеется достаточно много условий, при которых экономические достоинства мелкосерийных газовых генераторных станций будут преобладающими.

2.3 Топливо для производства электроэнергии сегодня

В этой книге рассматриваются преимущественно вопросы производства электроэнергии в индустриально развитых странах и густонаселенных областях Северной Америки, Восточной Европы и Азии. В этих странах топливная генерация электроэнергии составляет более 40 % от полного количества магистральных поставок. Австралия в этом смысле "удачная" страна из-за наличия больших открытых месторождений угля вблизи главных городских центров в восточных штатах. Это дало возможность разместить основные электростанции вблизи угольных месторождений и, таким образом, минимизировать экономические потери на транспортировке больших количеств угля. Энергетические потери при передаче электроэнергии также относительно низки.

Канада имеет богатые запасы органических и гидро топливных ресурсов на большей части своей территории. Однако, эти ресурсы в значительной степени истощились в провинции Онтарио к середине 1970-ых, и с того времени ядерная энергетика стала главным источником электроэнергии в Онтарио. Однако, многие густонаселенные части планеты, такие как Япония, многие районы Европы и Северной Америки не так удачно расположены относительно месторождений органического топлива. Высокая плотность населения и темпы индустриализации ограничивают привлекательность угля не только по соображениям его стоимости, но и с точки зрения загрязнения окружающей среды (см. также главу 6). Поэтому желательные требования к топливу, используемому для производства электроэнергии в густонаселенных и индустриально развитых странах, могут быть представлены следующим образом:

- Топливо должно быть относительно **дешевым**, и давать дешевую энергию.
- Если топливо не может быть расположено вблизи электростанции, то оно должно представлять собой **сконцентрированный** источник энергии, который можно экономно транспортировать и надежно запастись.
- Топливо не должно иметь **дефицита ресурса** и альтернативных вариантов применения (простое сжигание или химические превращения).

- Отходы от применения топлива должны утилизироваться таким образом, чтобы они производили минимум **загрязнения** окружающей среды и исключали влияние и на глобальное потепление планеты.
- Топливо должно быть **безопасным**, как при обычной эксплуатации, так и в аварийных случаях.

Из трех основных видов топлива (уголь, газ и уран), которыми располагает человечество для производства электроэнергии, уран наиболее удовлетворил бы этим критериям, особенно в тех случаях, когда уголь и газ необходимо транспортировать на очень большие расстояния. Национальная энергетическая стратегия многих стран во многом зависит от имеющихся у них природных ресурсов, от экономической целесообразности импортирования топлива (или электроэнергии) и уровня индустриализации. Энергетически богатая страна, такая как США, имеет возможность выбора. Однако, даже в США, необходимость транспортировки угля в больших количествах и на большие расстояния значительно сказывается на стоимости электроэнергии. Более того, не далек тот день, когда уголь вообще перестанет быть главным источником энергии. Япония, не имеющая природных энергетических ресурсов, почти полностью полагается на импорт энергии. Когда-то удобным импортируемым топливом была нефть, и энергетические потребности страны существенно зависели от нее, включая и производство электроэнергии. В настоящее время для этих целей все более часто используется уголь, но стоимость доставки его намного больше. Ядерное топливо имеет значительные преимущества. Во-первых его не так много требуется, и во-вторых затраты по транспортировке незначительны. Могут быть легко накоплены стратегические запасы. Кроме того, цена ядерного топлива менее подвержена колебаниям, чем угля. В Австралии условия энергоснабжения изменяются от штата к штату. Восточные штаты страны, например, имеют большие резервы угля. Запад и Юг Австралии имеют относительно меньшее количество угля, но большие запасы газа и пониженный спрос на электроэнергию. В настоящее время почти 60 процентов электроэнергии, потребляемой Югом Австралии и половиной Запада Австралии, получают сжиганием газа.

Канада - страна богатая энергетическими ресурсами и условия их использования меняются от одного побережья до другого. В Британской Колумбии, Манитобо и Квебеке в большей степени используются гидроэнергетические ресурсы, чем это делается, например, в Онтарио. Уголь активно используется в Луге и на Атлантическом побережье, хотя и в меньшей степени, чем в наиболее развитых странах. В Онтарио выбор сделан на ядерную энергетику, производящую более 60 процентов электроэнергии. В Квебеке и Новом Брансуике также частично используют ядерную энергию. Рисунок 4 иллюстрирует, каким образом производят электроэнергию в некоторых странах, включая Австралию и Канаду.

Во всех странах потребности в электроэнергии постоянно увеличиваются (примерно на 3-4 % каждый год). Из диаграммы видно, что уголь является основным видом топлива в США и Европе, и намного меньше используется в Японии и Канаде. В этих странах в настоящее время примерно одна треть всей электроэнергии вырабатывается на ядерных реакторах. Отражением мировых перспектив в добыче природных ресурсов является то, что замещаемое топливо, используемое в каждой стране, постепенно вытесняет все более недостаточную и, следовательно, довольно дорогую нефть. Это наиболее очевидно и остро наблюдается в Японии. Россия также заметно снизила свою зависимость от нефти в производстве электроэнергии за последние 25 лет, и увеличила вклад ядерной энергетики в энергообеспечение страны.

2.4 Ресурсы для будущего производства электроэнергии

При рассмотрении нашего будущего, уходящего за 2010 год, возникает несколько практических вопросов, которые нельзя упускать. Один из них - масштаб времени. Принятие решений сегодня об остановке относительно крупных базисных электростанций, означает, что реально они могут быть выведены из эксплуатации лишь через пять-десять лет. Можно даже ожидать, что срок их службы будет продлен до 40 лет. Таким образом, сегодняшние инвестиционные решения относительно больших электростанций не могут существенно изменить действующие системы энергоснабжения страны, по крайней мере, в течение двух или трех десятилетий. Британские ядерные программы 1950-ых годов, например, были рассчитаны на два десятилетия, чтобы достичь прироста электроэнергии всего на десять процентов. Даже газовые турбины, которые можно вводить в эксплуатацию в течение двух лет, и которые являются все более и более популярными, реально не смогут в короткие сроки изменить систему энергоснабжения страны. Если же рассматривать использование и внедрение новых технологий, еще только проектируемых, требуемое время растянется до двух, трех десятилетий. Следовательно, многие технологии, используемые сегодня, будут неизбежно актуальны еще в течение нескольких десятилетий.

Другой практический вопрос имеет отношение к размерам. В некоторых случаях малое предпочтительнее большого, а при низких трудовых затратах, оказывается эффективнее.

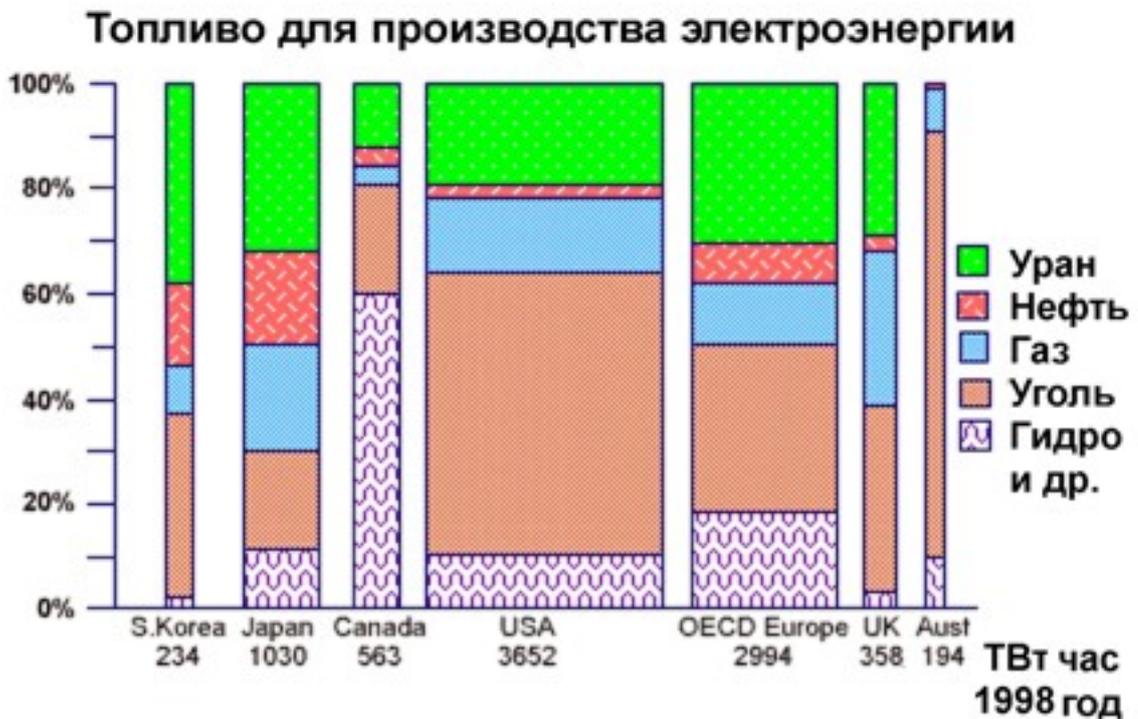


Рисунок 4

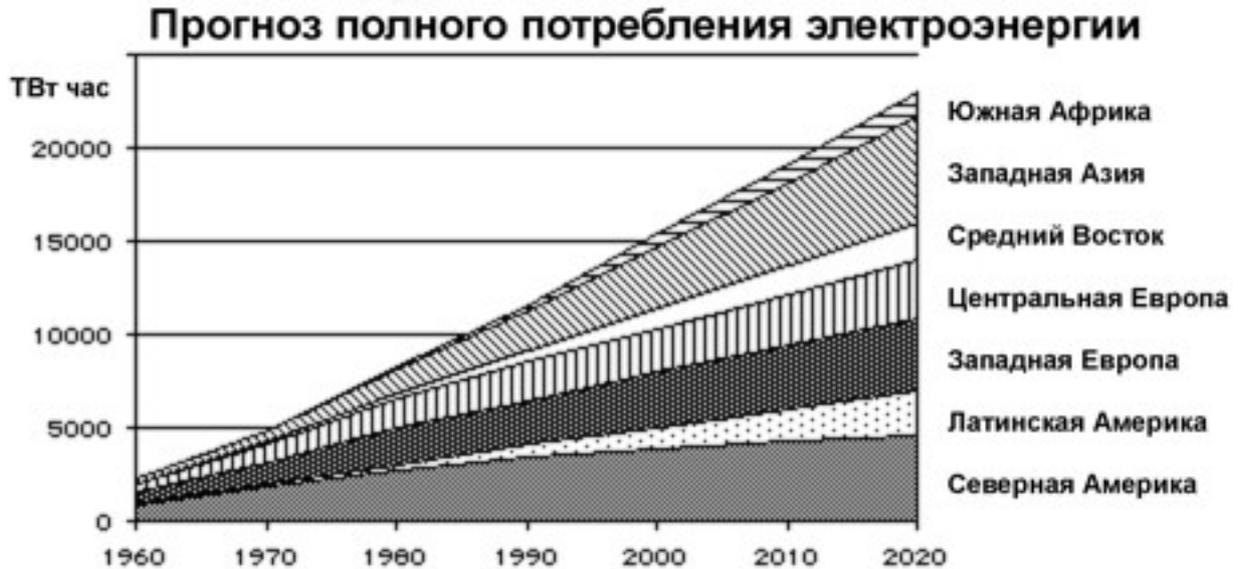


Рисунок 5

В горнодобывающей промышленности и производстве электроэнергии, однако, реальные размеры электростанций и сопутствующих объектов определяют и экономические показатели. Там где масштабы сокращаются, стоимость единицы продукции непременно увеличивается. Строительство стандартных электростанций крупного масштаба неизбежно в урбанизированных и индустриальных странах, где большие запросы в электроэнергии сконцентрированы в малых областях.

Таким образом, существование этих двух проблем, первой - достаточно долгого срока разработки и внедрения новых технологий, и второй - необходимости строительства крупномасштабных объектов, требуют осторожной оценки будущих тенденций в производстве электроэнергии, гарантирующих удовлетворение постоянно растущих потребностей. Кроме того, используемые технологии должны полностью соответствовать поставленным задачам. Поэтому вопрос состоит в том, как из существующего многообразия способов производства электроэнергии выбрать наиболее подходящие для конкретного места в конкретное время. Какие же здесь есть варианты?

Энергосбережение: Один из вариантов заключается в использовании меньшего количества энергии и строгом ее сохранении, преимущественно путем увеличенной энергоотдачи. Этот подход может быть применен как ко многим приложениям в развитых странах, так и к новым энергетическим объектам во всех странах. Если бы США, Великобритания и Япония могли бы, например, использовать меньшее количество электроэнергии, то это позволило бы вывести из эксплуатации электростанции, работающие на жидком топливе, в двух из этих стран, и заметно уменьшить его использование в третьей. Проблемы энергосбережения подробно рассмотрены в разделе 1.5. Заметим, что такой подход, однако, дает больший эффект на уровень потребления полной энергии чем на фактический уровень производства электроэнергии, и приводит к увеличению доли использования электроэнергии в картине полного энергопотребления.

Нефть: В 1994 нефть обеспечивала 11 % всего производства электроэнергии, и значительное количество нефти все еще используется сегодня, даже для базисного производства энергии в некоторых странах (Рисунок 4). Нефть - уникальный источник

энергии с точки зрения его энергоемкости и сравнительной простоты транспортировки. Кроме того, как нефть, так и газ имеют важные применения в нефтехимической промышленности в качестве исходного сырья для производства пластических масс и фармацевтических изделий. Использование продуктов переработки нефти для производства электроэнергии в местах рационального расположения иных топливных ресурсов неэффективно. В Австралии и Канаде, например, нефть используется для производства электроэнергии лишь в областях, отдаленных от ресурсов природного газа и каменноугольных бассейнов, и в относительно небольших масштабах.

Природный газ: Использование природного газа в Австралии для производства электроэнергии заметно увеличилось начиная с 1970-ых годов, а в Канаде его использование, начиная с 1985 года, хотя и удвоилось, но все еще дает небольшой общий вклад в производство энергии (не более 3 %). В целом, однако, газ имеет довольно большое значение для производства электроэнергии в мире. В 1994 году его доля в мировом производстве электроэнергии составляла около 14 %, и этот вклад непрерывно увеличивается. Использование газа приводит к меньшим выбросам углекислого газа в атмосферу, чем использование угля, и поэтому в некоторых странах одобрено его применение для базисного производства энергии с постепенным замещением угольного топлива. Природный газ - незаменимый и полезный ресурс. Его можно выкачивать из земли, легко и экономно транспортировать в трубопроводах на большие расстояния, подводить к отдаленным населенным пунктам, где его использование может быть очень эффективным (до 90 % с учетом потерь при транспортировке). Газ может быть превращен в жидкость для отгрузки морским транспортом (например, Япония и Корея получают газ именно таким способом). Кроме того, газ - ценное химическое сырье, используемое для производства различных товаров. Это означает что крупномасштабное использование этого топлива для производства электроэнергии там, где менее доступны альтернативные способы, может привести к серьезным проблемам. Возможно наши внуки будут сожалеть, что их предки не были настолько прозорливы чтобы ограничить в свое время использование газа на планете и оставить хоть какую-то часть им. В любом случае исключительная роль природного газа как топлива для производства энергии, так или иначе, приведет к повышению его стоимости в будущем и он, вероятно, станет менее конкурентоспособным для базисного производства электроэнергии.

Уголь: *Из всех видов топлива для базисного производства электроэнергии, уголь в настоящее время наиболее важен.* Уголь играет определяющую роль в снабжении энергией большинства стран и в настоящее время дает 39 % всей электроэнергии в мире. Современные угольные электростанции стали более эффективными чем в прошлом, и при небольших дополнительных затратах их влияние на окружающую среду, вызванное сжиганием углей с высоким содержанием серы, может быть значительно уменьшено (см. также Главу 6). Добыча угля на больших карьерах обходится довольно дешево, но затраты на его транспортировку на большие расстояния делают этот вид топлива менее привлекательным. Если большие количества угля, добытые в одном месте, отправляются поперек континента или через океан в другое место (например, из Австралии или Канады в Японию или Европу), то транспортировка приводит к таким затратам, что стоимость получаемой электроэнергии становится слишком высока. Подобно нефти и газу, уголь имеет важные применения не только в качестве топлива. Углерод, например, содержащийся в угле, необходим в больших количествах для выплавки металлов. Хотя природные ресурсы угля довольно большие,

вопросы его сохранения сегодня становятся все более и более важными.

Уран: Единственным топливом, которое может стать реальной альтернативой для базисного производства электроэнергии, является в настоящее время уран. В то время как горнодобывающая промышленность производит и обрабатывает большие количества руды, две или три 200 литровые бочки двуокиси урана (U_3O_8) содержат достаточно энергии для обеспечения таких больших городов как Торонто или Сидней. Урановое топливо очень компактно и имеет огромные преимущества с точки зрения охраны окружающей среды (см. Главу 6). Противники уранового топлива часто утверждают, что по сравнению с углем, использование ядерного топлива имеет слишком много нерешенных проблем. Заметим, однако, что уже прошло более сорока лет с момента запуска первого коммерческого реактора, и более половины столетия с того момента, как люди научились управлять цепной реакцией ядерного деления (см. Главу 3).

За это время в мире накоплен огромный эксплуатационный опыт работы коммерческих реакторов, составляющий приблизительно 9500 реакторо-лет, и примерно такой же опыт эксплуатации аналогичных (но несколько меньших) реакторов, используемых в морском флоте. Сегодня в эксплуатации в 32 странах мира находятся более 430 ядерных реакторов, которые дают 16 % мирового производства электроэнергии.

Большое количество атомных электростанций находятся сейчас в стадии строительства. Во многих странах удовлетворены надежностью, безопасностью и экономическими характеристиками ядерной энергии по сравнению с углем или нефтью (см. также раздел 2.6 и Главу 6). Во многих странах по крайней мере третья часть потребляемой электроэнергии производится на ядерных реакторах. Франция, например, сегодня производит три четверти своей электроэнергии на ядерных реакторах и является мировым лидером в ее экспорте. В Таблице 5 приведены различные типы ядерных реакторов, используемых в настоящее время для генерации электричества. Атомные электростанции CANDU, например, лучше других используют ресурсы ядерного топлива, и могут функционировать на разновидностях низко обогащенного топлива, включая топливо, отработанное на других типах реакторов. Реакторы на быстрых нейтронах (см. раздел 4.4) имеют возможность значительного увеличения выхода электроэнергии при использовании известных резервов урана. Исключая военное использование и использование в энергетических установках на морских судах, уран не имеет никаких других применений кроме как для производства электроэнергии и создания медицинских и промышленных изотопов. По крайней мере, 95% мировой добычи урана идет сегодня на производство электроэнергии. Потенциал ядерной энергии, использующей уран в качестве топлива для генерации электричества, наиболее важен для развитых стран, которые имеют большие потребности в электроэнергии.

Сегодняшние атомные электростанции имеют энергоблоки мощностью от 500 до 1300 Мегаватт (МВт). Энергоблоки меньшей мощности экономически нецелесообразны. Однако, в некоторых развивающихся странах потребности в электроэнергии не столь велики и либо не требуют больших генерирующих мощностей, либо используют часть вырабатываемой энергии в других целях, например, в опреснительных установках. В этих случаях, где базисные потребности в электроэнергии удовлетворяются традиционными электростанциями, работающими на жидком топливе, экономически более целесообразно использование реакторов с мощностью в 100 МВт.

Ядерный синтез: Коммерческое использование ядерного синтеза все еще является нашей будущей надеждой. Аналогично поиску способов использования солнечного света, человечество в течение долгого времени пытается приручить процессы, происходящие на Солнце, которые дают свет и тепло Земле. Эти процессы называют термоядерным синтезом (в отличие от процессов ядерного расщепления, см. Главу 3). Один из способов для достижения управляемого термоядерного синтеза состоит в слиянии ядер дейтерия и трития (тяжелых изотопов водорода) при очень высоких температурах - приблизительно 100 миллионов градусов. Пока не существует надежных методов стабильного поддержания таких высоких температур. Однако, интенсивные исследования в этом направлении постоянно продолжаются, особенно в США, Японии, Европе и России, и, возможно, в следующей половине нынешнего столетия энергия, выделяемая при термоядерном синтезе, будет использоваться для производства электроэнергии. Будущие технологии термоядерного синтеза стали бы наиболее подходящим инструментом для обеспечения энергией крупных городов и промышленных областей. Дейтериевым топливом относительно богата морская вода, а тритий может быть получен или из лития, или произведен в ядерных реакторах с замедлителем из тяжелой воды. Почти безграничная энергия стала бы нам доступна, если бы была достигнута управляемая реакция синтеза двух ядер дейтерия, но протекание такой реакции требует намного более высоких температур, чем реакция слияния трития и дейтерия. Управляемый синтез обыкновенных ядер водорода (как это происходит на солнце), кажется маловероятным для достижения его на Земле, поскольку условия протекания такой реакции "сверхэкстремальные". Большое преимущество всех этих реакций - это совершенно незначительное количество радиоактивных отходов. К недостаткам следует отнести высокую стоимость проектов, высокую стоимость производства газа трития и высокий уровень наведенной радиоактивности в конструкциях термоядерных установок.

2.5 Возобновляемые источники энергии

Технологии, направленные на использование сил природы для выполнения работы, удовлетворяющей человеческие потребности, столь же стары, как и первое парусное судно. Имеется фундаментальная привлекательность в использовании таких природных сил, которые оберегают окружающую среду от эффектов горения органического топлива. Солнце, ветер, волны, реки, биомасса, потоки геотермальной теплоты земли действуют непрерывно и всегда (отсюда и термин "возобновляемый"). Из всего перечисленного пока только энергия падающей воды в реках получила широкое распространение для преобразования в электроэнергию.

Основное применение солнечной энергии, благодаря фотосинтезу, человечество нашло в сельском хозяйстве и лесоводстве, хотя все чаще ее начинают использовать для отопления.

Биомасса (например, остатки сахарного тростника) сжигается для получения энергии, увеличивается использование зерна для получения автомобильного топлива. Масштабы использования других видов природной энергии в настоящее время незначительны. Имеются и первостепенные задачи в сегодняшнем использовании возобновляемых источников энергии. Для фотоэлектрических систем, например, это вопрос - как сделать их самовозбуждающимися генераторами электричества. Для использования природной теплоты, - как преобразовать ее в пар или как применить другие способы преобразования энергии.

Если фундаментальное свойство возобновляемости источников энергии состоит в их доступности и относительно широкой распространенности, то фундаментальная проблема в их использовании для производства электроэнергии состоит в их нестабильности и недостаточной предсказуемости.*

* Исключение составляет геотермальная энергия, которая не широко доступна.

Это означает, что должны существовать либо дублирующие источники электроэнергии, либо способы ее накопления в больших масштабах. Однако, кроме накопления гидроэнергии в водохранилищах или сжатого воздуха в резервуарах (см. ниже), в настоящее время никакого другого способа не существует и не просматривается в будущем. Для автономных систем вопросы аккумулирования энергии являются первостепенными. При подключении их к существующим электросетям, возникает вопрос дублирующих источников. В использовании энергии солнца для крупномасштабного и особенно базисного производства электроэнергии имеются небольшие возможности.

Солнечная энергия: "Солнечный - не ядерный" - популярный лозунг представителей анти-ядерного движения в защиту окружающей среды и многих "технологических оптимистов", ратующих за прямое использование солнечного тепла, продолжает еще иногда звучать. Конечно, в будущем, возможно, мы будем видеть большее количество солнечных батарей на крышах домов, поскольку их цена снижается, а мы более рационально используем энергию, что способствует более широкому их распространению. Однако, для генерации электричества солнечная энергия имеет ограниченный потенциал, поскольку она непостоянна и непредсказуема. Во-первых, потоки солнечной энергии прерываются в ночное время и при облачной погоде. Это приводит к достаточно низкому коэффициенту использования солнечной энергии, обычно менее 15 процентов. Во-вторых, коэффициент преобразования современными фотоэлементами солнечной энергии в электрическую не превышает 12-16 процентов, и его до сих пор не удается увеличить, хотя исследования в этой области ведутся уже более нескольких десятилетий. *

* В Австралии в погожий солнечный день на поверхность земли, ориентированную перпендикулярно к солнечным лучам, попадает до одного килоВатта энергии на квадратный метр. В Канаде эта величина оказывается намного меньшей. На большей части ее территории, на горизонтальную поверхность площадью в один квадратный метр, попадает в среднем не более одного килоВатт часа солнечной энергии в течение дня.

В настоящее время внимание сфокусировано на двух способах преобразования солнечной энергии в электрическую. Более всего известен метод, использующий фотоэлементы для генерации электричества. Этот метод имеет большое значение, например, для обеспечения энергией космических аппаратов, оборудования систем связи отдаленных узлов телесети в Австралии и Канаде. Популярность фотоэлементов была бы тем выше, чем выше была бы их эффективность и ниже стоимость (на сегодняшний день стоимость фотоэлементов составляет примерно 4000 долларов США на один килоВатт вырабатываемой мощности). Стоимость фотоэлементов все еще слишком высока для бытового использования. Для автономных систем должны обязательно использоваться некоторые способы хранения собранной энергии в течение темного времени суток или

облачности. Это могут быть или аккумуляторные батареи, или водород, произведенный электролизом, или сверхпроводники. В любом случае, в дополнительные стадии превращения энергии необходимо вовлекать процессы с неизбежными энергетическими потерями, понижающие общий КПД, и значительно увеличивающие затраты. Несколько экспериментальных солнечных электростанций мощностью от 300 до 500 кВт включены в электросети Европы и США. В научных учреждениях продолжаются исследования в направлении уменьшения размеров фотоэлементов и увеличения их эффективности.

Другое главное направление исследований - разработка экономных способов хранения энергии, которая выработана фотоэлементами в течение светового дня. Солнечная тепловая электростанция имеет систему зеркал для концентрации солнечного света на специальный поглотитель, в котором выделяющееся тепло преобразуется в пар высокого давления и приводит в движение турбины. Концентратор - это обычно параболический отражатель, который ориентируется между севером и югом, прослеживает путь солнца в течение дня. Поглотитель расположен в фокусе этого отражателя и использует солнечную энергию для нагревания специальной жидкости (обычно это синтетическое масло) до температуры порядка 400 градусов Цельсия. Эта жидкость далее управляет турбиной и генератором. В настоящее время несколько таких электростанций с мощностью энергоблоков 80 МВт находятся в эксплуатации. Каждый такой модуль занимает площадь примерно в 50 гектаров земли и требует очень точных систем управления. Солнечные электростанции дополняются модулями, работающими на газе, которые производят около четверти полной вырабатываемой мощности и сохраняют рабочий режим в течение ночи. В середине 1990-ых годов такие станции с суммарной мощностью более чем 350 МВт произвели во всем мире примерно 80 % электроэнергии, полученной от солнца. В будущем основная роль солнечной энергии будет состоять в ее прямом использовании для отопления.

Наибольшая энергетическая потребность людей - это потребность в тепле, например, в горячем водоснабжении с температурой не более 60 градусов Цельсия. Более высокие температуры требуются в промышленности (в диапазоне 60 - 110 градусов Цельсия). Эти потребности в совокупности определяют пропорции энергетического потребления в индустриальных странах. Первая потребность уже сегодня может быть удовлетворена в некоторых областях за счет использования солнечного света и тепла. Коммерческое использование солнечной энергии для снабжения теплом промышленных объектов, по-видимому, будет возможно в недалеком будущем. Практическая реализация такого подхода снизит в некоторой степени потребление электроэнергии, уменьшит расход органического топлива и благоприятно скажется на охране окружающей среды. А если использовать тепловые насосы с надлежащей изоляцией, то можно также отапливать (или охлаждать) здания с очень небольшими затратами энергии. В конечном счете, до десяти процентов полной потребляемой энергии в индустриальных странах может быть получено при рациональном использовании солнечного света и тепла. Это частично уменьшит необходимый уровень базисного производства электроэнергии.

Энергия ветра: В течении многих десятилетий в отдаленных районах используются ветряные турбины для бытовой генерации электричества и подзарядки аккумуляторных батарей. Генерирующие модули мощностью больше чем 1 МВт теперь функционируют во многих странах. Производимая ветряной турбиной мощность электроэнергии пропорциональна скорости ветра в третьей степени, и многие турбины эффективно работают при скорости ветра приблизительно 7 - 20 метров в секунду (или 25 - 70 км/час). На земном шаре не так много районов, имеющих такие преобладающие

ветры. Подобно солнечной энергии, использование энергии ветра требует дополнительных дублирующих источников электроэнергии или систем аккумулирования энергии на случай более спокойной и безветренной погоды. В настоящее время ветряные турбины, работающие в различных частях мира, имеют общую мощность около 15000 МВт. Они являются ценным дополнением к крупномасштабным базисным электростанциям. Дания, например, получает 10 % своей электроэнергии от энергии ветра и, находясь в зависимости от импорта электроэнергии, намерена увеличивать эту долю. Наиболее экономичными и практичными являются ветряные коммерческие модули мощностью более одного МВт, которые могут группироваться в небольшие ветряные станции.

Реки: Гидроэлектроэнергия, которая является преобразованной потенциальной энергией воды в реках, в настоящее время составляет 19% всей мировой электроэнергии (в Австралии 10%, в Канаде 59 %). Кроме нескольких стран, гидроэлектроэнергия обычно применяется для компенсации пиковых нагрузок, потому что, во-первых, она может быть оперативно подключена к действующим электросетям, а во-вторых, запасы воды ограничены. В любом случае гидроэлектроэнергия не имеет перспектив для использования в будущем, так как большинство географических районов в мире, имеющих возможности для использования потенциальной энергии воды, или уже находятся в эксплуатации или же недоступны по другим причинам (из соображений охраны окружающей среды, например). Преимущество многих гидросистем состоит в их способности компенсировать сезонные (также как и ежедневные) максимальные нагрузки в потреблении электроэнергии. На практике использование запасов воды иногда усложняется запросами на ирригацию, которые могут происходить одновременно с пиковыми нагрузками. В некоторых областях географические условия могут ограничивать использование гидроэлектроэнергии в периоды сезонных дождей.

Геотермальное тепло: В тех районах, где горячий подземный пар может достигать поверхности земли, его можно использовать для производства электроэнергии. Такого рода геотермальные источники энергии получили распространение в некоторых частях мира, например, в Новой Зеландии, в США, на Филиппинах, в Исландии и Италии. В общей сложности эти источники энергии сегодня вырабатывают до 6000 МВт мощности. Имеются также перспективы в использовании этого метода в других районах путем перекачивания горячей подземной воды в те места, где ее нет.

Приливы: Впервые использование приливной энергии в заливах или устьях рек было осуществлено во Франции и в России (начиная с 1966 года). Приливно-отливная вода, движущаяся в обеих направлениях, используется для вращения турбин. Этот вид энергии может использоваться там, где есть значительные области с приливно-отливными потоками. В Канаде, например, это залив Фанди между Новой Шотландией и Новым Брансуиком. Во всем мире эта технология имеет незначительный потенциал.

Волны: Использование энергии движения волн может дать гораздо больший эффект, чем приливно-отливная энергия. Возможности практического использования энергии волн в свое время исследовались в Великобритании. Генераторы электроэнергии в этом случае должны располагаться на плавающих платформах или в полостях прибрежных скальных пород. Высокая стоимость требуемых устройств и многочисленные практические проблемы делают такие проекты не реальными.

Отношение возобновляемых источников энергии к базисному потреблению электроэнергии: Солнце, энергия ветра, приливы и волны не могут заменить использование угля, газа или ядерной энергии, однако они исключительно важны для использования в специфических районах земного шара.

По указанным выше причинам перечисленные источники энергии не могут обеспечить базисные потребности в электроэнергии или компенсировать пиковые нагрузки, когда это необходимо. Практически они могут дать лишь 10 - 20% от общей потребности в энергии и никогда не заменят уголь, газ или ядерную энергию. Однако, они могут стать исключительно важными в специфических районах земного шара, где для их использования существуют благоприятные условия.

Проблемы воздействия на окружающую среду сотен огромных ветряных турбин, занятые и неиспользуемые обширные территории земли или огромные приливно-отливные заграждения, не говоря уже о новых гидроузлах, являются существенным ограничением в использовании возобновляемых источников энергии. Конечно, такие технологии в некоторой степени внесут свой вклад в будущую мировую энергетику, хотя и не будут нести основной нагрузки на удовлетворение энергетических нужд планеты. Если человечество найдет в будущем способы эффективного хранения электроэнергии, получаемой от солнечных батарей или ветряных генераторов, вклад этих технологий в удовлетворение базисных энергетических потребностей станет намного значительней. В некоторых местах в течение времени непиковых нагрузок и выходных дней избыточная энергия угольных или ядерных электростанций используется для накопления воды в водохранилищах, которая затем расходуется гидроэлектростанциями для компенсации пиковых нагрузок. К сожалению, не так много мест имеют возможности для строительства подкачиваемых плотин такого рода. Хранение сжатого воздуха в подземных хранилищах используется пока в гораздо меньшей степени. Способы хранения больших количеств электроэнергии в гигантских аккумуляторных батареях пока не разработаны.

При рассмотрении энергоснабжения в целом, имеются некоторые возможности для реверсирования (переключения) энергопотоков в развитых странах с их 24-часовыми и 7-дневными циклами для того чтобы удовлетворить ежедневные пиковые нагрузки. Сегодняшнее оборудование для компенсации пиковых нагрузок могло бы использоваться в некоторой степени для снабжения энергией систем, полагающихся в основном на возобновляемые источники энергии. Эти мощности позволили бы дополнить крупномасштабное производство энергии солнечными батареями и ветряными турбинами в моменты, когда они не в состоянии этого делать. Любое реальное использование солнечных батарей или энергии ветра для производства электроэнергии в энергосети должно предусматривать наличие 100%-ной дублирующей генерирующей мощности - гидро или тепловой электростанции. Понятно, что это связано с очень высокими экономическими затратами, хотя в некоторых местах может стать основой развития будущей энергетики. Для развивающихся стран с незначительными базисными потребностями в электроэнергии такой подход, естественно, неприменим.

Экологические аспекты использования возобновляемых источников энергии: Возобновляемые источники энергии имеют различный набор качеств с точки зрения их влияния на окружающую среду и выгоды по сравнению с органическим или ядерным топливом. К положительным качествам следует отнести тот факт, что они совершенно не выбрасывают в атмосферу углекислый газ, и не производят других загрязняющих веществ

(кроме некоторых продуктов распада, образующихся на дне водных резервуаров). Но так как они используют относительно малоинтенсивную энергию, площадь, занимаемая ими, оказывается намного большей. Кроме того, физические размеры оборудования, по этой же причине, оказываются очень большими по сравнению с существующими высокоинтенсивными источниками энергии. Последнее обстоятельство требует для изготовления соответствующих конструкций больших материальных и энергетических затрат. Сомнительно, например, что бы жители Австралии одобрили воздействие на окружающую среду новых гидросистем в районе Снежных Гор (дающих, кстати, 3.5 % всей электроэнергии и обеспечивают ирригацию). Вряд ли будут одобрены и проекты по застройке больших площадей вблизи городов под электростанции на солнечных батареях, если такие проекты вообще когда-либо будут сделаны. В Европе, ветряные турбины давно не вызывают к себе любовь из-за производимого ими шума и по соображениям охраны природы. Громадные вращающиеся турбины постоянно приводят к гибели большого числа птиц. Однако, воздействие на окружающую среду может быть минимизировано в некоторых случаях. Солнечные батареи, например, могут устанавливаться вдоль автомагистралей, выполняя дополнительную функцию шумоизоляции, или располагаться на крышах домов. Имеются также отдельные места, где возможна и безопасная установка ветряных турбин.

2.6 Сравнение угля и урана

Единственными и главными топливными ресурсами для крупномасштабного производства энергии в течение следующих десятилетий остаются уголь и уран.

В ближайшей перспективе газ будет еще являться эффективным топливом в некоторых местах на нашей планете, но его большое значение как "прямого топлива" (т.е. используемого непосредственно для получения тепла) и вероятность существенного увеличения стоимости, заставляют рассматривать уголь и уран основным топливом будущего. Выбор между этими двумя вариантами, вероятно, будет зависеть от конечной стоимости получаемой электроэнергии и уровня затрат на охрану окружающей среды, которые в значительной степени зависят от месторасположения энергетических объектов.

В этом разделе мы приведем некоторое общее сравнение между углем и ураном как основными видами топлива для базисной генерации электроэнергии. Сопоставления, которые относятся к проблемам сохранения окружающей среды и охране здоровья населения, более подробно рассмотрены в Главе 6. Различные количества потребителей вовлечены в процесс превращения энергетических ресурсов в электроэнергию. Количество электроэнергии, потребляемое одним человеком в Японии или Северной Европе в течение одного года,* составляет, примерно, 8000 кВтч.

* Среднее потребление в индустриальных странах составляет приблизительно 9000 кВтч в год (по данным Мирового Энергетического Совета, 2000 год). В Австралии - приблизительно 7500 кВтч в год на одного человека (при учете экспорта энергии и затрат в производстве алюминия). Потребление в Канаде составляет 15500 кВтч в год на одного человека, а в США - приблизительно, 12700 кВтч.

Использование угля как топлива: Приблизительно три тонны каменного угля высокого качества (или 3.5 тонны среднего качества, или 9 тонн бурого) сжигается на тепловых электростанциях для получения одинакового количества электроэнергии. При этом остается до полутонны золы, в зависимости от качества используемого угля, и в окружающую среду выбрасывается восемь тонн углекислого газа, который при

атмосферном давлении и температуре заполнил бы три полногабаритных Олимпийских бассейна (50м*15м*2м). В зависимости от сорта угля, выбрасывается и некоторое количество двуокиси серы (SO₂). Общее содержание серы в Американских углях, примерно, 2-3 процента, и они дают сотни килограммов двуокиси серы, которые без дорогостоящей утилизации приводят к выпадению кислотных дождей, хорошо известных в северном полушарии. Влияние на окружающую среду побочных продуктов от сжигания угля на тепловых электростанциях рассматриваются более подробно в разделах 6.1 и 6.2, а затраты по утилизации SO₂ мы рассмотрим ниже. (Заметим, что Австралийский и Канадский угли содержат меньше одного процента серы). За годы эксплуатации, большинство тепловых электростанций выбросили в атмосферу намного больше радиоактивных веществ, чем любые ядерные установки подобного размера! Поэтому необходимо всегда следить за содержанием радиоактивных материалов в угле (в Австралии и Канаде, например, содержание U+Th составляет до 17 промилле). При использовании современного оборудования эта радиоактивность сохраняется главным образом в золе и утилизируется вместе с ней.

2.7 Экономические факторы

Наряду с количественным сравнением эффективности различных видов топлива и производимых отходов, важно рассмотреть относительные затраты, связанные с использованием того или иного топлива. В Таблице 4 показано сравнение прогнозируемой стоимости электроэнергии, получаемой от различных источников энергии, составленной OECD.

На Рисунке 7 показаны полные затраты на производство электроэнергии за более чем десятилетний период в США, в то время как Рисунок 8 показывает структуру этих затрат для различных способов производства электроэнергии. Стоимость строительства атомных электростанций намного больше, чем стоимость тепловых, работающих на угле или газе. Но стоимость ядерного топлива, включая его необходимое обогащение, меньше стоимости нефти, угля и газа. Следовательно, фактическая стоимость электроэнергии, производимой на атомных электростанциях, будет почти такая же, как и на тепловых.

Имеется множество Американских ядерных установок, проектная стоимость которых поглощалась уже на стадии проектирования и, следовательно, расчетное значение стоимости генерируемой энергии оказывалось очень высокими. Однако, закрытие таких заводов не помогло бы ни владельцам, ни заказчикам, и критерием их существования, в конечном счете, является стоимость фактической эксплуатации (см. Рисунок 7). По этому показателю атомные электростанции сравниваются с тепловыми, работающими на угле, и дешевле газовых.

Относительно инвестиций в новые генерирующие мощности, затраты на проектирование и капитальное строительство являются определяющим фактором, и они показаны на Рисунке 8. В северо-восточных районах Соединенных Штатов, например, возникают меньшие затраты при эксплуатации ядерных установок, на Среднем Западе их эксплуатация обходится дороже, а на западе уголь является самым дешевым топливом. Если в каких-либо районах сегодня прогнозируются низкие цены на газ, то это является главной причиной неконкурентоспособности там ядерной энергетики. Наличие же районов потребления электроэнергии, удаленных от источников дешевого угля, является для многих стран главным условием для устойчивого и увеличивающегося использования ядерной энергии.



Рисунок 6: Сравнение видов топлива и, производимых при их сжигании, отходов

Использование урана как топлива: От 30 до 70 кг урановой руды Австралийского или Канадского происхождения необходимо для того, чтобы произвести горстку (230 граммов) концентрата двуокиси урана. Уран в этом концентрате, назовем его "естественный уран", содержит приблизительно 0.7 % U-235, делящегося изотопа урана. Естественный уран используется для заправки топливом реакторов типа "CANDU" Канадского производства, получивших широкое распространение в мире. В странах, использующих легко-водные реакторы (так называемые реакторы PWR и BWR) естественный уран обогащается по содержанию изотопа U-235, и из 30-70 кг урановой руды получают, приблизительно, 30 граммов обогащенного уранового топлива, которое содержит до 3.5 % U-235 (см. раздел 4.2). Отработанный уран в CANDU реакторах содержит очень небольшое количество ядерного топлива, которое обрабатывается как отходы. Уран же, отработанный в легко-водных реакторах, содержит достаточно большое количество ядерного топлива, и в некоторых странах обрабатывается для повторного использования. После повторной отработки топлива в легко-водных реакторах остается приблизительно 20 мл жидких высокоактивных отходов. Такие высокорadioактивные отходы, занимающие объем не более одного кубического сантиметра, "остекловываются", т.е. помещаются в специальные таблетки весом до 6 грамм и размером с большую монету, выполненные из особого сорта стекла. В процессе работы ядерных реакторов образуются и другие отходы, но они имеют намного меньше значение (см. раздел 5.1).

Таблица 4

Сравнительная характеристика прогноза стоимости электроэнергии, вырабатываемой различными способами, в 2005-2010 годах (цент США/кВт час)

	Уран	Уголь	Газ
Франция	3.22	4.64	4.74
Россия	2.69	4.63	3.54
Япония	5.75	5.58	7.91
Корея	3.07	3.44	4.25

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

Испания	4.10	4.22	4.79
США	3.33	2.48	2.33-2.71
Канада	2.47-2.96	2.92	3.00
Китай	2.54-3.08	3.18	-

Фактическая стоимость производства электроэнергии в США показана на Рисунке 7. Здесь приведены средние цифры, которые надо анализировать вместе с Рисунком 8.

Важным аспектом развития ядерной энергетики является ее зависимость от платежеспособности страны на международном рынке. Как отмечалось выше и показано на Рисунке 8, ядерная энергетика намного более эффективна по сравнению с системами, основанными на органическом топливе, где затраты более значительны. Поэтому, в таких странах, как Япония или Франция, где выбор лежит между импортированием больших количеств топлива и больших расходов на капитальное строительство на собственной территории, решение может приниматься просто на основе международного обмена. Такой положение было в Канаде, где основные запасы органического топлива расположены на западе страны. Восточная Канада, в отсутствие ядерной энергии, положила бы на импортированный уголь. Развитие ядерной энергетики в таких областях стимулирует местные отрасли промышленности, которые строят электростанции и, таким образом, уменьшают зависимость от закупок топлива за границей. Покупка за границей тепловой электростанции, например в Японии, привела бы к увеличению цен на электроэнергию и значительно уменьшила бы валютные запасы страны, чего не произойдет при использовании менее дорогостоящего уранового топлива.

Уран имеет преимущество и в том, что это чрезвычайно концентрированное топливо, которое легко и дешево транспортируется по сравнению с углем или нефтью. Один килограмм естественного урана содержит в двадцать тысяч раз больше энергии, чем такое же количество угля (см. Таблицу 3). Кроме того, вклад стоимости топлива в полную стоимость произведенной электроэнергии относительно мал. Это означает, что даже значительное увеличение цен на урановое топливо будет иметь относительно небольшое влияние.* Более того, глобальные вопросы охраны окружающей среды, вредные последствия от сжигания органического топлива, создают дополнительные преимущества для использования ядерной энергии (см. раздел 6.1).

* В ценах 1997 года цена U_3O_8 для легко-водных реакторов увеличилась на 30%, а стоимость электроэнергии лишь на 7%.

Согласованная политика цен на углеродное топливо, сжигаемое для производства электроэнергии, или внушительные налоги на него, изменят экономический статус ядерной энергетики. Например, цена в \$37 за тонну обычного угля, или \$29 за тонну бурого, увеличит стоимость электроэнергии на один цент за киловатт час при неизменных ценах на ядерную электроэнергию.

Энергетические затраты

Выше было отмечено, что стоимость атомных электростанций выше, чем тепловых. Энергетические затраты (то есть количество энергии, вложенной в изготовление материалов, подготовку топлива и проч.) могут быть также выше. В особенности это касается легко-водных реакторов, где требуется дополнительная энергия для обогащения

топлива. Энергетические вложения на изготовление конструкций и начальную загрузку топлива легко-водного реактора составляют, приблизительно, 1.5 процента от произведенной реактором энергии, а при учете последующих загрузок топлива эта величина станет меньше одного процента. В самом худшем случае, при использовании дорогих диффузионных методов обогащения урана (см. раздел 3.4) - до 4 %.



Рисунок 7.

Приведенные данные учитывают затраты на эксплуатацию, обслуживание и стоимость топлива. Они исключают затраты на капитальное строительство, так как они значительно отличаются в разных штатах. Данные в Таблице 4 и на Рисунке 8 включают затраты на капитальное строительство.

Хотя уголь и уран конкурируют за ведущее место в базисном производстве электроэнергии, некоторые развитые страны видят свой прогресс в их одинаковой роли.

Как правило, страны, не имеющие дешевого угля или достаточного количества газа, одобряют использование ядерной энергии, как более дешевой. В некоторых же странах (например, в Австралии, где угольные резервы и потенциал его производства намного превосходят внутренние потребности) использование угля для производства электроэнергии выгоднее по сравнению с ураном. Однако, в мировой перспективе, из-за увеличения потребностей в электроэнергии наряду с возможным глобальным потеплением климата на земле, усиление приоритета ядерной энергетики в базисной генерации электроэнергии является неизбежным.



Рисунок 8_1. Структура затрат на производство электроэнергии

Данные для различных цен на топливо (для органического топлива) или срока ввода в эксплуатацию (для ядерных установок). Коэффициент скидки 5 %, учитывающий 30-летний срок службы и средний коэффициент нагрузки 70 %. Ключевым фактором для органического топлива является вопрос цены топлива (верхняя часть полос). Поскольку в ядерной энергетике низкое отношение стоимости топлива к полной стоимости электроэнергии, то ключевым фактором является сроки проектирования и строительства, а следовательно и капитальные затраты (нижняя часть полос). Увеличение коэффициента нагрузки, таким образом, будет выгоднее для ядерных установок.



Рисунок 8_2. Структура затрат на производство электроэнергии

На практике время энергетической окупаемости составляет в действительности приблизительно шесть месяцев, а не 15 месяцев, как показано на рисунке.

ГЛАВА 3

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ

3.1 Масса и энергия

Относительно недавно люди, должно быть, думали, что они преобразовывали массу в энергию, когда сжигали древесину, чтобы приготовить себе пищу и обогреть свой дом. Сегодня любой студент скажет, что это не совсем так. На самом деле одна форма углеродосодержащего вещества (твердая древесина) просто преобразовывалась в другую (в бесцветный газ), который уносился ветром. Водород, содержащийся в первоначальном веществе, также рассеивался как водяной пар. Никакое количество массы при этом не теряется, хотя и выделялась энергия. Однако, развитие ядерной физики в прошлом столетии привело к пониманию того, что масса действительно может превращаться в энергию. Именно это и происходит в ядерном реакторе, использующем атомы некоторых металлов, таких как уран. Уран в 1.7 раз плотней, чем, например, медь, и его атом имеет в своем ядре 92 протона (положительно-заряженные частицы) и 140 нейтронов (не имеющие электрического заряда частицы). Один из типов атомов урана, так называемый "изотоп", имеет в ядре 143 нейтрона. Этот изотоп уран-235 (U-235), который знаменит тем, что при столкновении его ядра с медленным нейтроном (иногда говорят с "тепловым" нейтроном), атом может разделиться на два других и выделить много тепловой энергии (в виде кинетической энергии осколков деления). Этот процесс называют ядерным "расщеплением", и U-235 является "расщепляющимся" изотопом. По теории Эйнштейна при этом теряется некоторое количество массы, которая и преобразовывается в энергию.

Расщепление ядер сопровождается также испусканием нескольких быстрых нейтронов. Если их замедлить специальным поглотителем (например, графитом или водой) они могут заставить расщепиться другие атомы U-235, и, таким образом, породят цепную реакцию ядерного деления (см. Рисунок 14).

Другой главный изотоп естественного урана, U-238, не может самостоятельно расщепляться в реакторе, но каждый атом может поглотить нейтрон, и превратиться в расщепляющийся плутоний-239. Pu-239 ведет себя аналогично U-235 за исключением того, что количество нейтронов, образующихся при его делении, несколько больше, чем при делении U-235.

Приблизительно одна третья часть энергии, производимой сегодня в ядерных реакторах, получают от расщепления плутония. Ядро ядерного реактора (т.е. область, где происходит реакция ядерного деления) загружается топливом, состоящим из двуокиси урана. В CANDU реакторах используется естественный уран, содержащий 0.7 % изотопа U-235, а в легко-водных реакторах обогащенный до 3-4 % содержания U-235 (см. также Раздел 4.2). В обоих случаях двуокись урана UO_2 имеет форму керамических таблеток, собранных внутри циркониевых или стальных трубок, окруженных охладителем и замедлителем (чтобы замедлить потоки быстрых нейтронов, появляющихся в процессе цепной реакции ядерного деления так, чтобы они с наибольшей вероятностью поддерживали реакцию расщепления U-235). Каждое такое расщепление высвобождает приблизительно 200 MeV, или $3.2 \cdot 10^{-11}$ Джоулей энергии (для сравнения, при сгорании углеродосодержащего топлива на одну молекулу выделяется примерно 4 eV или $6.5 \cdot 10^{-19}$ Джоулей тепловой энергии).

Коммерческое использование ядерной энергии основано на управлении цепной

ядерной реакции таким образом, чтобы образующаяся теплота могла использоваться для получения пара, который в свою очередь мог бы производить электроэнергию. Цикл использования ядерного топлива описан в Разделе 4.2.

3.2 Ядерные реакторы

Рисунки 9А и 9В показывают принципиальное устройство двух различных типов реакторов, используемых для генерации электроэнергии. В ядре реактора уран подвергается реакции расщепления, в процессе которой выделяется много теплоты. На рисунках показаны распределительные устройства, которые регулируют коэффициент реакции и выход теплоты, путем поглощения некоторой доли потока нейтронов. В так называемом водяном реакторе (Рисунок 9А) ядро реактора окружено обыкновенной водой, которая циркулирует в замкнутом контуре, изготовленном из прочной стали. Вода в контуре циркулирует под высоким давлением и выполняет функции охладителя и замедлителя. Тепло доставляется к теплообменному устройству (парогенератору), где вода во втором контуре превращается в пар.

Рисунок 9В показывает принципиальное устройство созданного в Канаде реактора "CANDU", который получил большое распространение на международном рынке ядерных технологий и принес успех разработчикам. В отличие от водяных реакторов, в реакторах "CANDU" топливо находится во множестве напорных труб внутри корпуса реактора, называемого "Каландрия". Тяжелая вода в герметичном контуре прокачивается через напорные трубы и передает теплоту парогенератору. Тяжелая вода низкого давления также заполняет "Каландрию", окружая напорные трубы, и выполняет функции замедлителя. В обоих типах реакторов все процессы происходят внутри большой бетонной или стальной оболочки. Пар подают на генератор турбины так же, как это делается на тепловых электростанциях. Работающее на урановом топливе ядро ядерного реактора просто берет на себя роль печи, сжигающей уголь или газ для производства пара на тепловых электростанциях.

Вклад ядерной энергетики в общее производство электроэнергии увеличивается.

В 1999 вклад ядерной энергетики в общее производство электроэнергии составил 2401 ТераВатт час, что больше чем все количество электроэнергии, произведенной во всем мире в 1960, и увеличился на 12.7 % за предыдущие пять лет. Причин для такого роста несколько. Наиболее очевидная из них, ввод в эксплуатацию **новых реакторов**, как это показано в Таблице 6. К началу 2000 года в 32 странах мира было 438 ядерных реакторов с общей мощностью более чем 350 ГВт, включая 30 энергетических блоков (общей мощностью 25 ГВт), находящихся в стадии строительства в 13 странах. Во-вторых, увеличение роли ядерной энергетики в некоторых странах связано с модернизацией существующих атомных электростанций. Так, например, в США, Бельгии, Швеции, Испании, Швейцарии и Германии, **увеличена мощность генерации** электроэнергии на существующих энергоблоках. В-третьих, **коэффициенты нагрузки** на ядерные энергоблоки постоянно растут. Более 60% ядерных установок (кроме России и Украины) в последние несколько лет имели коэффициенты нагрузки более чем 75% (в 1992 году это составляло 67%). Во многих странах коэффициент нагрузки составляет в среднем более чем 80%. Шесть реакторов "CANDU" из 20 лидирующих в мире имеют коэффициенты нагрузки между 84 % и 87 %. Коэффициент нагрузки атомных

электростанций в США находится в пределах 83 %, и достиг своего максимального значения. Ежегодное улучшение характеристик ядерных реакторов в США эквивалентно запуску 2-3 больших новых энергетических модулей каждый год. В-четвертых, **увеличивается срок службы атомных электростанций**. Большинство атомных электростанций первоначально имело проектный срок службы от 30 до 40 лет. Опыт технической эксплуатации показал возможность значительного увеличения срока их службы. Продление срока службы реакторов путем замены основного оборудования является наиболее рентабельным способом их использования.

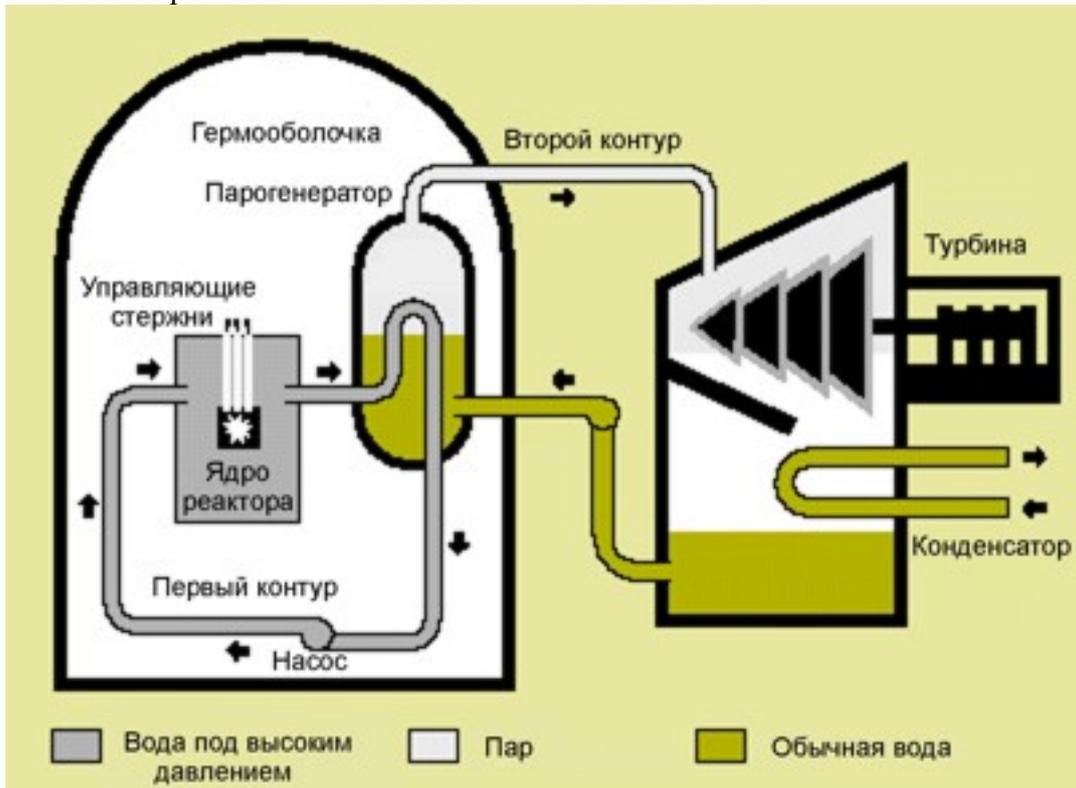


Рисунок 9А. Водяной энергетический реактор (PWR)

Эксплуатация большинства реакторов в США и Японии подтвердила, что срок их службы может быть продлен более чем на 40 лет, а в некоторых случаях и на 60 лет. Когда в 1950-ых годах строились коммерческие атомные электростанции "Колдер Холл" и "Чэплкросс" в Великобритании (самые старые сегодня в мире), предполагалось, что они будут иметь полезный срок службы 20 лет. Теперь им разрешено функционировать в течение 50 лет. Конечно, новые реакторы будут строиться взамен устаревших и выбывающих из эксплуатации в течение нескольких ближайших лет, но большинство новых реакторов будут размещаться в Азии.

Типы ядерных реакторов, находящиеся в эксплуатации

Тип реактора	Основные страны	Количество	ГВт	Топливо	Охладитель	Замедлитель
Герметичный водяной реактор (PWR)	США, Франция, Япония, Россия	252	235	Обогащенный UO_2	Вода	Вода
Кипящий реактор (BWR)	США, Япония, Швеция	93	83	Обогащенный UO_2	Вода	Вода
Реактор с газовым охлаждением (Magnox и AGR)	Великобритания	34	13	Естественный U, обогащенный UO_2	CO_2	Графит
Герметичный реактор на тяжелой воде "CANDU" (PHWR)	Канада	33	18	Естественный UO_2	Тяжелая вода	Тяжелая вода
Легко-водный реактор с графитовым замедлителем (RBMK)	Россия	14	14	Обогащенный UO_2	Вода	Графит
Реактор на быстрых нейтронах (FBR)	Япония, Франция, Россия	4	1.3	PuO_2 и UO_2	Жидкий натрий	Нет
Другие	Россия, Япония	5	0.2			
	ВСЕГО	435	364			

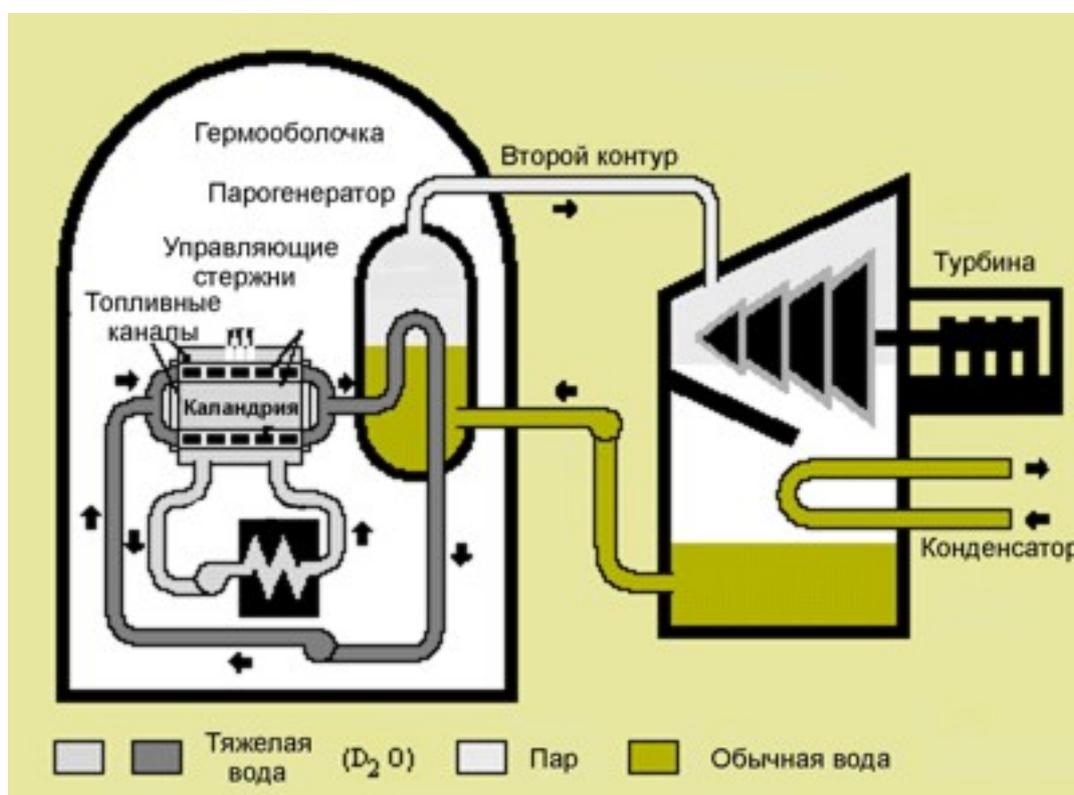


Рисунок 9В. Энергетический реактор "CANDU" на тяжелой воде (PWHR)

Таблица 6

ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ МИРА И ПОТРЕБЛЕНИЕ УРАНА

СТРАНА	Доля выработки электроэнергии на АЭС в 1999 г		Реакторы в эксплуатации 31 июля 2000		Строящиеся реакторы 31 июля 2000 г		Проектируемые реакторы 31 июля 2000 г		Потребление урана в 2000 г тонн, U
	%	ТВт час	К-во	МВт	К-во	МВт	К-во	МВт	
Аргентина	9	6.6	2	935	1	692	0	0	146
Армения	36	2.1	1	376	0	0	0	0	67
Бельгия	58	47	7	5680	0	0	0	0	1020
Бразилия	1.1	4.0	1	626	1	1245	0	0	292
Болгария	47	14.5	6	3538	0	0	0	0	615
Канада	12.4	70	18	12058*	0	0	0	0	1326
Китай	1.2	14.1	3	2079	8	6320	2	1800	418
Чехия	21	13.4	4	1648	2	1824	0	0	349
Египет	0	0	0	0	0	0	1	600	0
Финляндия	33	22	4	2656	0	0	0	0	558
Франция	75	375	59	63203	0	0	0	0	10513
Германия	31	160	19	21107	0	0	0	0	3707
Венгрия	38	14.1	4	1742	0	0	0	0	354
Индия	2.7	11.5	12	2144	4	1304	10	4480	312
Индонезия	0	0	0	0	0	0	1	600	0
Иран	0	0	0	0	1	950	3	2850	0
Япония	36	307	53	43505	1	796	14	18288	7334
Северная Корея	0	0	0	0	0	0	2	1900	0
Южная Корея	43	98	16	12970	4	3800	10	11200	2480
Литва	73	9.9	2	2370	0	0	0	0	359
Мексика	5.2	10	2	1308	0	0	0	0	231
Нидерланды	4.0	3.4	1	452	0	0	0	0	105
Пакистан	0.12	0.07	2	425	0	0	0	0	56
Румыния	10.7	4.8	1	650	1	620	0	0	90
Россия	14.4	111	29	19843	3	2825	9	7450	3213
Словакия	47	13.1	6	2472	0	0	0	0	531
Словения	37	4.5	1	620	0	0	0	0	132
Южная Африка	7.1	13.5	2	1842	0	0	0	0	366
Испания	31	56.5	9	7345	0	0	0	0	1538
Швеция	47	70	11	9445	0	0	0	0	1539
Швейцария	36	23.5	5	3170	0	0	0	0	602

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

Тайвань	25	37	6	4884	2	2600	0	0	971
Украина	44	67	14	12120	2	1900	0	0	1878
Великобритания	29	91.2	33	12518	0	0	0	0	2578
США	19.8	728	104	98015	0	0	0	0	17496
ВСЕГО В МИРЕ	16	2401	437	351,746	30	24,926	52	49160	61,176
	%	ТВт час	К-во	МВт	К-во	МВт	К-во	МВт	тонн, U
СТРАНА	Доля выработки электроэнергии на АЭС в 1999 г		Реакторы в эксплуатации 31 июля 2000		Строящиеся реакторы 31 июля 2000 г		Проектируемые реакторы 31 июля 2000 г		Потребление урана в 2000 г

ТВт час = Терра Ватт час (1 000 000 000 000 киловатт часов), МВт = Мегаватт (1 000 000 киловатт)
61,176 тонн U = 72,145 тонн U₃O₈

3.3 Доступность урана

Уран на земле есть везде.

Уран - это металл, примерно такой же, как олово или цинк, который содержится в большинстве пород и даже в морской воде. Некоторые типичные концентрации урана в различных средах приведены в таблице (ppm - промилле, одна миллионная часть).

Высокосортные источники	2 % U или 20000 ppm U
Низкосортные источники	0.1 % U или 1000 ppm U
Гранит	4 ppm U
Скальные породы	2 ppm U
Среднее количество в земной коре	1.4 ppm U
Морская вода	0.003 ppm U

Источники урана - это, например, геологические породы, из которых извлекается уран. При этом затраты на его экстракцию должны окупаться сложившимся рыночным ценам. В настоящее время ни морская вода, ни любые граниты не являются **источниками**, но, в принципе, могут стать таковыми, если цены на уран будут достаточно высоки. Изучение природных ресурсов и возможных иных источников, из которых возможно рентабельное извлечение урана, влияет на соотношение затрат и цен. Изменения в затратах или ценах могут заметно повлиять и на оценки ресурсов урана. Однако, любые прогнозы пригодности какого-либо минерала для извлечения из него урана, основанные на сегодняшних стоимостных показателях и сегодняшнем уровне геологических знаний, вероятно, будут чрезвычайно грубыми. Таблица 7 иллюстрирует сегодняшнюю оценку ресурсов урана. Заметим, что Австралия располагает основной частью (приблизительно 27%) мировых запасов дешевого урана, а Канада - 15%.

Оценивая ресурсы урана на основе только стоимостных категорий и существующих типов реакторов можно сделать вывод, что их достаточно для использования лишь в течение половины столетия. По сравнению с большинством других полезных ископаемых это является верхним пределом из всех существующих

надежных ресурсов. Дальнейшие геологические исследования и более высокие цены на уран неизбежно приведут к использованию иных ресурсов, поскольку существующие, рано или поздно, будут исчерпаны. Можно ожидать, что двойное увеличение цены по сравнению с существующим уровнем, десятикратно увеличит оценку существующих ресурсов.

Таблица 7
Оценка мировых ресурсов урана

Страна	Тонн, U ₃ O ₈	Процент от общих запасов
Австралия	889 000	27 %
Казахстан	558 000	17 %
Канада	511 000	15 %
Южная Африка	354 000	11 %
Намибия	256 000	8 %
Бразилия	232 000	7 %
Россия	157 000	5 %
США	125 000	4 %
Узбекистан	125 000	4 %
Всего в мире	3 340 000	

Более широкое распространение реакторов на быстрых нейтронах (быстрых реакторов-размножителей или реакторов-бридеров, см. 4.2) могло бы шестидесятикратно (и более) увеличить эффективность использования урана. Этот тип реакторов может работать на плутониевом топливе, произведенном в обычных реакторах, и эксплуатироваться в замкнутом цикле с собственным заводом по переработке отходов. Каждый такой реактор, загруженный первоначально естественным ураном, очень быстро достигает стадии, когда каждая тонна руды выдает в 60 раз больше энергии, чем в обычном реакторе.

Требования к топливу для реакторов

Все, вместе взятые, ядерные реакторы в мире, с общей мощностью 350 ГВт, требуют приблизительно 75000 тонн концентрата двуокиси урана каждый год. Одновременно со все более и более продуктивным использованием этой мощности (с более высокими коэффициентами использования), повышаются и требования к урановому топливу. Факторы, увеличивающие потребности в топливе, возмещаются тенденцией к его более эффективному выгоранию в реакторах, и поэтому спрос на урановое топливо в настоящее время стабилен. В течение последних 18 лет (с 1993 года) количество электроэнергии, произведенной на ядерных установках, увеличилось в 5.5 раз, то время как потребление урана увеличилось только в 3 раза. Вероятно, что ежегодное потребление урана начнет слегка возрастать только после 2010 года. Эффективность топлива измеряют в **МВт дней на тонну урана** (МВт день/т), и многие страны увеличивают начальное обогащение топлива (например, от 3.3% до 4.0% U-235) и затем сжигают его более долго, оставляя лишь 0.5 % U-235 в топливе. Это приводит к тому, что выгорание увеличивается от 33000 МВт день/т до 45000 МВт день/т. С другой стороны низкие цены на уран подразумевают, что обогатительные предприятия должны функционировать таким образом, чтобы удовлетворить требования к топливу, и не отправлять большое количество U-235 в отвал*.

*Увеличение содержания U-235 в отвалах от 0.25 % до 0.30 % при обогащении урановой руды до 3.5%, приводит к увеличению количества отвала от 7.0 до 7.8 кг на один килограмм обогащенного топлива.

Переработка топлива, отработанного в обычных легко-водных реакторах (см. 5.2), также способствует более эффективному использованию существующих ресурсов (с коэффициентом до 1.3). В настоящее время плутоний (пригодный для реакторов), и являющийся результатом переработки, используется в смешанном с обедненным ураном, так называемом, "окисном топливе" (МОХ-топливо).

Другой фактор, который может аналогично влиять на уровень потребления урана - топливный цикл, развиваемый в настоящее время Кореей и Канадой. Эта схема позволяет использовать на реакторах "CANDU" отработанное в водяных реакторах топливо без дополнительной химической переработки. Реакторы CANDU в настоящее время работают на естественном урановом топливе (0.7 % U-235) с выгоранием приблизительно 7500 МВт день/т. Эти реакторы могут слегка "подпитываться" обогащенным урановым топливом (до 1.2 % U-235), и увеличивать выгорание до 20000 МВт день/т без существенных конструктивных изменений. И это уже делается, поскольку цены на уран непрерывно увеличиваются. Целью всех способов повышения эффективности в использовании топлива является, в конечном счете, уменьшение количества добычи урана для обеспечения топливом каждого произведенного киловатт-часа электроэнергии.

3.4 Энергетическая отдача ядерных реакторов

Любое производство электроэнергии требует определенных энергетических затрат, связанных с добычей и транспортировкой топлива, изготовлением оборудования и строительством электростанций. Энергетические потери при добыче и транспортировке урана значительно меньше, чем для любого органического топлива. С другой стороны большие энергетические затраты в ядерной энергетике связаны с обслуживанием топливного цикла. Основных затрат требуют энергоемкие процессы обогащения уранового топлива (см. 4.2). Приведем некоторые цифры для реактора мощностью 1000 МВт, работающего с нагрузкой в 80 %, и вырабатывающего 7000 ГВт в год. Работа одного такого реактора в течение года требует 20 тонн уранового топлива с содержанием 3.5% U-235, который получают после обогащения примерно 153 тонн естественного урана. Обогащение такого количества урана в соединении UF_6 на современных центрифугах требует 4.2 ГВт электроэнергии, а на более старых диффузионных установках до 200 ГВт. В затраты необходимо также включить изготовление топлива, реакторного оборудования и его эксплуатацию. Таким образом, энергетические затраты на обслуживание топливного цикла составляют от 1.7% до 5% выделенной реактором энергии в зависимости от использованного процесса обогащения.

Энергетические затраты в горнодобывающей промышленности составляют 0.05 % от энергии, получаемой на легко-водных реакторах. Эти затраты полезно сравнить с аналогичными цифрами для органического топлива. К примеру, работа тепловой электростанции мощностью 1000 МВт течение года при нагрузке 80 % и при термическом к.п.д. 33 % (см. также Таблицу 3) потребовала бы 2.5 миллионов тонн высококачественного угля (сравните с 153 тоннами естественного урана для атомной электростанции). В случае Канадских реакторов CANDU, обогащение топлива не требуется, но необходимо производство тяжелой воды. Однако, тяжелая вода загружается один раз при запуске реактора, а сроков ее использования не существует.

3.5 Ядерное оружие как источник топлива

Все более важным источником ядерного топлива становятся мировые запасы ядерного оружия.

Начиная с 1987 года Соединенные Штаты Америки и страны бывшего СССР подписали ряд соглашений о сокращении к 2003 году своих ядерных арсеналов приблизительно на 80%. Ядерное оружие содержит уран, обогащенный более чем на 90% по содержанию U-235 (то есть, приблизительно, в 25 - 100 раз больше чем в реакторном топливе). Некоторое оружие содержит плутоний-239, который может использоваться в разбавленной форме в реакторах - размножителях.

Уран

Высокообогащенный оружейный уран от боеголовок и военных запасов, по соглашению между США и Россией, будет передаваться Обогачительным предприятиям Соединенных Штатов и затем направляться на использование в гражданских ядерных реакторах. Согласно соглашению, подписанному в 1994 году, Правительство США покупает у России 500 тонн высокообогащенного оружейного урана в течение 20 лет для переработки и продажи его электрическим компаниям на общую сумму около 11,9 миллиардов долларов США. Высокообогащенный оружейный уран содержит более чем 90% U-235, в то время как топливо для легко-водных реакторов обычно обогащается до 3-4 %. Для того чтобы быть использованным в коммерческих ядерных реакторах, оружейный уран должен быть разбавлен в соотношении 25:1 с обедненным ураном (главным образом это U-238), естественным ураном (содержащим 0.7 % U-235) или с частично обогащенным ураном. Поставляемый по контракту высокообогащенный оружейный уран смешивается до содержания 4.4% U-235 в России с использованием для этого 1.5 % U-235 (чтобы минимизировать уровни U-234 в изделии). 500 тонн оружейного высокообогащенного урана позволят произвести приблизительно 15 000 тонн низкообогащенного (4.4 %) урана в течение 20 лет. Это эквивалентно приблизительно 152 000 тоннам естественного U, что вдвое больше ежегодной добычи урана в мире. Работы в этом направлении планируются проводить достаточно интенсивно.

До 1999 года перерабатывалось около 10 тонн в год (что эквивалентно производству приблизительно 3700 тонн двуокиси урана в год). С 2000 переработка 30 тонн оружейного урана в год заменит производство приблизительно 11 000 тонн двуокиси урана в год, что составляет 17 % потребления этого топлива в мире. Кроме того, правительство США объявило, что 174 тонны высоко-обогащенного урана являются избыточными для военных запасов страны, и это количество будет переработано в 4300 тонн реакторного топлива. В ближайшей перспективе военный уран, вероятно, будет обеднен до содержания 20 % U-235, а затем заложен на длительное хранение. В этой форме его нельзя будет использовать для создания оружия.

Плутоний

Разоружение также высвободит приблизительно 150-200 тонн оружейного плутония, который будет представлять собой:

- Остеклованные высокоуровневые отходы (обработанный специальным образом плутоний), или

- Смешанное с двуокисью урана топливо (так называемое, МОХ- топливо) для сжигания в существующих реакторах.

Правительство США объявило, что 38 тонн оружейного плутония являются избыточными для военных запасов страны, и изучает оба этих способа его утилизации. Хотя имеется достаточно оснований для широкого использования смешанного оксидного топлива в гражданских реакторах, его внедрение в США связано с различными регулирующими и техническими проблемами. Тем временем США развивают "стандарт исчерпанного топлива", который означает, что плутоний никогда не должен быть доступен в чистом виде, а может содержаться только переработанном топливе.

Европа имеет хорошо-развитые технологии по производству МОХ топлива, а Япония активно их развивает. Это говорит о том, что оружейным плутонием можно было бы распорядиться относительно быстро. Весь выработанный плутоний мог бы стать наполовину источником топлива для реакторов. Использование такого МОХ-топлива позволит удалять из обращения приблизительно 15 тонн оружейного плутония в год. Это соответствовало бы сокращению 3000 боеголовок в год и позволило бы произвести 110 миллиардов кВтч электроэнергии, что обеспечило бы, например, 60 % энергетических потребностей Австралии. Более 35 реакторов в Европе имеют лицензии на использование смешанного оксидного топлива, а 20 Французских реакторов его уже используют.

Реакторы CANDU хорошо подходят для сжигания МОХ-топлива, и их использование для этих целей запланировано с использованием произведенного в США МОХ-топлива. Россия намеревается использовать свой плутоний как топливо для реакторов на быстрых нейтронах. Если бы весь плутоний использовался в реакторах на быстрых нейтронах вместе с обедненным ураном от имеющихся запасов на обогатительных заводах, * этого было бы достаточно для успешного выполнения мировых коммерческих ядерных программ по производству электроэнергии на несколько десятилетий вперед без использования производства урана на горнодобывающих предприятиях.

* При производстве обогащенного урана для обычных реакторов одновременно производится приблизительно в семь раз большее количество обедненного урана. Если же уран обогащают до 93 % содержания U-235 (для военных целей), то при этом производится приблизительно в 200 раз большее количество обедненного урана. Все это, учитывая очень большое количество всего урана, которое когда-либо добывалось, является очень ценным сырьем и потенциальным топливом для ядерных установок.

3.6 Торий как ядерное топливо

Большая часть этой книги посвящена использованию урана как топлива для ядерных реакторов. Однако, торий может также быть использован как топливо для реакторов типа CANDU или для реакторов, специально разработанных для этой цели. Топливный цикл тория имеет некоторые привлекательные особенности, и описан ниже в Разделе 4.5. Реакторы с эффективными нейтронными потоками, типа CANDU, способны к работе и на ториевом топливе, хотя обычно в них используют ядерное топливо типа U-235 или Pu-239. В этом случае торий (Th-232), поглощая нейтроны в реакторе, становится расщепляющимся ураном (U-233), который и продолжает цепную реакцию деления. Торий приблизительно в три раза более распространен в земной коре, чем уран. Австралийские минеральные пески, например, особенно в Виктории и Западной Австралии, содержат значительное количество тория.

3.7 Исследовательские реакторы

Уместно заметить, что в дополнение к имеющимся в мире более чем 470 коммерческим реакторам, имеется приблизительно 280 исследовательских реакторов и реакторов, задействованных для производства изотопов, работающих в 54 странах. Они, главным образом, намного меньше, чем, те, которые используют для производства электроэнергии, но, тем не менее, также нуждаются в топливе и производят отходы. Кроме научных исследований, они используются для производства медицинских изотопов и других радиоактивных источников для промышленности.

3.8 Атомный флот

Ядерные энергетические установки особенно перспективны для оснащения ими морских судов, которые должны находиться в море в течение длинных периодов времени без дозаправки, или для создания мощных и быстрых подводных лодок. В настоящее время, в мире эксплуатируется приблизительно 250 судов, которые обеспечиваются энергией более чем 400 малыми ядерными реакторами. Большинство из них расположены на подводных лодках, но они имеются также на ледоколах и авианосцах. Это водяные реакторы высокого давления со специальным топливом и спроектированы таким образом, что имеют возможность работать в непрерывном режиме до десяти лет между дозаправками. Субмарины с ядерными установками способны двигаться в подводном режиме со скоростью до 25 узлов без остановки в течение недель, что в значительной степени повышает их роль в военно-морском флоте. Военно-морские флоты США, Англии, Франции, России и Китая используют морские суда с ядерными установками. Много субмарин с ядерными установками были в 1990-ых годах сняты с вооружений по причине как их морального износа, так и вследствие политики разоружения. В США реакторные отсеки устаревших подводных лодок просто отделяются от остального оборудования и после специальной обработки размещаются в специальных хранилищах для ядерных отходов низкого уровня (см. главу 5). В России, однако, в этой области имеются некоторые проблемы как политического, так и экономического характера. В Великобритании устаревшие атомные подводные лодки просто уничтожаются.

3.9 Другие приложения ядерной энергии

Кроме морских и исследовательских реакторов, некоторое количество ядерных установок (достигающих приблизительно 5 МВт тепловой мощности) используются для неэлектрических приложений. Они достаточно эффективны для опреснения воды, в нефтяной промышленности для очистки и экстракции нефти от земли и песков. Охлаждаемые водой реакторы могут использоваться для обеспечения населения теплом. Во многих странах имеется значительный опыт в использовании теплоты как побочного продукта генерации электроэнергии.

3.10 Системы, управляемые ускорителем

Принципиальная суть ядерного реактора - управляемая цепная реакция деления U-235 и Pu-239. Ее протекание зависит от наличия нейтронного потока (для расщепления ядра U-235 требует один нейтрон, а после его расщепления производится в среднем 2.43 нейтронов). Однако, без наличия такого остаточного нейтронного потока, ядерная реакция

может быть поддержана внешним вводом нейтронов, произведенных, например, при расщеплении мишени из тяжелых элементов, бомбардируемых протонами в ускорителе высоких энергий. Если такая мишень будет окружена блоком ядерного топлива, типа делящихся изотопов урана или плутония (или тория, который может превращаться в U-233), то появится возможность поддержки цепной реакции деления. Эти устройства называют "управляемые ускорителем системы". В таком "подкритическом" ядерном реакторе нейтроны, произведенные облучением мишени, используются для поддержания реакции расщепления в топливе, и "помогают" нейтронам, являющимися результатом такого расщепления. Такой ядерный реактор мог бы быть выключен просто остановкой протонного пучка без необходимости введения в активную зону специальных поглощающих нейтроны стержней. Топливо в таких реакторах может быть смешано с долгоживущими отходами от обычных реакторов. Другая функция такого "подкритического" ядерного реактора - разрушение тяжелых изотопов. Ядра нечетных изотопов, более тяжелых чем торий -232, имеют высокую вероятность поглощения нейтронов с последующим процессом деления и выделения энергии. Ядра четных изотопов могут поглотить нейтрон с последующим бета-распадом и расщеплением. Этот процесс преобразования долгоживущих изотопов в расщепляющиеся называют "бридинг" (размножение). Поэтому подкритический ядерный реактор может преобразовывать долгоживущие трансурановые элементы в недолговечные продукты деления и при этом еще и выдавать некоторую энергию. Но главное его достоинство состоит в возможности более простой и менее дорогой утилизации высокоактивных отходов от обычных ядерных реакторов. Однако, наибольший интерес к "управляемым ускорителем системам" состоит в потенциальной возможности их использования для сжигания оружейного плутония, как альтернативы его использования в смешанном оксидном топливе для обычных реакторов.

ГЛАВА 4

НАЧАЛО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

4.1 Добыча и переработка урановой руды

Минералы, из которых добывают уран, всегда содержат такие элементы как радий и радон (см. цепочку радиоактивных распадов в Приложении). Поэтому, хотя сам по себе уран слабо радиоактивен, добываемая руда потенциально опасна, особенно если это высококачественная руда. Радиационная опасность, связанная с сопутствующими элементами, характерна не только для ураносодержащих руд, но и для любой горнодобывающей промышленности.

В Австралии уран добывается, главным образом, открытым способом, при котором карьеры имеют естественную хорошую вентиляцию. Урановая руда, добываемая на рудниках в Кентуре и Джабелуке содержит менее 0.5% U_3O_8 . На подземном руднике "Олимпик Дам" урановая руда содержит менее 0.1% U_3O_8 . Любая подземная урановая шахта вентилируется специальными мощными устройствами.

Старые шахты Канады на Озерах (Клаф Лэйк, Ки Лэйк и Рабит Лэйк), также как и Мак Лэйк, которая начала работать в 1999 году, являются шахтами карьерного типа и также хорошо вентилируются. Недавно в Канаде начали эксплуатироваться три новые подземные шахты. Две из них, Мак Артур Ривер и Сигар Лэйк, содержат очень высококачественную руду и требуют специальных методов дистанционного управления

для добычи урана. Несколько подземных месторождений имеется в Клаф Лэйк и Мак Клин Лэйк.

Руда (то есть земная порода, содержащая высокую концентрацию урана, достаточную для его экономичного выделения) специальным образом измельчается. Затем этот порошок обрабатывается раствором серной кислоты для растворения содержащегося в нем урана. Твердые частицы, остающиеся после растворения урана извлекают (экстрагируют), и помещают на длительное хранение в специальные резервуары. Резервуары сконструированы таким образом, чтобы обеспечить надежное хранение этих материалов. Такие отходы содержат основную долю радиоактивных веществ, находящихся в руде (таких, например, как радий).

Две новые шахты скоро будут пущены в эксплуатацию в Австралии для извлечения урана из песчаной руды, добываемой под землей. Кислотный, насыщенный кислородом раствор, содержащий уран, будет циркулировать через специальные фильтры, а уран будет извлекаться на заводе, расположенном на поверхности.

После экстракции из раствора (иногда для этого используют процессы ионного обмена, сопровождаемые осаждением), осадок, содержащий уран, имеет ярко желтую окраску ("yellowcake"). После высокотемпературной сушки окись урана (U_3O_8), теперь уже зеленого цвета, загружается в специальные емкости объемом 200 литров. Мощность дозы облучения на расстоянии одного метра от такой емкости равна, приблизительно половине того, что человек получает во время полета на самолете. В Австралии все эти операции проводятся в соответствии с утвержденными правительством нормативами радиационной безопасности на предприятиях горнодобывающей промышленности. В Канаде также применяются инструкции Комиссии по радиационной безопасности. В обеих странах эти правила и нормы устанавливают строгие стандарты по контролю за гамма-облучением, и возможным попаданием в организм радона и других радиоактивных материалов. Стандарты относятся как к персоналу предприятий, так и к населению.

* Доза 20 мЗв/год в течение более чем пяти лет является максимально допустимой для персонала предприятий, включая облучение радоном и других радиоактивных веществ (в дополнение к естественному фону и исключая экспозицию при медицинской диагностике).

Гамма-излучение исходит преимущественно от изотопов висмута и свинца. Газ радон выделяется из горных пород, в которых происходит распад радия.* Вследствие спонтанного радиоактивного распада он переходит в дочерние изотопы радона, которые являются эффективными излучателями альфа-частиц. Радон находится в большинстве горных пород, и, как следствие этого, находится и в воздухе, который все мы вдыхаем. При высоких концентрациях радон представляет опасность для здоровья, так как небольшой период полураспада означает, что альфа-распад может происходить внутри организма при его вдыхании, что, в конечном счете, может вызывать рак легкого.

* Под "Радоном" обычно понимают изотоп Rn-222. Другой изотоп, Rn-220 (появляется вследствие распада тория и известен как "торон"), является распространенной составляющей многих Австралийских минеральных песков

При добыче и производстве урана предпринимаются различные меры предосторожности для защиты здоровья персонала:

- Тщательно контролируется уровень запыленности, чтобы минимизировать попадание в организм гамма- или альфа-излучающих веществ. Пыль является

главным источником радиоактивного облучения. Она обычно дает вклад в 4 мЗв/год в ежегодную дозу, получаемую персоналом (см. также Таблицу 13).

- Ограничивается внешнее радиоактивное облучение персонала в шахтах, на заводах и местах размещения отходов. На практике уровень внешнего облучения от руды и отходов обычно настолько низок, что он практически не влияет на увеличение допустимой ежегодной дозы.
- Естественная вентиляция открытых месторождений уменьшает уровень экспозиции от радона и его дочерних изотопов. Уровень облучения от радона редко превышает один процент от уровня, допустимого для непрерывного облучения персонала. Подземные рудники оборудуются совершенными системами вентиляции для достижения того же уровня. На Австралийских и Канадских подземных рудниках средняя доза облучения составляет, приблизительно, 3 мЗв/год.
- Существуют строгие гигиенические нормы на работу персонала с концентратом окиси урана, поскольку он химически токсичен, подобно оксиду свинца *. На практике предпринимаются предосторожности, защищающие органы дыхания от попадания токсинов, аналогичные тем, которые используются при работах на свинцовых плавильных печах.

*Как свинец, так и уран являются токсичными веществами, и воздействуют на почки. Организм активно выделяет большую часть Pb или U через мочу.

Начиная с пятнадцатого столетия, многие шахтеры, которые работали на подземных шахтах вблизи нынешней границы между Германией и Чешской Республикой, преждевременно погибали от таинственной болезни. В конце 1800-ых годов болезнь была диагностирована как рак легкого, но только в 1921 году газ радон был предположен в качестве ее возможной причины. Хотя это и было окончательно подтверждено в 1939 году, в период с 1946 по 1959 годы, многие подземные месторождения урана в США разрабатывались без соответствующих мер предосторожности, вытекающих из Европейского опыта. В начале 1960-ых годов был зарегистрирован рост раковых заболеваний среди курящих шахтеров. Причиной роста был тогда также признан газ радон и, что более важно, его твердые дочерние продукты радиоактивного распада. Болезнь вызывалась накоплением дозы облучения от радона, полученной 10-15 годами ранее.

Слабо вентилируемые, пылеобразующие процессы добычи урана в США, которые вели к самому большому риску для здоровья, сегодня уже в прошлом. За последние 35 лет произошли существенные изменения в технологических процессах на предприятиях горнодобывающей промышленности, защищающих шахтеров от различных опасностей. Открытая же карьерная добыча урана фактически безопасна. Не имеется ни одного известного случая заболевания, вызванного облучением шахтеров, работающих на открытых урановых рудниках в Австралии или Канаде. Возможно, это частично объясняется отсутствием детальной информации относительно профессиональных заболеваний, связанных с работами на урановых рудниках в 1950-ых годах (ни одна страна не вела подобной статистики в то время).

После технологических процессов экстракции урана на предприятиях горнодобывающей промышленности практически весь радиоактивный радий, торий и актиний содержится в отвалах и, следовательно, уровни излучения и испускания радона из таких отходов будут, по всей вероятности, существенны*. Однако, маловероятно, что кто-либо построит жилище на вершине отвальных пород и получит повышенную дозу

облучения, лежащую за пределами международных норм. Тем не менее, отходы должны быть закрыты достаточным количеством грунта, чтобы уровни гамма-излучения не превышали уровня естественного фона. В этом случае возможно и покрытие этих мест растительностью.

* Приблизительно 95 % радиоактивности в руде с содержанием 0.3 % U_3O_8 исходит от радиоактивного распада U-238 (см. Приложение), достигающей, приблизительно, 450 кБк/кг. Этот ряд имеет 14 радиоактивных долгоживущих изотопов и, таким образом, каждый из них дает, приблизительно, 32 кБк/кг (независимо от массового соотношения). После обработки из руды удаляется U-238 и немного U-234 (и U-235) и радиоактивность снижается до 85% ее первоначального значения. После удаления большей части U-238, два короткоживущих продукта его распада (Th-234 и Pa-234) скоро исчезают и, по истечению нескольких месяцев, уровень радиоактивности снижается до 70% ее первоначального значения. Основным долгоживущим изотопом тогда становится Th-230 (период полураспада 77000 лет), который превращается в радий-226 с последующим распадом в радон-222.

Излучение радона, находящегося в отходах, в течение технологических процессов до момента их надежного захоронения может представлять опасность для окружающей среды. Однако, следует иметь ввиду, что радон присутствует в большинстве горных пород и, кроме локальных опасностей, упомянутых выше, общее региональное увеличение радиоактивности от горнодобывающих операций, связанных с радоном, очень мало (см. также 6.3).

Техническая вода, которая используется в технологических процессах, также содержит радий и другие металлы, присутствие которых было бы нежелательно во внешней среде. Эта вода хранится и испаряется таким образом, чтобы содержащиеся в ней металлы были безопасны, и не попадали в окружающую среду. Техническая вода никогда не сбрасывается в естественные стоки, а сохраняется и испаряется в специальных дамбах.

Сток дождевых осадков, в соответствии с качеством содержащейся в них воды, осуществляется отдельно по специальным дренажным системам *. Вода плохого качества сохраняется и обрабатывается.

* Уровни содержания радионуклидов не должны превышать стандарты для питьевой воды.

Бывшая урановая шахта Рам Джангл в Австралии многим известна как источник загрязнения воды. Добыча урановой руды на этой шахте была связана с обработкой больших количеств сульфидосодержащих пород. В связи с низкими стандартами безопасности в 1950-ых годах, в то время практически не предпринимались меры предосторожности по предотвращению загрязнения рек **. Большие терриконы отвалов в сочетании с теплым, дождливым климатом вызывали сток значительных количеств кислотных отходов, известных как "кислотный горный дренаж".

** Металлические сульфиды в контакте с водой и воздухом в теплом климате имеют тенденцию вступать в реакцию, особенно в присутствии некоторых бактерий. Получающиеся при этом серная кислота и токсические тяжелые металлы (например, медь) могут попадать через грунтовые воды в водоемы.

4.2 Ядерный топливный цикл

Топливный цикл описывает путь, по которому топливо попадает в ядерный реактор, и по которому его покидает.

Все способы производства топлива, подготовки его к использованию и утилизации

отработанного топлива вместе взятые и составляют то, что называют топливным циклом. Уже сам термин "топливный цикл" предполагает, что отработанное ядерной топливо может повторно использоваться на ядерных установках в свежих тепловыделяющих элементах после специальной обработки.

В отличие от угля, урановую руду нельзя подавать непосредственно на электростанцию. Прежде она должна быть очищена, сконцентрирована и помещена в специальные топливные стержни. Рисунок 10 показывает так называемый "открытый топливный цикл" в ядерной энергетике, который используется сегодня в большинстве стран, на наиболее общих видах реакторов.

На урановых рудниках (таких как, например, Олимпик Дам или Рэнджер в Австралии, или Саскатчеван в Канаде) ядерное топливо добывается в виде концентрата окиси урана U_3O_8 . Этот материал, порошок зеленого цвета, отправляется на дальнейшую переработку. Он имеет тот же самый изотопный состав, как и руда, в которой содержание U-235 не превышает 0.7 процентов. Остальная часть - это более тяжелый изотоп урана - U-238 (с небольшим содержанием U-234). Большинство реакторов, включая легко-водные реакторы (LWR), не могут работать на таком топливе (использовать необогащенный уран могут Канадские реакторы типа CANDU). Содержание изотопа U-235 должно быть увеличено, приблизительно, до 3.5 процентов. Этот процесс называют обогащением.

Обогащение - это процесс, использующий высокие современные технологии, который требует, чтобы уран был в газообразной форме. Самый простой способ достичь это состоит в том, чтобы преобразовать окись урана в гексофторид урана (UF_6), который находится в газообразном состоянии при температурах немногим более комнатных. Следовательно, первый адресат концентрата окиси урана - это завод, где происходит его преобразование в шестифтористый уран.

После этого UF_6 попадает на обогатительный завод*, на котором происходит увеличение концентрации расщепляющегося изотопа U-235. В этом процессе приблизительно 85 % естественного уранового топлива отбрасывается как "обедненный уран" или как "отходы" (главным образом U-238), которые закладываются на длительное хранение **. Таким образом, после обогащения приблизительно 15 % от первоначального количества представляет собой обогащенный уран, содержащий, приблизительно, 3.5 процента изотопа U-235.

*Большинство обогатительных технологий используют дорогой и энергоемкий процесс газовой диффузии. Новые заводы основаны на более эффективной технологии, использующей газовые центрифуги. Следующее поколение обогатительных заводов, возможно, будет использовать лазерные технологии.

** Этот материал не может использоваться в существующих типах реакторов, его единственно возможное использование - в реакторах на быстрых нейтронах, или в качестве "разбавителя" оружейного урана (см. разделы 4.4 и 3.5). Он сохраняется в виде UF_6 в специальных стальных цилиндрах, и содержание U-235 в нем не превышает 0.3 %.

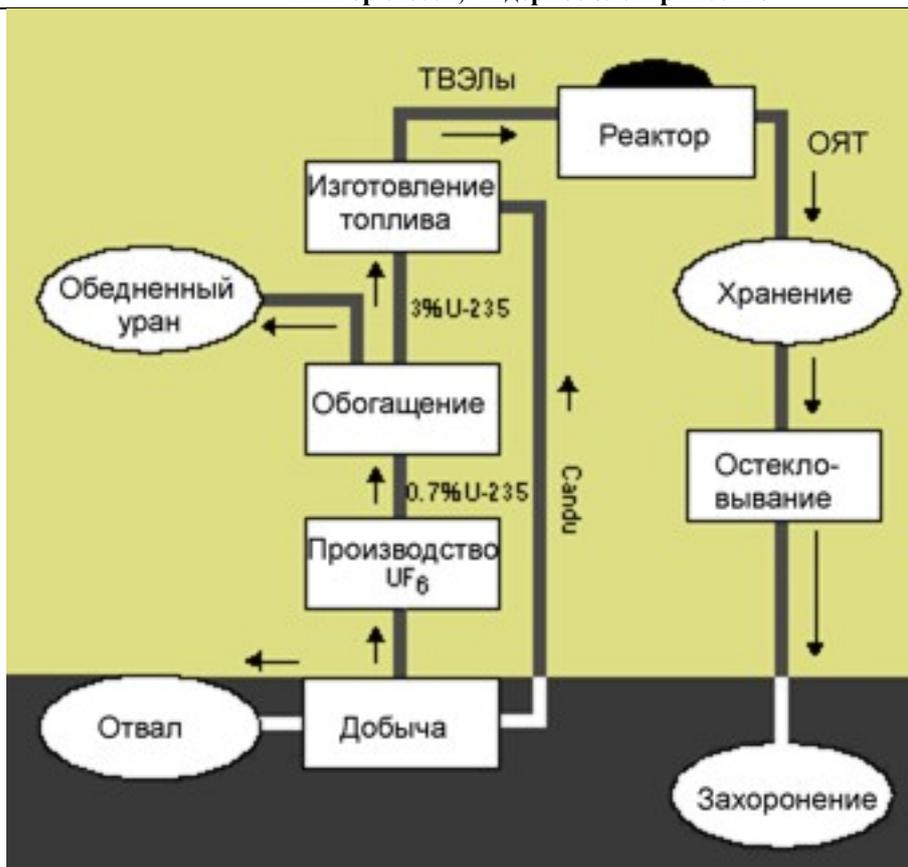


Рисунок 10. Открытый топливный цикл

Методы обогащения основаны на использовании малой разности в массах атомов U-235 и U-238. Большинство существующих установок используют процесс газообразной диффузии, при котором газообразный UF_6 пропускается через длинный ряд мембранных барьеров, которые позволяют молекулам, содержащим U-235, преодолеть их быстрее чем, молекулам, содержащим U-238. Современные заводы используют высокооборотные центрифуги для разделения молекул, содержащих эти два изотопа.

Обогащенный уран далее поступает на завод по изготовлению тепловыделяющих элементов. UF_6 преобразовывается в двуокись урана, керамический материал, и формируется в малые цилиндрические таблетки, приблизительно 2 см по высоте и 1.5 см в диаметре. Эти таблетки помещаются в специальные трубки, изготовленные из нержавеющей стали (или из сплава циркония), длиной, приблизительно, 4 метра и называются тепловыделяющими элементами (ТВЭЛ). Трубки собирают в связки, площадью, приблизительно, 30 кв. см, которые и образуют, так называемые, реакторные топливные сборки. Топливные сборки такого типа используются практически во всех легко-водных реакторах (см. Таблицу 5). В реактор мощностью в 1000 МВт погружают, примерно, 75 тонн топлива в таких сборках.

Фото (foto2.jpg)

Современные заводы используют высокооборотные центрифуги для разделения молекул, содержащих изотопы урана-235 и урана-238

Фото (foto6.jpg)

Обогащительная фабрика Трикастин во Франции (позади градирен). Четыре ядерных реактора (на переднем плане) производят более чем 3000 МВт электроэнергии, необходимой для работы этой фабрики.

Канадские реакторы CANDU (CANadian Deuterium Uranium) хотя и имеют различные конструкции, но все они работают на естественном (то есть необогащенном) уране. Вместо одной большой емкости высокого давления, содержащей ядро реактора, они имеют большое количество (от 300 до 600) горизонтальных напорных труб, каждая из которых содержит топливо и теплоноситель в виде тяжелой воды. Напорные трубы проходят сквозь специальный корпус (так называемую "каландрию"), который наполнен тяжелой водой для управления параметрами реактора*. Топливные сборки для реакторов CANDU имеют размеры 10 см в диаметре и 50 см в длину.

* Тяжелая вода, или окись дейтерия, содержит дейтерий, который является изотопом водорода, и имеет один дополнительный нейтрон в ядре.

Во всех типах действующих реакторов цепная реакция деления происходит в топливных стержнях, как это описано в 3.1. Быстрые нейтроны замедляются водой, тяжелой водой или графитовыми стержнями так, чтобы они могли инициировать реакцию расщепления. Скорость реакции регулируется введением в ядро реактора стержней, поглощающих нейтроны. Теплота, выделяющаяся при реакции деления, уносится теплоносителем, преобразовывается в пар, который в свою очередь используется для вращения турбины и производства электроэнергии.

В легко-водном реакторе топливо остается в реакторе приблизительно в течение трех лет. Кроме теплоты, выделяемой при реакции расщепления U-235, реактор производит расщепляющийся плутоний (Pu-239), который накапливается в топливных элементах. По истечению примерно трех лет, содержание продуктов деления и других материалов, поглощающих нейтроны, возрастает настолько, что цепная реакция деления замедляется. Отработанные топливные сборки в этом случае удаляют и заменяют новыми. Приблизительно одну треть часть топлива заменяют каждый год. В реакторах типа CANDU заправка свежего топлива осуществляется примерно каждые 18 месяцев.

После удаления из реактора, отработанное ядерное топливо (**ОЯТ**) сохраняет радиоактивность и выделяет тепло. Поэтому в течение некоторого времени такое топливо выдерживают в бассейнах под водой для отвода теплоты и защиты от ионизирующего излучения. Следующим шагом может быть переработка отработанного ядерного топлива для закрытия топливного цикла (такие страны как Великобритания, Франция и Япония выбрали такой путь "закрытого топливного цикла"), или окончательное захоронение, как это делается в США, Канаде и Швеции, которые выбрали "открытый топливный цикл". Хранение отработанного ядерного топлива первоначально осуществляется непосредственно в реакторном отделении. Затем оно может быть перемещено в другое место, например, на специальные склады "сухого хранения".

Более ранние поколения реакторов, например, все еще действующие в Великобритании, используют в качестве топлива металлический уран (а не его окись) и газовое охлаждение. В течение последних лет эти реакторы были модернизированы таким образом, чтобы выдержка топливных элементов в их бассейнах не осуществлялась слишком долго. Все это подробно иллюстрирует диаграмма "закрытого топливного цикла" на Рисунке 11. В закрытом топливном цикле для легко-водных реакторов топливо проходит точно такой же путь. Начиная с урановых рудников и заводов, уран проходит все стадии преобразования и обогащения для изготовления реакторного топлива.

После удаления топлива из реактора, топливные стержни проходят обработку на перерабатывающих заводах, где они дробятся и растворяются в кислоте. После специальной химической обработки из отработанного топлива выделяют два ценных продукта: плутоний и неиспользованный уран. Примерно 3% топлива при этом остается в качестве высокоактивных отходов. После битумирования (или остекловывания) эти высокорadioактивные материалы подлежат длительному захоронению (см. 5.2-5.3).

Приблизительно 96 % урана, который используется в реакторе, остается в исчерпанном топливе (в реакторе расходуется не более 1% U-235). Как показано на Рисунке 14 оставшаяся часть топлива преобразуется в теплоту и радиоактивные продукты распада, а некоторая часть в плутоний и другие актиноиды. Следовательно, переработка отработанного ядерного топлива может иметь некоторые экономические выгоды при восстановлении неиспользованного урана и плутония, который был произведен в реакторе. Это также уменьшает объем высокорadioактивных и опасных отходов, которые необходимо надлежащим образом хранить, что также имеет определенную экономическую целесообразность.

Фото (foto3.jpg)

Топливная сборка

В отработанном ядерном топливе содержится примерно 1 % плутония. Это очень хорошее ядерное топливо, которое не нуждается ни в каком процессе обогащения, оно может быть смешано с обедненным ураном (так называемое смешанное оксидное топливо или МОХ-топливо) и поставляться в виде свежих топливныхборок для загрузки в реакторы (см. 5.2). Его можно использовать для загрузки в будущие реакторы-размножители (см. ниже).

Восстановленный уран может возвращаться на дополнительное обогащение, или поставляться в виде свежего топлива для действующих реакторов. Закрытый топливный цикл, таким образом, является более эффективной системой максимального использования урана без его дополнительной добычи на рудниках (в энергетических единицах экономия составляет, примерно, 30 %) и именно поэтому промышленность сразу одобрила такой подход. Однако, такие схемы переработки отработанного ядерного топлива не получили широкого распространения в значительной степени из-за довольно низких цен на уран (сегодняшние цены на уран находятся на уровне 1980 года).

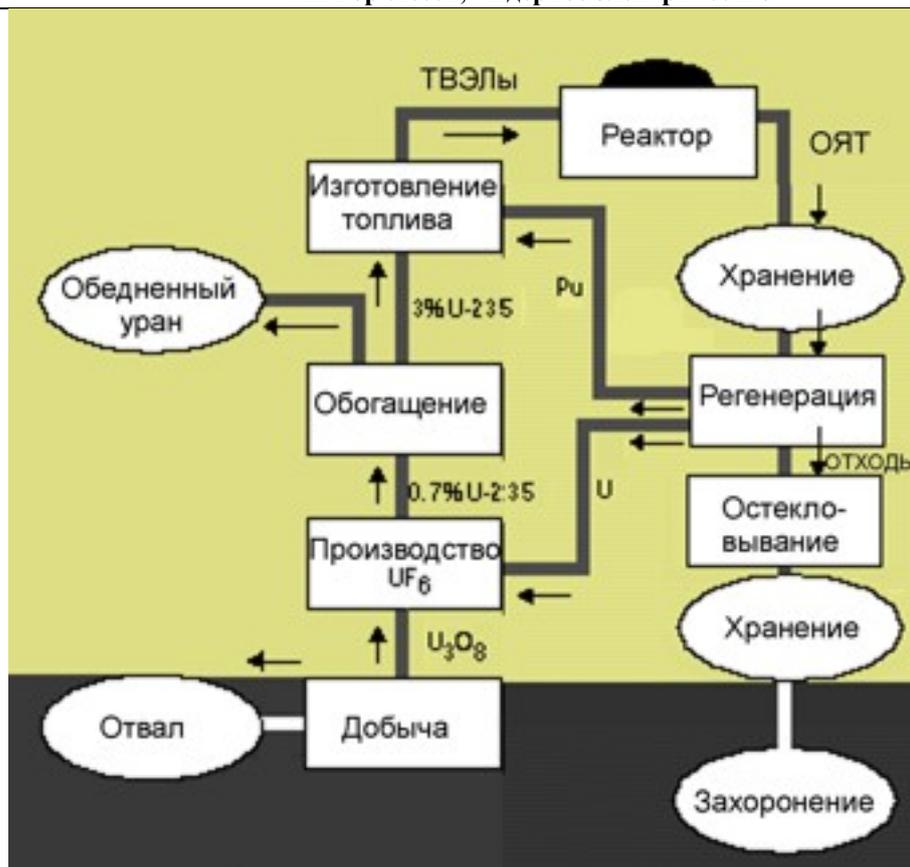


Рисунок 11. Закрытый топливный цикл

Франция, Германия, Великобритания, Россия и Япония продолжают развитие технологий закрытого топливного цикла для окисных топлив, а в Европе более 35 реакторов способны частично использовать МОХ-топливо (от 20 до 50 %), содержащего до 7 % пригодного для реакторов плутония.

4.3 Реакторы нового поколения

Сегодняшние ядерные реакторные технологии намного лучше традиционно используемых на большинстве действующих в мире атомных электростанций, а первые реакторы нового поколения находятся в эксплуатации в Японии.

Производители реакторов в Северной Америке, Японии и Европе имеют на сегодня девять проектов новейших ядерных реакторов, которые внедряются в производство или находятся в окончательной стадии проектирования (см. Таблицу 8). Имеется ряд проектов, находящихся в стадии научно-исследовательских разработок. Конструкции этих реакторов предусматривают гораздо более безопасные условия их работы, исключают всякую возможность утечки радиоактивных материалов. Новые электростанции, работающие на таких реакторах, будут более надежны и просты в эксплуатации, доступны для осмотров, обслуживания и текущего ремонта, более экономичны.

Реакторы нового поколения:

- Имеют стандартизированные проекты для каждого типа, упрощающие процедуру лицензирования, уменьшающие их стоимость и сроки строительства.

- Имеют более простые конструкции, облегчающие их управление и исключают влияние ошибок персонала.
- Имеют большую доступность и более длительные сроки службы.
- Являются более экономичными и конкурентоспособными.
- Исключают возможность расплава активной зоны реактора.
- Обеспечивают более эффективное использование топлива и уменьшают количество отходов.

Основное отличие большинства новых реакторов от эксплуатируемых сегодня, состоит в использовании "пассивных" систем безопасности (так называемых "систем естественной безопасности"), которые основаны на действии сил тяжести, тепловой конвекции, и т.д., и не требуют никакого активного вмешательства персонала в случае каких-либо сбоев.

Новые проекты можно разделить на две категории: эволюционную и экспериментальную. Эволюционные проекты являются в основном новыми моделями существующих реакторов, доказавших свои хорошие эксплуатационные характеристики. Экспериментальные проекты значительно отличаются от используемых на действующих электростанциях и требуют большего количества испытаний и проверок перед их крупномасштабным внедрением.

Министерство энергетики США и предприятия ядерной промышленности разработали три типа новых реакторов. Два из них большие (1300 МВт) "эволюционные" проекты, которые строят на опыте эксплуатируемых легко-водных реакторов в Соединенных Штатах, Японии и Западной Европе. Первый представляет собой модернизированный кипящий реактор ABWR (два таких реактора находятся на промышленной эксплуатации в Японии). Второй - модернизированный герметичный водяной реактор (System 80+). Два реактора System 80+ находятся в стадии строительства в Южной Корее. Комиссия по ядерному регулированию США дала сертификаты на эти проекты в 1997 году.

**Таблица 8
РЕАКТОРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ**

Страна (разработчик)	Тип реактора	Мощность - МВт	Состояние проекта	Главные особенности
США-Япония (GE-Hitachi-Toshiba)	ABWR	1300	Промышленная эксплуатация в Японии с 1996-97 годов. В США: Сертификация проекта в 1997 году Комиссией по ядерному регулированию	Эволюционный проект, более эффективный, меньшее количество отходов, упрощенная конструкция (сроки строительства 50 месяцев) и управление
США (ABB-CE)	System80+ (PWR)	1300	Сертификация проекта в 1997 году Комиссией по ядерному регулированию. Некоторые элементы	Эволюционный проект, увеличенная надежность, упрощенная конструкция и управление

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

			присутствуют в новых реакторах Южной Кореи.	
США (Westinghouse)	AP-600 (PWR)	600	Сертификация проекта в 1999 году Комиссией по ядерному регулированию	Система естественной безопасности, упрощенная конструкция и управление, 60-летний срок службы
Франция - Германия (NPI)	EPR (PWR)	1525-1750	Утвержден как будущий Французский стандарт, проект закончен в 1997 году.	Эволюционный проект, высокий к.п.д. по топливу, улучшенные характеристики по безопасности
Канада (AECL)	CANDU-9	925-1300	Лицензирование в 1997 году.	Эволюционный проект, гибкие требования к топливу, система естественной безопасности
Россия (Атомэнергопроект, Гидропресс)	V-407, V-392 (PWR)	640 и 1000 соответственно	Строительство блока V-407 началось в 1997 году, запланировано строительство блока V-392	Система естественной безопасности, 60-летний срок службы, упрощенная конструкция и управление
Япония (MITI и другие)	PWR	1400	Основной проект в стадии исполнения, запланировано строительство второго блока	Смешанные системы безопасности, упрощенная конструкция и управление
Южная Африка (Eskom-BNFL)	PBMR	115 (На каждый блок)	Уменьшенная модель находится в эксплуатации, прототип будет построен в 2001 году	Дешевая модульная электростанция, газовая турбина, функционирует при высокой температуре, система естественной безопасности
США - РОССИЯ (General Atomics - Минатом РФ и другие)	GT-MHR	250-285 (На каждый блок)	Находится в стадии разработки в России в рамках совместного международного проекта	Газовая турбина, функционирует при высокой температуре, высокий к.п.д. по топливу, система естественной безопасности

Другая, более новаторская разработка США - реактор меньшей мощности AP-600

(приблизительно 600 МВт), имеет систему естественной безопасности. Комиссия по ядерному регулированию США дала сертификат на этот проект в 1999 году.

Подобная сертификация осуществляется впервые, а сам сертификат действует в течение 15 лет. Сертификаты подтверждают, что проекты полностью удовлетворяют требованиям безопасности, и эксплуатация этих объектов является законной в течении срока их действия.

Независимо от требований американской комиссии по ядерному регулированию ядерная промышленность США выбрала проекты большого ABWR реактора и среднего AP-600 для детальной инженерной разработки. Эта программа, стоимостью более 200 миллионов долларов, наполовину финансируется Департаментом энергетики США. Это означает это, предполагаемые покупатели могут теперь получать достоверную информацию относительно темпов работ и затрат на строительство.

Другой американский проект - газотурбинный гелиевый модульный реактор, является развитием более раннего проекта. Реактор этого типа использует топливо в виде гранул, покрытых слоем специальной керамики, что позволяет эксплуатировать его при высоких температурах. В качестве теплоносителя используется гелий, который непосредственно управляет газовой турбиной. Мощность каждого блока составляет 250-285 МВт. Инертная природа теплоносителя и устойчивость топлива к плавлению делает концепцию такого реактора очень привлекательной. Данный проект разрабатывается в рамках международного сотрудничества с Россией и может использоваться для сжигания оружейного плутония.

Модульный реактор в **Южной Африке** также имеет газотурбинный генератор прямого цикла, разработан компанией Eskom и прошел экспертизу в Германии. Модули будут иметь мощность по 115 МВт каждый и тепловой к.п.д., приблизительно, 45 %. В состав топливных гранул, покрытых кремниевым карбидом, входит графитовый замедлитель, содержащий двуокись урана. Реактор имеет систему естественной безопасности, а затраты на его строительство и эксплуатацию, как ожидается, не будут очень высоки. Масштабная (уменьшенная в два раза) модель такого реактора работает в Москве, а прототип должен быть создан в 2001 году.

В Японии, первые два реактора ABWR, как отмечено выше, уже запущены в эксплуатацию. Компания Mitsubishi разработала модернизированную модель реактора PWRS, которая является более простой и для большей эффективности объединяет активные и пассивные элементы системы охлаждения. Работа над проектом такого реактора мощностью 1400 МВт даст основу для развития Японских PWRS реакторов следующего поколения.

В Канаде реакторы CANDU-9 (925-1300 МВт) являются продолжением существующих проектов и имеют более гибкие требования к топливу. В качестве топлива могут использовать естественный уран, слабо-обогащенный уран, восстановленный уран от переработки исчерпанного топлива в PWR реакторах, смешанное оксидное (U и Pu) топливо, способны на прямое использование исчерпанного топлива PWR реакторов, тория и оружейного плутония. В качестве топлива могут также использоваться актиниды, отделенные от повторно обработанных отходов LWR реакторов. Проект реактора CANDU-9 был завершен в 1997 году.

В Европе при совместном участии французских и немецких предприятий разрабатывается большой (до 1750 МВт) Европейский водяной реактор высокого

давления (EPR). Это - эволюционный проект, который был принят в качестве нового стандарта для Франции и удовлетворяет новым строгим Европейским критериям безопасности.

В России разработаны два новых проекта. Самый большой из них - ВВЭР-1000 (модель V-392, водо-водяной энергетический реактор), который является развитием проекта PWR реакторов с пассивными системами безопасности. Меньшая версия - ВВЭР-640 (модель V-407) с западными системами контроля и управления. Первые четыре из них будут построены вблизи Санкт-Петербурга, как ожидается, в 2002 году. Разрабатываются также малые плавающие атомные электростанции.

4.4 Реакторы на быстрых нейтронах

Реакторы на быстрых нейтронах используют технологию, которая отличается от рассмотренной выше. Такие реакторы производят энергию путем сжигания плутония при более полном использовании урана-238 в реакторных топливных сборках, вместо расщепляющегося изотопа U-235, применяемого в большинстве реакторов. Если такие реакторы используются для производства большого количества плутония (большего, чем они потребляют), их называют реакторами-размножителями на быстрых нейтронах (FBR). Многолетний интерес к таким реакторам был обусловлен их способностью производить большее количество топлива, чем они потребляют. Сегодня, из-за достаточно низких цен на уран и высвобождающихся больших запасов оружейного плутония, они, в основном, рассматриваются как потенциальные установки для сжигания ядерных отходов.

Несколько стран проводят научно-исследовательские работы по изучению и развитию реакторов на быстрых нейтронах. На сегодняшний день опыт эксплуатации таких установок насчитывает 290 реакторо-лет (см. Таблицу 9).

Как видно из диаграммы закрытого топливного цикла, обычные реакторы производят два "избыточных" материала: плутоний (появляется при поглощении нейтронов, и отделяется затем в процессе переработки) и обедненный уран (отделяется при обогащении). Плутоний используется в реакторах на быстрых нейтронах как основное топливо и в то же самое время плутоний образуется из обедненного (или естественного) урана, в основном U-238, который окружает активную зону реактора в виде специальных "бланкет". Другими словами, реактор одновременно "сжигает" и "производит" плутоний*, как это показано на Рисунке 13. В зависимости от конструкции реактора, произведенный расщепляющийся плутоний может использоваться либо в этом же реакторе, либо в будущих реакторах-размножителях, либо в обычных реакторах (см. Рисунок 12).

* Как U-238 так и Pu-240 при поглощении нейтрона превращаются в расщепляющиеся Pu-239 и Pu-241, соответственно: $n + U^{238}_{92} \Rightarrow U^{239}_{92} \Rightarrow (\text{бета-распад, 23 мин}) \Rightarrow Np^{239}_{93} \Rightarrow (\text{бета-распад, 2.3 дня}) \Rightarrow Pu^{239}_{94}$.

Реакторы на быстрых нейтронах имеют высокую тепловую эффективность, обусловленную высокотемпературным режимом их эксплуатации. Охлаждение активной зоны осуществляется в них с помощью жидкого натрия. Хотя с химической точки зрения это довольно сложно, тем не менее, сделать это проще, чем использовать воду при очень высоком давлении. Эксперименты, проводимые в течение 19 лет на реакторе-размножителе в Великобритании (до его остановки в 1977 году), показали, что система охлаждения на основе жидкого металлического натрия менее чувствительна к отказам, чем системы, использующие воду очень высокого давления или пар (в легко-водных

реакторах). Более современный эксплуатационный опыт французских и английских прототипов полностью подтвердил этот вывод.

Реакторы-размножители на быстрых нейтронах имеют потенциальную возможность использовать фактически весь уран, произведенный горнодобывающей промышленностью.

Как описано в разделе 3.2, приблизительно в 60 раз большее количество энергии можно извлечь из первоначально добытого урана с помощью топливного цикла реакторов-бридеров по сравнению с "незамкнутым циклом" в обычных легко-водных реакторах. Такая чрезвычайно высокая эффективность делает реакторы-бридеры очень привлекательными для производства энергии. Однако, их высокая стоимость, с одной стороны, и распространенность дешевого урана, с другой, вряд ли будут способствовать их широкому внедрению в течение ближайших десятилетий, вплоть до 2050 года.

По этой причине работы по проекту Европейского FBR (1450 МВт) были прекращены в 1994 году, хотя исследования на Французском FBR (Superphenix, 1250 МВт) продолжались в течение 1995-98 годов. Тем не менее, исследования продолжаются на Индийском FBR в направлении использования в качестве топлива изотопов тория, а в Японии на прототипе действующего FBR (Monju), который подключен к электрической сети в августе 1995 года (но затем был отключен из-за обнаруженной утечки натрия).

Российский реактор на быстрых нейтронах BN-600 был введен в эксплуатацию в 1980 году и имеет лучшие эксплуатационные показатели среди всех действующих в России энергоблоков. Реактор BN-350 эксплуатируется в Казахстане уже почти 25 лет и приблизительно половина его ресурса используется для опреснения воды. Россия планирует построить несколько реакторов на быстрых нейтронах для утилизации запасов оружейного плутония. Во всем мире сегодня работают приблизительно 20 реакторов на быстрых нейтронах, а некоторые из них - начиная с 1950-ых годов.

4.5 Ториевый цикл

Реакторы на ториевом топливном цикле подобны реакторам на быстрых нейтронах. В реакторах этого типа естественный торий-232 при поглощении нейтронов превращается в делящийся изотоп урана (уран-233). Этот изотоп, участвуя в цепной реакции деления, выделяет теплоту и избыточные нейтроны, которые преобразовывают еще большее количество тория в U-233. Такая технология привлекательна тем, что, во-первых, позволяет избежать производства плутония, во-вторых, в качестве топлива используется довольно распространенный торий, а, в-третьих, эффективность использования топлива может быть близка к эффективности реакторов на быстрых нейтронах. Однако, количество расщепляющегося урана-233, производимого в такой установке, не совсем достаточно, чтобы поддерживать цепную реакцию деления. Поэтому, хотя интерес к таким проектам не затухает вот уже на протяжении последних 30 лет, тем не менее до их промышленного применения пока еще далеко.

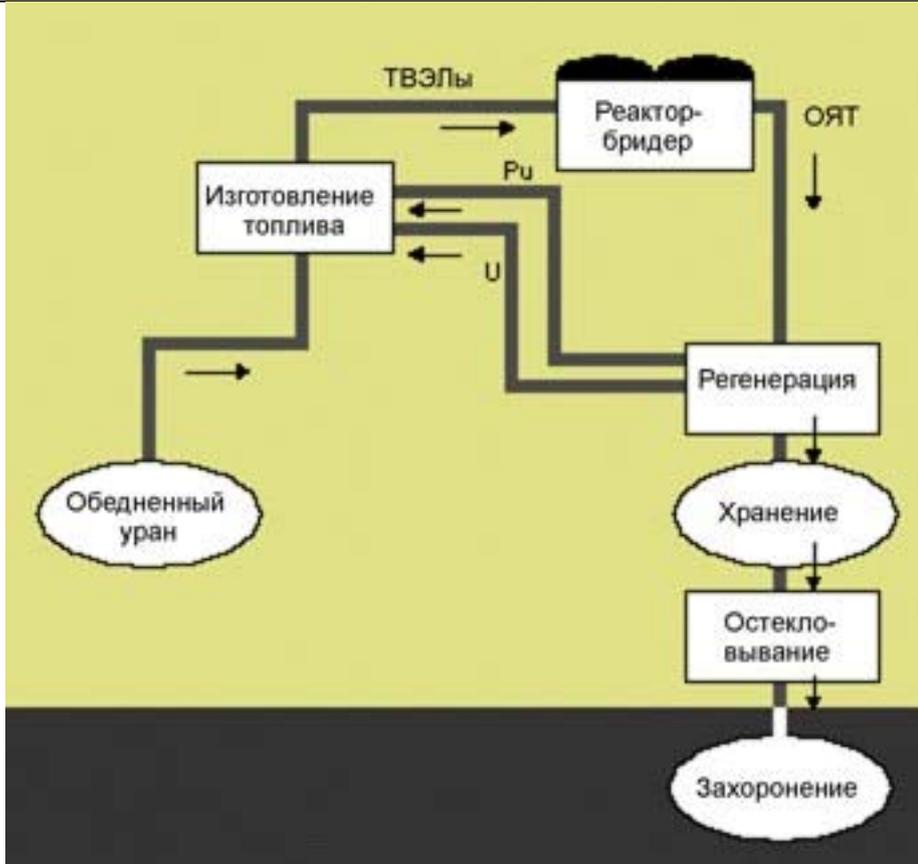


Рисунок 12. Топливный цикл в реакторах на быстрых нейтронах

Отличие между обычным реактором на тепловых нейтронах и реактором на быстрых нейтронах состоит в большем количестве нейтронов, производимых в последнем (17 вместо 15 после 6 актов расщепления). Это позволяет при желании производить большее количество ядерного топлива, чем используется. В обычном реакторе имеется примерно четыре нейтрона для размножения Pu-239, а в реакторе на быстрых нейтронах их уже семь. Точные значения этих чисел зависят от конкретных конструкций реакторов и режима их работы.

Таблица 9
Реакторы-размножители на быстрых нейтронах

Страна	Реактор	МВт (электричес кая)	МВт (теплова я)	Срок эксплуатац ии
США	EBR 1	0.2		1951-63
	EBR 2	20		1963-94
	Fermi 1	66		1963-72
	SEFOR	20		1969-72
	Fast Flux Test Facility		400	1980-94
Англия	Dounreay DFR	15		1959-77
	Dounreay PFR	270		1974-94
Франция	Rapsodie		40	1966-82

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

	Phenix *	250		1973- н.в.
	Superphenix 1	1240		1985-98
Германия	KNK-2	21		1977-91
Индия	FBTR		40	1985- н.в.
Япония	Jojo		100	1978- н.в.
	Monju	246		1994-96
Казахстан	BN-350*	135		1972-99
Россия	BR-5		5	1959-71
	BR-10		10	1971- н.в.
	BOR-60	12		1969- н.в.
	BN-600*	600		1980- н.в.

*Блок находится в промышленной эксплуатации

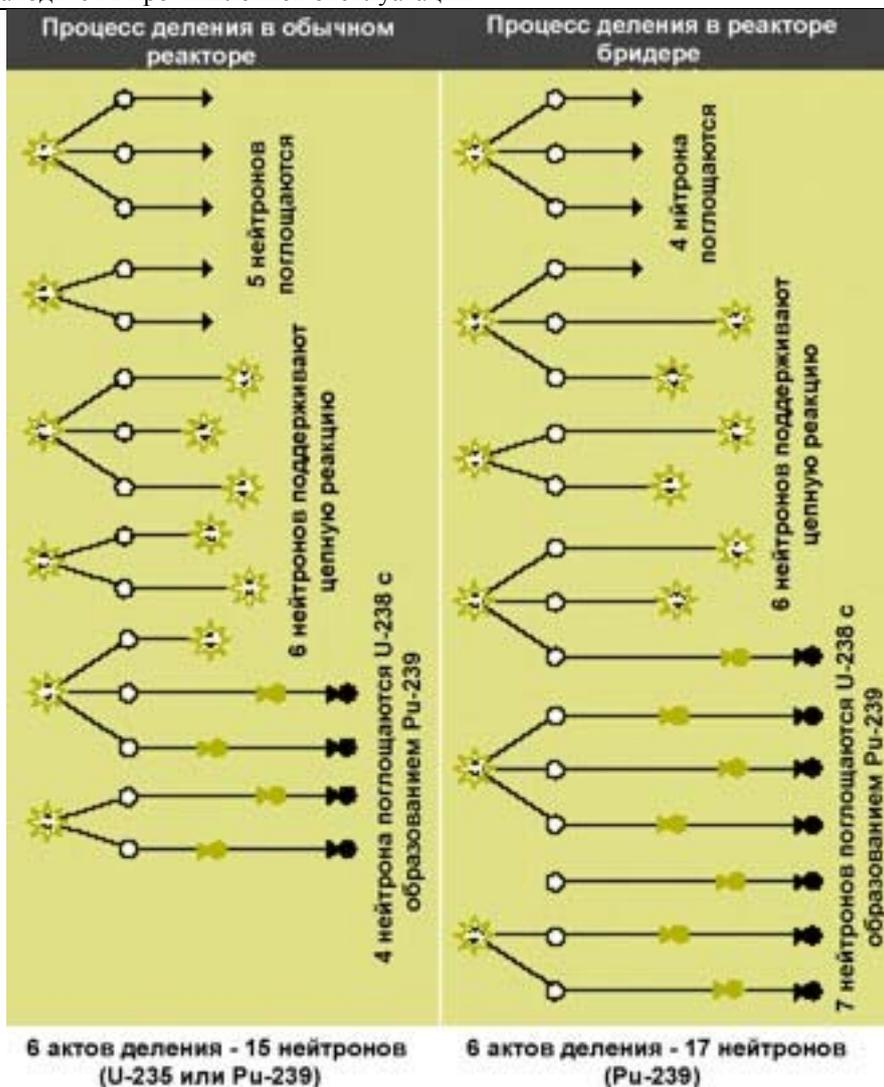


Рисунок 13. Реакции расщепления в обычном реакторе и реакторе на быстрых нейтронах

ГЛАВА 5

ОКОНЧАНИЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

5.1 Ядерные "отходы"

Один из наиболее острых и волнующих сегодня общественность аспектов ядерного топливного цикла - это вопросы размещения и хранения радиоактивных отходов. Наиболее трудный из них - это вопрос о высокоуровневых отходах, в работе с которыми имеются два различных стратегических подхода: первый заключается в переработке истощенного топлива с целью отделения высокоуровневых отходов с их последующим остекловыванием (или битумированием) и захоронением, а второй заключается в прямом захоронении истощенных тепловыделяющих элементов вместе с содержащимися в них высокоуровневыми отходами.

Основные ядерные отходы остаются надежно "запертыми" в керамическом топливе для ядерных реакторов.

Как указывалось в главах 3 и 4, при "сжигании" ядерного топлива в реакторных установках образуются продукты деления, такие как изотопы бария, стронция, цезия, иода, криптона и ксенона (Ba, Sr, Cs, I, Kr, и Xe). Многие из образующихся изотопов накапливаются в пределах самого топлива. Они высоко радиоактивны, и соответственно, недолговечны.

Тогда как эти "малые" атомы формируются из расщепляющейся части топлива, изотопы плутония Pu-239, Pu-240 и Pu-241 *, а также и некоторые изотопы других трансурановых элементов, формируются из атомов U-238 в активной зоне ядерного реактора при поглощении ими нейтронов и последующим бета-распаде. Все эти изотопы радиоактивны и кроме расщепляющегося плутония, который "сжигается", остаются в истощенном топливе, когда его удаляют из реактора. Большинство трансурановых изотопов формирует долгоживущую часть высокоуровневых отходов.

*Это тот самый Pu-241, который распадаясь, превращается в Америций -241, используемый в бытовых детекторах задымления помещений.

Хотя предприятия ядерного топливного цикла и производят различные отходы, они тем не менее не являются промышленными "выбросами" в традиционном понимании этого слова. Их надежное хранение и размещение обеспечивает безопасность. Фактически, ядерная энергетика - единственная отрасль промышленности, которая берет полную ответственность за все свои отходы и полностью оплачивает расходы по их содержанию и утилизации. Кроме того, методы экспертного контроля, развитые в отношении отходов на гражданских ядерных объектах, теперь начинают применяться и к военной промышленности, которая действительно представляет реальную угрозу окружающей среде в некоторых частях мира.

Радиоактивные отходы включают в себя разновидность различных материалов, требующих различных подходов по их содержанию и хранению для предохранения людей и окружающей среды. Они обычно классифицируются как отходы низкого уровня, промежуточного уровня и высокого уровня, в соответствии с количеством и типом радиоактивности, содержащейся в них.

Другим фактором в работе с отходами является время, в течение которого они остаются опасными. Это время зависит от видов радиоактивных изотопов, содержащихся в них, и характеризуется периодом полураспада этих изотопов. Период полураспада - это время, в течение которого данный радиоактивный изотоп теряет половину своей активности. После четырех периодов полураспада уровень активности снижается в 16 раз, а после восьми - в 256 раз.

Различные радиоактивные изотопы имеют периоды полураспада от долей секунды до миллионов лет. Радиоактивность уменьшается со временем вследствие распада изотопов и превращения их в стабильные, не радиоактивные элементы. Скорость распада изотопов обратно пропорциональна их периоду полураспада; чем меньше период полураспада, тем быстрее данные изотопы распадаются. Следовательно, чем выше уровень радиоактивности в некотором количестве материала, тем большее количество короткоживущих изотопов в нем содержится.

Три основных принципа используются в работе с радиоактивными отходами:

- "Концентрировать и изолировать"
- "Разбавлять и рассеивать"
- "Выдерживать и расщеплять".

Два первых принципа используются в работе и с нерадиоактивными отходами. Отходы концентрируются и изолируются, или (в очень малых количествах) разбавляются до приемлемых уровней и затем рассеиваются в окружающей среде. Принцип "выдерживать и расщеплять" относится только к радиоактивным отходам и означает, что отходы хранят в течение определенного времени, в течение которого их радиоактивность уменьшается благодаря естественному распаду изотопов.

В гражданском ядерном топливном цикле основное внимание уделяется высокоуровневым отходам, содержащим продукты деления и трансурановые элементы, которые образуются в процессе работы ядерного реактора.

Высокоуровневые отходы содержатся непосредственно в отработанном ядерном топливе или в продуктах его переработки. Так или иначе, их количество не слишком велико - ежегодно приблизительно 25-30 тонн исчерпанного топлива (или три кубометра остеклованных отходов) образуется в результате эксплуатации типичного легко-водного ядерного реактора мощностью 1000 МВт. Такое количество может быть эффективно и экономно изолировано. Уровень радиоактивности таких отходов быстро уменьшается (см. Рисунок 16А). Например, отработанные топливные элементы, извлеченные из легко-водного реактора, настолько радиоактивны, что испускают несколько сотен киловатт тепловой энергии, но год спустя это излучение уменьшается до пяти киловатт, а после пяти лет - всего один киловатт. Через 40 лет уровень радиоактивности в них падает, примерно, в тысячу раз.

После специальной переработки отработанного топлива, примерно 3% высокоуровневых отходов находятся в жидком состоянии и содержат "золу" от сторевавшего урана. Это высоко радиоактивные долгоживущие продукты деления урана и некоторые тяжелые элементы. Они производят значительное количество теплоты и требуют специального охлаждения. Такие отходы остекловывают специальными составами в небольшие капсулы, закладывают на промежуточное хранение с последующим долговременным размещением глубоко под землей. Такие принципы

обращения с радиоактивными отходами приняты в Великобритании, Франции, Германии и Японии (см. также 5.2 и 5.3).

С другой стороны, если отработанное реакторное топливо не подвергается обработке, то все высоко радиоактивные изотопы остаются в нем. В этом случае с топливными элементами обращаются как с высокоуровневыми отходами. Такой прямой подход к работе с отработанным ядерным топливом принят в США и Швеции (см. 5.4). Многие страны, включая Канаду, придерживаются различных концепций, выбирая между переработкой и прямым долговременным хранением отработанного ядерного топлива. Высокоуровневые отходы составляют только 3 % от всех радиоактивных отходов во всем мире, но они содержат до 95 % всей радиоактивности, содержащейся в них.

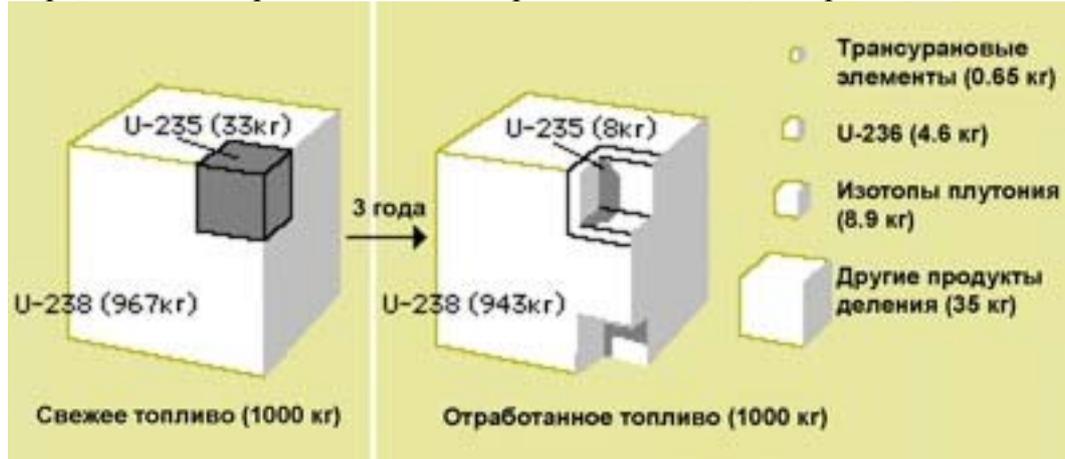


Рисунок 14. Что происходит в легко-водном реакторе через три 3 года?

Наряду с высокоуровневыми отходами ядерной энергетики, работа с радиоактивными материалами приводит к возникновению **отходов низкого уровня** (средства очистки оборудования, перчатки, специальная одежда, инструменты и т.д.). Такие отходы хотя и не представляют особой опасности, но требуют более тщательного обращения, чем обычный мусор. Отходы низкого уровня поступают также из медицинских учреждений, научно-исследовательских лабораторий и промышленности. Они могут быть сожжены. Но обычно их размещают в специальных хранилищах под землей. В любом случае, из них сначала выделяют все высоко токсичные материалы и включают в высокоуровневые отходы, что обеспечивает безопасность и эффективность работы с такими, относительно безвредными, материалами. Многие страны имеют хранилища для размещения отходов низкого уровня. Отходы низкого уровня имеют, примерно, такой же уровень радиоактивности, как и низкосортная урановая руда, а их количество, образующееся каждый год, почти в пятьдесят раз больше, чем количество высокоуровневых отходов. Во всем мире они составляют 90 % от всех радиоактивных отходов, но имеют лишь 1 % радиоактивности.

Отходы промежуточного уровня главным образом возникают в ядерной промышленности. Они более радиоактивны и их изолируют от людей перед обработкой и размещением на хранение. Обычно они включают в себя различные смолы, химические осадки, компоненты реакторного оборудования и загрязненные материалы от реакторов, снимаемых с эксплуатации. Обычно, такие отходы битумируются для дальнейшего размещения в специальных хранилищах. Короткоживущие отходы (главным образом, различные компоненты реакторного оборудования) хранят в заглубленных хранилищах, но долгоживущие отходы (от переработки ядерного топлива) размещают глубоко под землей. Во всем мире отходы промежуточного уровня составляют 7 % от всех

радиоактивных отходов и имеет 4 % радиоактивности.

5.2 Переработка отработанного топлива

Необходимость переработки исчерпанного ядерного топлива вызывается с одной стороны возможностью регенерирования неиспользованного урана и плутония в отработанных тепловыделяющих элементах, а с другой - возможностью уменьшения количества высокоуровневых радиоактивных отходов.

Переработка предотвращает излишний расход ценных ресурсов, потому что в своем большинстве отработанное топливо содержит до 1% делящегося изотопа U-235 и несколько меньшее количество плутония. Переработка позволяет повторять ядерный цикл в свежих тепловыделяющих элементах, сохраняя, таким образом, приблизительно, до 30 % естественного урана. Такое смешанное оксидное топливо - важный ресурс. Выделяемые при этом высокоуровневые отходы, преобразованные в компактные, устойчивые, неразрушимые твердые капсулы, более удобны для дальнейшего хранения, чем объемистые отработанные тепловыделяющие элементы.

На сегодняшний день более 75000 тонн отработанного ядерного топлива от гражданских энергетических реакторов уже подвергнуто повторной обработке, а ежегодный объем переработки составляет, примерно, 5000 тонн.

Таблица 10
Объемы переработки ядерного топлива в мире

Топливо легко-водных реакторов:	Франция, Ла Гаага	1600 тонн в год
	Великобритания, Селфилд	850
	Россия, Челябинск (Маяк)	400
	Япония	90
	<i>Всего</i>	<i>2940</i>
Другое ядерное топливо:	Великобритания, Селфилд	1500
	Франция, Марсель	400
	Индия	200
	<i>Всего</i>	<i>2100</i>
Всего		5040

Отработанные топливные сборки, удаленные из реактора, очень радиоактивны и выделяют тепло. Поэтому их помещают в большие резервуары, наполненные водой ("бассейны выдержки"), которая охлаждает их, а трех метровый слой воды поглощает опасное излучение. В таком состоянии они остаются (непосредственно в реакторном отделении или на перерабатывающем заводе) в течение нескольких лет, пока уровень радиоактивности значительно уменьшится. Для большинства видов ядерного топлива, его переработка начинается, приблизительно, через пять лет после выгрузки из реактора.

Обычный легко-водный реактор мощностью 1000 МВт производит ежегодно, приблизительно, до 25 тонн исчерпанного топлива. После предварительного охлаждения оно может транспортироваться в специальных защитных контейнерах, которые вмещают лишь несколько (пять- шесть) тонн отработанного топлива, но сами весят до 100 тонн. Транспортировка отработанного топлива и других высокоуровневых отходов достаточно

жестко регламентируется.

Переработка отработанного оксидного топлива начинается с растворения тепловыделяющих элементов в азотной кислоте. После этого производят химическое разделение урана и плутония. Pu и U могут быть возвращены к началу топливного цикла - уран на конверсионный завод для дообогащения, а плутоний непосредственно на предприятия по изготовлению топлива. Рисунок 11 иллюстрирует процессы переработки и изготовления свежего топлива на противоположных сторонах диаграммы - в действительности это обычно происходит в одном месте. Остающаяся жидкость после удаления Pu и U представляет собой высокоуровневые отходы, содержащие, примерно, 3 % исчерпанного топлива. Радиоактивность этих отходов высока, и они продолжают производить много теплоты.

Фото (foto4.jpg)

Бассейн выдержки для отработанного топлива на перерабатывающем заводе в Великобритании

Активная переработка ядерного топлива производилось начиная с 1940-ых годов, главным образом для регенерирования плутония в военных целях. В Великобритании, металлические тепловыделяющие элементы от коммерческих реакторов первого поколения с газовым охлаждением были повторно обработаны в Селфилде приблизительно 40 лет назад. За это время завод, перерабатывающий 1500 тонн в год, был значительно усовершенствован для поддержания должного уровня безопасности, гигиены и других регламентирующих стандартов. С 1969 по 1973 год на заводе также повторно обрабатывалось оксидное топливо на специально выделенном и модифицированном для этой цели участке. Новый завод по переработке оксидного топлива мощностью 1200 тонн в год (THORP) был построен в 1994 году.

В США по техническим и политическим причинам ни один завод в настоящее время работает. В свое время в этой стране были построены три завода по переработке исчерпанного оксидного топлива ядерных реакторов: первый завод мощностью 300 тонн в год был построен в Вест Уилле (штат Нью-Йорк), и успешно эксплуатировался с 1966 по 1972 год. Однако, все возрастающие регламентирующие требования и нормы сделали возможность модернизации завода экономически нецелесообразной, и завод был закрыт. Второй завод мощностью 300 тонн в год, основанный на использовании новых технологий, был сооружен в Моррисе (штате Иллинойс), работал некоторое время в "пилотном" режиме но не сумел выйти на промышленный уровень. Строительство третьего завода мощностью 1500 тонн в год в Барнуэлле (штат Южная Каролина) было прекращено в связи с изменениями в политике правительства США, исключающей с целью нераспространения ядерного оружия всякую гражданскую переработку отработанного ядерного топлива. Всего начиная с 1940 года США имеют эксплуатационный опыт работы по переработке отработанного топлива на правительственных оборонных предприятиях насчитывающий более 250 заводов-лет.

Во Франции один завод мощностью 400 тонн в год по переработке металлического топлива от реакторов с газовым охлаждением работает в Марселе. В Ла Гааге с 1976 года производится переработка оксидного топлива, и в настоящее время здесь эксплуатируется два завода мощностью по 800 тонн в год. Индия имеет завод по переработке оксидного топлива с производительностью 100 тонн в год в Тарапуре, а также аналогичные заводы в Кальпакаме и Тромбе. Япония строит большой завод в Рокакошо, хотя большая часть исчерпанного топлива, повторно обрабатывается в Европе (что составляет всего 100 тонн в год). Россия имеет завод по переработке оксидного топлива в Челябинске мощностью 400 тонн в год.

После переработки восстановленный уран дообогащается и отправляется на предприятие по изготовлению свежего реакторного топлива. Плутоний же должен пройти технологический цикл по изготовлению смешанного оксидного топлива (МОХ-топлива) на специальном заводе, который часто интегрируется с перерабатывающим предприятием. Во Франции, например, для того чтобы избежать создания неиспользуемых запасов плутония, выход продукции перерабатывающего предприятия строго скоординирован с загрузкой мощностей завода по изготовлению МОХ-топлива. Если плутоний хранится в течение нескольких лет, то увеличивающийся в нем уровень содержания изотопа Америция-241 (используемого в бытовых датчиках задымления помещений), создаст трудности при производстве МОХ-топлива из-за повышения уровня гамма излучения.

Таблица 11
Объем производства смешанного оксидного топлива (т/год)

Год:	1998	2005
Бельгия и Франция	175	195
Япония	10	100
Россия	-	60
Великобритания	8	120
Всего для легко-водных реакторов	193	475

Новые заводы, предусмотренные к вводу в строй к 2005 году, находятся в стадии строительства. По прогнозам МАГАТЭ их мощность к 2005 году составит от 430 до 610 тонн в год.

5.3 Высокоуровневые отходы после переработки

Несмотря на малые количества (см. 5.1), высокоуровневая отходы, возникающие после переработки отработанного ядерного топлива, требуют большой осторожности в обращении, размещении и хранении, так как они содержат продукты деления и некоторые трансурановые элементы, активно испускающие альфа, бета и гамма-излучение, а также выделяющие много теплоты. Теплота выделяется, главным образом, от продуктов деления. Такие материалы обычно называют как "ядерные отходы".

Если учесть, что потребляемая мощность электроэнергии, произведенной на атомных электростанциях, в расчете на одного человека составляет, примерно, один киловатт (для жителей Западной Европы), то на каждого из нас ежегодно приходится, примерно, по 20 мл высокоуровневых отходов от переработки. После остекловывания или битумирования это количество занимает объем не более одного кубического сантиметра (см. также Рисунки 6 и 15).

Следует отметить, что отходы от военных программ продолжают доминировать в таких странах как США и Россия на протяжении многих десятилетий, независимо от темпов развития гражданской ядерной энергетики. Это "наследство", возникшее с начала 1940-ых годов и приведшее к загрязнению поверхностных слоев земли, утечек из резервуаров для хранения и дорогостоящим мерам по реабилитации загрязненных территорий, создало проблемы тем странам, которые его и произвели.

Жидкие отходы, произведенные на перерабатывающих заводах, временно хранятся в охлаждаемых, многостенных резервуарах из нержавеющей стали, внутри железобетонных защитных корпусов. Их необходимо затем преобразовать в компактные, химически инертные твердые частицы перед окончательным захоронением. Достигается это с помощью процедуры, которая называется остекловывание.

Использование, так называемого, Австралийского "синтетического камня" (**синрок**) является наилучшим способом для изоляции отходов, но это, однако, пока не получило широкого применения в гражданской ядерной энергетике.

Технологии на гражданских заводах по остекловыванию основаны на "кальцинировании" отходов (выпаривании до получения сухого порошка) с последующим перемешиванием в боросиликате. Расплавленная стеклянная масса, смешанная с сухими отходами, помещается в большие резервуары, изготовленные из нержавеющей стали и вмещающие до 400 кг продукта. Крышка резервуара надежно приваривается. Ежегодные отходы от эксплуатации одного реактора мощностью 1000 МВт содержатся в 5 тоннах такой стеклянной массы (это приблизительно двенадцать резервуаров высотой 1.3 метра каждый и диаметром 0.4 метра). В Великобритании, например, они хранятся в бункерах глубоко под землей в вертикальном положении.

Описанные процессы были разработаны и проверены на опытных заводах в 1960-ых годах. К 1966 году несколько тонн высокоуровневых отходов от повторно обработанного топлива были остеклованы в Великобритании в Хоруилле, однако исследования были тогда приостановлены как неприоритетные из-за недостаточного количества высокоуровневых отходов. Высокотемпературные испытания остеклованной массы показали, что она остается нерастворимой даже в случае физического разрушения стекла. Подобные результаты были получены и на Французских предприятиях по остекловыванию отходов между 1969 и 1972 годами.

Остекловывание высокоуровневых радиоактивных отходов впервые получило промышленные масштабы во Франции с 1978 года. Сегодня такие работы проводятся на пяти предприятиях в Бельгии, Франции и Великобритании с производительностью до 1000 тонн остеклованных отходов в год.

В 1996 году два подобных завода были открыты в США. Один, в Вест Уилле (штат Нью-Йорк), должен обрабатывать 2.2 миллиона литров высокоуровневых отходов от гражданских ядерных реакторов, накопившихся от переработанного ядерного топлива за 25 лет их работы, а другой - в Саванна Ривер, предназначен для остекловывания большого количества военных ядерных отходов.

Остеклованные отходы хранят в течение некоторого времени перед окончательным долговременным размещением, позволяя уменьшиться радиоактивности и выделяемой теплоте. Вообще говоря, чем дольше такой материал будет выдержан перед захоронением, тем меньше проблем с ним будет потом. В зависимости от используемых методов размещения, интервал между выгрузкой топлива из реактора и окончательным захоронением остеклованных отходов может составлять 50 лет.

Фото (foto7.jpg)

Загрузка в бункер емкостей с остеклованными высокоактивными отходами в Великобритании (под каждым люком на полу находится бункер, содержащий десять емкостей).

Обработка таких материалов требует обязательного использования специальных мер, гарантирующих безопасность персонала. Как и во всех производствах, где присутствует гамма-излучение, самый простой и дешевый способ предохранения - это дистанция (увеличение расстояния до источника излучения в десять раз уменьшает экспозиционную дозу до одного процента).



Рисунок 15. Изоляция высокоактивных отходов

Такие покрытые эмалью боросиликатные капсулы, изготавливаются на заводе по остекловыванию отходов в Великобритании начиная с 1960-ых годов. В такой капсуле содержится материал, химически идентичный высокоуровневым отходам, после переработки отработанного ядерного топлива, затраченного на производство электроэнергии для одного человека.

Для транспортировки высокоуровневых отходов (или отработанных топливных сборок) используются специальные прочные контейнеры. Они разработаны таким образом, что выдерживают все возможные аварийные ситуации, сохраняют свою целостность и защищают от радиоактивного излучения. В ситуациях, при которых такие контейнеры были вовлечены в серьезные инциденты, они ни разу не создали никакой опасности радиоактивного загрязнения. Высокие требования, предъявляемые к конструкциям таких контейнеров, делают практически невозможным их повреждение даже с использованием взрывчатых веществ и поэтому они совершенно непривлекательны для попыток террористического нападения.

5.4 Размещение и хранение отработанного топлива

Принцип прямого захоронения отработанного ядерного топлива принят в США Швеции, хотя в последнем случае предполагается его регенерация в будущем. С 1988 года Швеция имеет действующее централизованное хранилище для отработанного ядерного топлива (СЛАВ) емкостью 5000 тонн. Отработанное топливо отправляется на это хранилище после, примерно, их годовичного хранения в реакторах в бассейнах выдержки. В СЛАВ для охлаждения и защиты от ионизирующих излучений отработанное топливо будет храниться под водой в течение, примерно, сорока лет. К 2020 году это хранилище будет полностью заполнено, и к этому времени должно быть готово новое хранилище для окончательного захоронения, хотя уже сегодня строятся и несколько больше емкости.

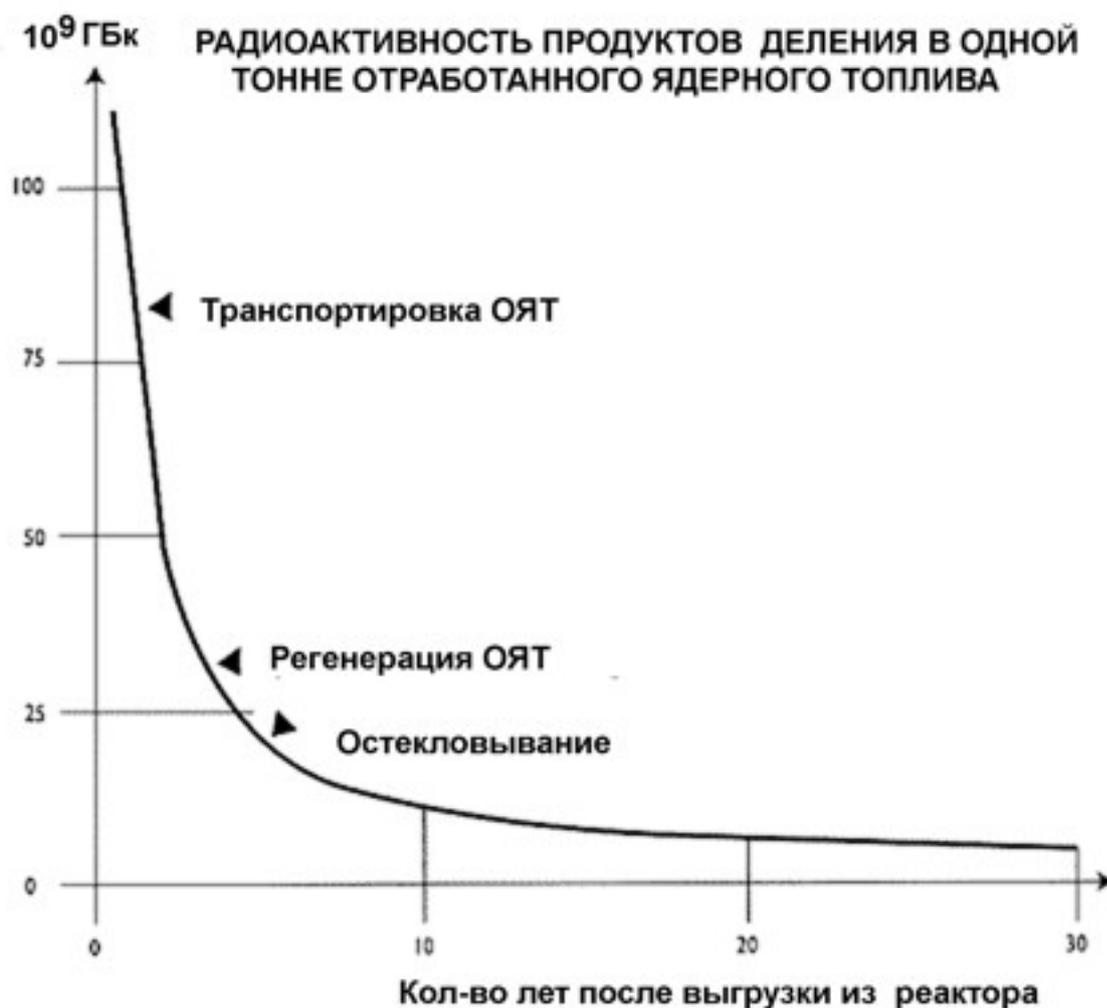


Рисунок 16А

Уменьшение уровня радиоактивности продуктов деления в одной тонне отработанного ядерного топлива PWR реактора

В то время как выделенные высокоактивные отходы остекловывают для придания им физической устойчивости к разрушению, отработанное топливо, предназначенное для прямого размещения и хранения, всегда изготавливается в очень устойчивой керамической форме UO_2 . При непосредственной работе с отработанным ядерным топливом или извлекаемыми из него отходами, важная роль принадлежит степени их охлаждения и радиоактивного распада. Спустя сорок лет после выгрузки топлива из реактора, в нем остается менее одной тысячной доли начального уровня радиоактивности, и с таким материалом намного легче обращаться (см. Рисунок 16А). Эта особенность отличает отходы атомной промышленности от химических отходов, которые всегда остаются опасными. Чем более длительному сроку хранения подвергаются отходы атомной промышленности, тем менее опасными они становятся, и тем более проще их подвергать последующей обработке.

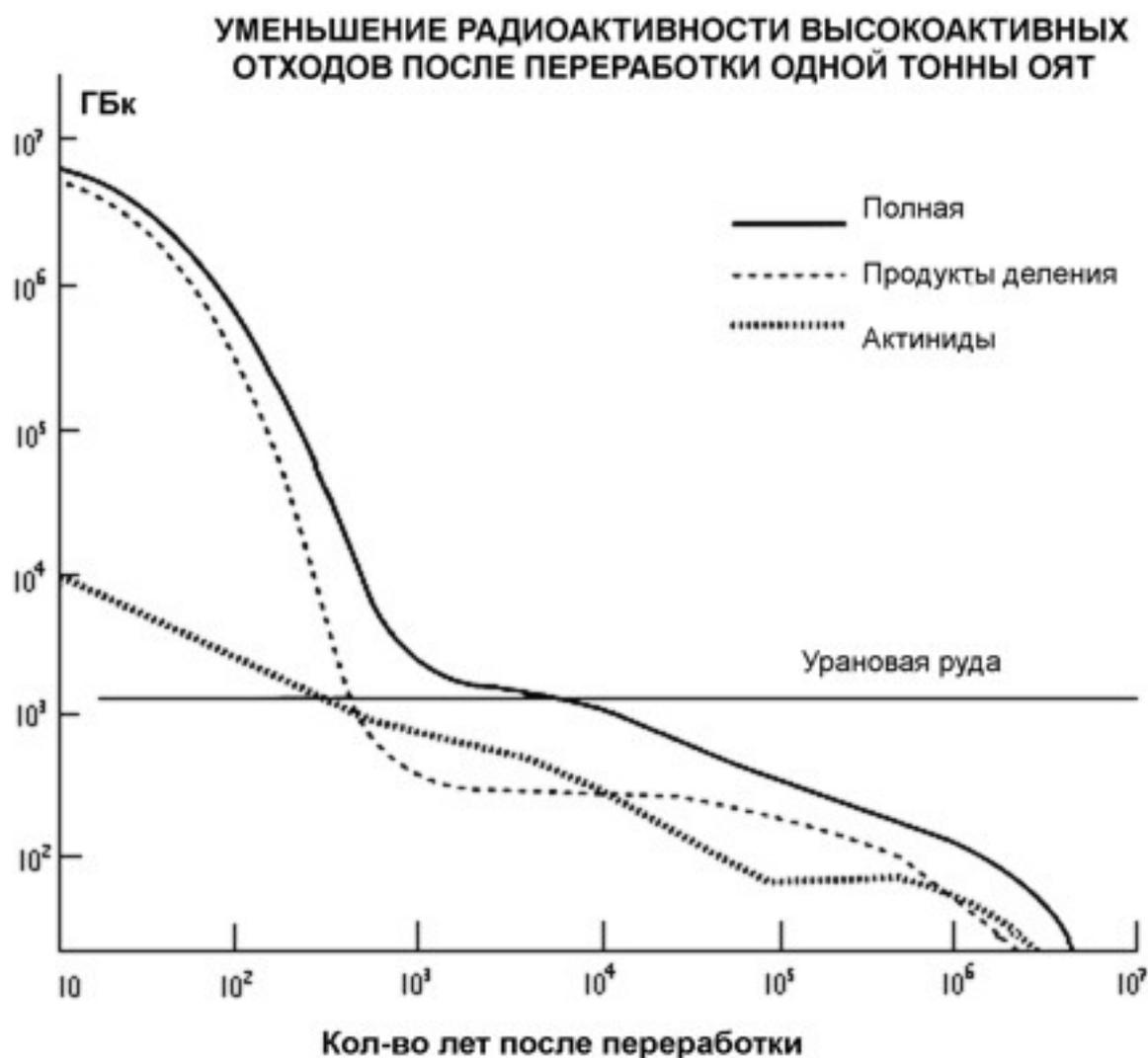


Рисунок 16В

Радиоактивность высокоактивных отходов, выделенных из одной тонны ядерного топлива PWR реактора (приведено сравнение с активностью того количества руды из которого эта тонна топлива была получена)

В США все отработанное топливо хранится в месте расположения реактора и в настоящее время это является частью топливного цикла. В дальнейшем отработанное топливо перемещают из бассейнов выдержки или сухих хранилищ на государственные склады промежуточного хранения. Здесь отработанное топливо ожидает своего окончательного захоронения. Заказчики этих операций по хранению и размещению отработанного топлива оплачивают дополнительно, примерно, 0.1 цента за киловатт час затраченной электроэнергии на эти процедуры. К концу 1999 года эти расходы составили почти 16 миллиардов долларов США.

5.5 Размещение и хранение остеклованных отходов

Независимо от того остеклованы ли высокоактивные отходы после переработки или они находятся в отработанных топливных сборках, с ними, в конечном счете, необходимо распорядиться самым безопасным образом. В дополнение к концепциям безопасности, применяемым к ядерному топливному циклу, это означает, что после захоронения отходы не должны подвергаться каким-либо дополнительным процедурам. Хотя конечное размещение высокоактивных отходов не будет производиться еще в течение нескольких ближайших лет, но все приготовления уже сделаны с учетом природных условий хранения и количества таких отходов.

Комитет по управлению радиоактивными отходами при Агентстве по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (ОЕСД) указал принципы геологического размещения радиоактивных отходов исходя из экологических и этических перспектив. При этом особенно подчеркивались интересы последующих поколений. В 1995 году Комитет установил *"что геологическая стратегия размещения отходов должна разрабатываться и осуществляться с учетом фундаментальных этических и экологических аспектов"*, и состоит в том, чтобы:

... "сбалансировано учитывая экологические и этические принципы, продолжать разработку геологических хранилищ для долгоживущих радиоактивных отходов, которые должны быть изолированы от биосферы в течение более нескольких сот лет", и

... постепенная "реализация схем геологического размещения отходов давала возможность их адаптации, в свете научного прогресса и развития социальной терпимости, в течение нескольких десятилетий, и не исключала бы возможности применения иных технологий, которые могли бы появиться на более поздних стадиях".

Конечное размещение высокоактивных отходов должно осуществляться с очень высокими гарантиями безопасности. Вопрос в том, насколько мы можем быть уверены в долговременной безопасности, до того как это не предпринято в больших масштабах? Очевидно, что высокий уровень доверия может быть достигнут на основе продолжения тщательных научных и проектных исследований, которые осуществляются в настоящее время. Решаемые задачи при этом не являются ни очень большими, ни исключительно сложными.

Во-первых, выделенные радиоактивные отходы (или отработанное ядерное топливо) находятся в устойчивой и нерастворимой форме. Во-вторых, они помещаются в массивные сосуды, изготовленные из нержавеющей стали, или коррозионно-стойкие резервуары (например, стальные или медные). В-третьих, они геологически изолируются.

Степень опасности иллюстрируется на Рисунке 16В (подобная картина имеет место и для отработанного ядерного топлива). Из приведенных данных можно сделать два важных вывода. Первый состоит в том, что степень радиационной опасности уменьшается в тысячу раз за период времени от 10 до 1000 лет, с относительно небольшим последующим изменением. Это связано с тем, что почти все короткоживущие продукты

деления распадаются за это время до незначительных концентраций.

Их концентрация становится меньше малых количеств очень тяжелых "трансурановых" элементов типа америция и нептуния, которые имеют намного большие периоды полураспада. Хотя промежуток времени в тысячу лет достаточно велик с точки зрения человеческой жизни, тем не менее, размещение таких материалов должно осуществляться в устойчивых геологических формированиях, где геологическое время становится более значимым фактором. Даже время, необходимое для распада плутония, мало по сравнению с геологическими масштабами времени.

Второй важный вывод, который следует из Рисунка 16В, состоит в том, что относительная радиоактивность отходов по прошествию 1000 лет является почти такой же, как и активность соответствующего количества урановой руды. При этом, токсичные компоненты урановой руды, выходя на поверхность земли, попадают в человеческий организм через пищевые цепочки. Остеклованные же отходы, которые хранятся глубоко под землей (до километра ниже уровня моря), в устойчивых геологических образованиях, не имеют никакого мыслимого шанса попасть в организм человека. (Это, однако, не означает, что поверхностные залежи урана опасны, поскольку количества, которые попадают в наш организм, очень малы.)

Большинство стран, имеющих собственные ядерные программы, осуществляют активную работу, нацеленную на поиск и исследование соответствующих мест для размещения отходов. Цель этой работы состоит в том, чтобы найти такие места размещения, которые имели бы множество барьеров до среды обитания человека. Некоторые из барьеров, как естественные, так и искусственные, состоят в следующем:

- Нерастворимая форма отходов (стекло, "синрок" или UO_2 , см. 5.3 и 5.4).
- Герметичное хранение в коррозионно-стойких емкостях.
- Бетонирование отходов для исключения воздействия на них грунтовых вод и возможных разрушений при подвижках земной коры.
- Размещение глубоко под землей (на глубине более 500 метров) в стабильных геологических структурах.

Для возможного размещения отходов широко изучаются два типа геологических пород - твердые кристаллические скальные породы и залежи каменной соли. Такие места имеются в нескольких странах, и в настоящее время осуществляется их детальная оценка. Большинство подходов предполагают использование обычной горнодобывающей техники для строительства соответствующих подземных шахт. Они должны иметь достаточно площади для размещения резервуаров в отделенных друг от друга полостях на различных уровнях или каким-либо иным способом. Одно из таких глубоких подземных хранилищ действует в США, но оно предназначено для хранения долгоживущих отходов военной промышленности.

Задачи, которые решаются для выполнения такой работы, по существу технические. Существующая техника в горнодобывающей промышленности, методы инженерного проектирования вместе с контролем температурных режимов и напряжений грунта, обеспечивают выполнение подобных работ с очень высоким качеством, обеспечивающим требуемый уровень безопасности. Кроме того, инженерные и организационные задачи обеспечения эффективной изоляции опасных материалов не являются новыми.

Вопрос геологической стабильности земных пород очень важен для обеспечения долгосрочной целостности хранилища отходов. На земном шаре имеется множество

геологических структур, которые устойчивы уже на протяжении более 4,5 миллиардов лет, и вероятность существенных смещений пород в течение периода хранения (а это более тысячи лет) в таких местах близка к нулю.

Хотя и предполагается, что глубокое геологическое размещение отходов атомной промышленности будет постоянным, тем не менее, при возникновении необходимости их восстановления и использования будущими поколениями нет принципиальных проблем для того, чтобы сделать это возможным.

Уместно сравнить токсичность отходов атомной промышленности с ядовитыми отходами и газами, возникающими на современных индустриальных предприятиях каждый день. Мышьяк, например, обычно распределяется в окружающей среде в составе гербицидов и в обработанной древесине. В отличие от отходов атомной промышленности он имеет бесконечный срок токсичности. Далее, барий и хлор, который достаточно широко используется. Учитывая их реальные количества, можно утверждать, что они представляют гораздо большую опасность, чем отходы атомной промышленности.

Можно утверждать, что придет время, когда хранение высокоактивных отходов будет совершенно безопасным. Радиоактивные отходы, хотя и очень токсичны в момент своего появления, но, во-первых, их количество мало, а во-вторых, они не более опасны, чем другие, более знакомые нам, материалы. Но несмотря на это, они породили синдром современного общества "где угодно, но только не у меня во дворе". Мы с легкостью принимаем экономическую выгоду и пользу от современных технологий, но при этом предпочитаем чтобы кто-то другой имел дело с сопутствующими отходами, пусть даже и безопасными.

Хотя сегодня каждая страна ответственна за хранение и переработку своих собственных отходов всех видов, тем не менее, рассматривается возможность создания международного хранилища отходов атомной промышленности. Австралия - это одна из немногих стран, в которой существуют очень благоприятные геологические условия для создания такого предприятия.

Природный аналог: Окло

Хотя высокоактивные отходы современной ядерной энергетики еще не хранились настолько долго, чтобы наблюдать результаты такого хранения, этот процесс фактически уже происходил в естественных условиях, по крайней мере, в одном месте на земном шаре. В местечке Окло в Габоне (на западе Африки), около двух миллиардов лет назад, по крайней мере, 17 естественных ядерных реакторов начали работать в богатой залежами урановой руды местности. Каждый из них имел, приблизительно, по 20 кВт тепловой мощности. В то время концентрация U-235 в естественном уране составляла, примерно, 3.7 процента (вместо 0.7 процентов сегодня)*.

*U-235 распадается намного быстрее чем U-238, период полураспада которого, примерно, такой же, как и возраст нашей планеты.

Естественные цепные реакции, которые начались спонтанно благодаря присутствию воды, действующей как замедлитель, продолжались, приблизительно, два миллиона лет пока, наконец, не затухли. В течение этого времени в руде образовалось, приблизительно, 5.4 тонн продуктов деления, а также 1.5 тонны плутония вместе с другими трансурановыми элементами.

Радиоактивные продукты деления давно распались и превратились в стабильные элементы, а детальное изучение их количества и локализации показало, что имелось

небольшое перемещение радиоактивных отходов, как в процессе, так и после прекращения ядерных реакций. Плутоний же и другие трансурановые элементы остались неподвижны. Это примечательно ввиду того, что грунтовые воды имели полный доступ к продуктам деления, а сами они не находились в химически инертной форме (т.е., говоря современным языком, не были остеклованы). Таким образом, продукты деления не перемещаются свободно в земной поверхности, даже в присутствии воды, из-за их адсорбции в глиняных породах.**

** Утечки из емкостей для хранения военных отходов в США также продемонстрировали способность глинистых почв к удержанию продуктов деления и трансурановых элементов.

Таким образом, единственное известное "испытание" подземного хранилища отходов атомной промышленности в Окло оказалось успешным, несмотря на неблагоприятные характеристики этого места. Хотя глинистые почвы и играют важную роль в удержании отходов, такое затопленное, с песчаной структурой грунта место, даже не рассматривалось бы для размещения на нем современного хранилища каких-либо токсичных и, тем более, ядерных отходов.

Однако, пример Окло побудил ученых более детально изучать поведение двуокиси урана в грунтовых водах вместе с другими химическими элементами, присутствующими в руде (которые не подвергаются расщеплению). Эти исследования помогут в оценке длительной безопасности хранилищ для высокоактивных отходов. Аналогичные исследования проводятся вблизи залежей в Кунгарра (на севере Австралии).

Стоимость

Наконец, важный вопрос о стоимости. Организация экономического сотрудничества и развития опубликовала оценки затрат на размещение и хранение отходов с использованием известных технологий, описанных выше. Согласно этим оценкам стоимость размещения и хранения отходов, вероятно, будет составлять от 0.03 до 0.17 центов за произведенный киловатт час электроэнергии для остеклованных высокоактивных отходов и от 0.04 до 0.18 центов для отработанного топлива (в ценах 1993 года). В США суммарные расходы (0.1 цента за киловатт час) на финансирование хранения отработанного топлива составили на конец 1999 года 16 миллиардов долларов США. Канадские производители собирают плату на будущее финансирование хранения отработанного топлива из расчета, приблизительно, 0.1 центов за киловатт час, и в 1997 году этот фонд составил 1.25 миллиардов канадских долларов. В Швеции это налог составляет, приблизительно, 0.3 центов за киловатт час, и идет на финансирование нормально функционирующего государственного хранилища радиоактивных отходов, и исследования в этой области.

В заключении можно с очевидностью отметить, что безопасное хранение радиоактивных отходов - это существующая норма, что технологии хранения хорошо разработаны, что затраты приемлемы и что полномасштабная демонстрация этого вскоре будет возможна в нескольких странах.

5.6 Снимаемые с эксплуатации реакторы

Пока только более 300 ядерных реакторов были сняты с эксплуатации, включая около 80 гражданских энергетических реакторов. В недавние годы были закрыты лишь некоторые из больших реакторов, и только малые и средние реакторы (с

мощностью до 330 МВт) были полностью уничтожены с использованием специального оборудования с дистанционным управлением. Отдельные их части были размещены на хранение вместе с другими отходами среднего уровня активности.

Международное агентство по атомной энергии выделяет три подхода при снятии реакторов с эксплуатации, которые приняты во всем мире:

- **Немедленный демонтаж (в США называют "Decon"):** так называют мероприятия, которые следуют непосредственно после прекращения работы реактора. Обычно, дезактивация и демонтаж оборудования начинаются после нескольких месяцев или лет, в зависимости от типа оборудования. В последующем территория расположения атомной станции становится снова доступна для повторного использования.
- **Безопасная консервация (или "Safestor"):** предполагает, что до окончательного демонтажа оборудования должен пройти значительно больший период времени, обычно от 40 до 60 лет. Оборудование при этом находится в условиях безопасной консервации.
- **Захоронение:** означает, что демонтированное оборудование размещают на неограниченное специальное хранение, которое полностью исключает возможность утечек радиоактивности. При этом материалы, содержащие радиоактивные элементы, минимизируются в объеме и размещаются в бетонных структурах, исключающих какое либо попадание радиоактивности в окружающую среду.

Нет никаких критериев, по которым можно было бы отдать предпочтение какому-либо из этих подходов: каждый из них имеет свои выгоды и неудобства. В конечном счете, национальная политика государства определяет, какому подходу следовать. В случае немедленного демонтажа ответственность за последствия снятия с эксплуатации реакторов не перекладывается на плечи будущих поколений. Более того, в течение снятия с эксплуатации может использоваться опыт и навыки действующего штата станции. С другой стороны, безопасная консервация (или "Safestor") позволяет существенно уменьшить уровень остаточной радиоактивности и, таким образом, снизить радиационную опасность при процедурах демонтажа оборудования. Новые будущие технологии, несомненно, будут способствовать не только уменьшению рисков, но и стоимости проводимых работ.

Приблизительно 99 % радиоактивности в выработавшем свой ресурс ядерном реакторе, находится в отработанном топливе, которое удаляется на первой стадии. Наряду с возможными радиоактивными загрязнениями оборудования, имеется также наведенная активность, обусловленная воздействием нейтронных потоков на стальные конструкции реактора. В них появляются различные радиоактивные изотопы, такие как железо-55, кобальт-60, никель-63 и углерод-14. Первые два из них достаточно радиоактивны и их распад сопровождается испусканием гамма-излучения. Однако, период полураспада этих изотопов таков, что по прошествию 50 лет после завершения работы реактора, их радиоактивность уменьшается до безопасного уровня. В целом, через 100 лет после завершения работы реактора, уровень радиоактивности уменьшается в 100000 раз.

Для снятия с эксплуатации реакторов с газовым охлаждением на атомных станциях в Шиньоне, Багги и Сен-Лоране, Франция осуществляет частичный демонтаж на второй стадии, а окончательный (на третьей стадии) будет произведен через 50 лет. Поскольку в местах их размещения продолжают функционировать другие реакторы, то контроль над

состоянием оборудования не увеличивает стоимости производимых работ.

Германия выбрала более быстрый способ прямого демонтажа для закрытия атомной электростанции в Грейфсвальд (бывшая Восточная Германия), на которой эксплуатировались пять реакторов. Аналогичным образом территория расположения атомной электростанции мощностью 100 МВт в Баварии была обещана в середине 1995 года для передачи в неограниченное сельскохозяйственное использование. Последующее удаление всех ядерных систем, систем радиационной защиты и некоторых материалов, содержащих наведенную активность, показало, что радиоактивность оставшихся объектов не превысило установленных пределов, и правительство одобрило окончательный демонтаж и очистку территории.

США имеют различный опыт в этой области. Четырнадцать энергетических реакторов снимаются с эксплуатации по схеме "Safstor", в то время как еще шесть демонтируются по принципу "Decon". Все выполняемые при этом процедуры установлены Комиссией по ядерному регулированию США.

Для реактора в Трое (1180 МВт, PWR), процедуры "Safstor" были объединены с промежуточным демонтажем, но временной масштаб работ, тем не менее, не изменился и все задачи были выполнены непосредственно переработчиками. Атомная станция была закрыта в 1993 году, а в 1995 году были удалены парогенераторы и размещены на хранение в Хенфорде. Затем, в 1999 году туда же был доставлен на хранение и демонтированный корпус реактора. Со всех строений удаляются возможные загрязнения, но полная очистка территории не планируется вплоть до 2018 года.

На атомных электростанциях, содержащих несколько энергоблоков, после консервации первого энергоблока, остальные продолжают работать до полной выработки своего ресурса, и последовательно снимаются с эксплуатации. Это оптимизирует использование как человеческих, так и технических ресурсов, задействованных в демонтаже оборудования, и таким образом, дает некоторую экономию в затратах.

Так, после комплексных мероприятий на втором аварийном энергоблоке (1979 год) атомной электростанции Три Майл Айленд, потребовавших 14 лет и включивших в себя выгрузку топлива, демонтаж разрушенных конструкций и т.д., он был законсервирован до 2014 года, т.е. до истечения срока действия лицензии на эксплуатацию первого энергоблока. По истечению этого времени оба блока будут сняты с эксплуатации. Аналогичные процедуры были осуществлены на первом энергоблоке атомной электростанции Сан-Онофр, который был остановлен в 1992 году до истечения срока лицензии на работу второго и третьего энергоблоков в 2013 году. Но после решения Комиссии по ядерному регулированию демонтаж начался в 1999 году.

Процедуры по схеме "Decon" были применены к реактору в Шипингпорте мощностью 60 МВт, который успешно проработал с 1957 по 1982 год. Пример этого реактора продемонстрировал возможность безопасного и рентабельного демонтажа атомной электростанции промышленного масштаба и быстрой реабилитации территории. Демонтаж был закончен в течение двух лет, а пять лет спустя, в 1989 году, было разрешено использовать территорию без каких-либо ограничений. Из-за небольших размеров реактора, его корпус мог быть удален без дополнительного расчленения, чего нельзя сделать для больших энергоблоков.

По ускоренной схеме "Decon" также снимался с эксплуатации высокотемпературный реактор с газовым охлаждением в Форте Сан-Врэйн мощностью 330 МВт, который был закрыт в 1989 году. Стоимость контракта по снятию с эксплуатации этого реактора составила 195 миллионов долларов США, что, несмотря на малый срок службы реактора, составляет менее одного цента на киловатт час

выработанной электроэнергии. Проект был завершен в соответствии с планом реабилитации территории в 1997 году. Это был первый большой энергетический реактор в США, который был снят с эксплуатации в такие сроки.

Общая стоимость операций по снятию с эксплуатации реакторов зависит от последовательности и длительности различных стадий программы. Так, отсрочка в выполнении какой-либо стадии приводит, с одной стороны, к уменьшению стоимости, что связано с уменьшающимся уровнем радиоактивности, но с другой - к увеличению затрат на хранение и контроль за состоянием оборудования.

Даже учитывая неопределенность в оценках стоимости, можно утверждать, что затраты по снятию реакторов с эксплуатации составляют менее 5% от затрат на производство электроэнергии. В США, например, накопленный опыт по проведению таких работ позволил снизить затраты на их выполнение, и по современным оценкам они составляют в среднем 325 миллионов долларов на реактор. Методы финансирования также различны в разных странах. Наиболее общими являются:

- **Предварительная оплата**, при которой резервируются соответствующие суммы на специальных счетах еще до начала эксплуатации реактора, и они могут использоваться только для целей снятия реакторов с эксплуатации.
- **Налог на использование ядерной энергии**, использование которого позволяет накопить соответствующие суммы путем сборов с потребителей электроэнергии. Доходы от сборов находятся в специальном трастовом фонде. Такая система действует в США, которая позволяет в течение срока функционирования реакторов накопить достаточные средства для покрытия расходов по снятию их с эксплуатации.
- **Гарантии или страхование**, которые в любом случае обеспечивают переобработчикам покрытие их расходов на снятие реакторов с эксплуатации.

Для финансирования процедур по снятию реакторов с эксплуатации в США взимается налог на использование ядерной энергии, который составляет от 0.1 до 0.2 центов за киловатт час электроэнергии. За состоянием соответствующих фондов регулярно следит Комиссия по ядерному регулированию. В 1998 году эти фонды составили 22.5 миллиардов долларов США.

ГЛАВА 6

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА, ЗДОРОВЬЕ И ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

6.1 Влияние на окружающую среду

Производство электроэнергии с помощью любых форм исходного топлива всегда оказывает влияние на окружающую среду. Объективная оценка ядерной энергетики в этом ключе требует сравнения ее влияния на окружающую среду с главной альтернативой - угольной энергетикой.

В уранодобывающей промышленности существующие технологии обычно

гарантируют, что не происходит никакого существенного загрязнения водных и воздушных бассейнов (см. 4.1). Влияние угледобывающей промышленности на окружающую среду сегодня также мало, за исключением того, что большие ресурсы необходимы для реабилитации территорий и создания противокислотных дренажных систем.

Малые количества **радиоактивности** выбрасывают в атмосферу как угольные, так и атомные электростанции. При сгорании угля наличие в нем малых количеств урана, радия и тория приводят к тому, что уровень радиоактивности зольной пыли значительно повышается. Атомные электростанции и заводы по переработке ядерного топлива выделяют малые количества радиоактивных газов (например, криптон -85 и ксенон -133) и изотопы иода -131, которые могут быть обнаружены в окружающей среде с помощью специального аналитического оборудования. Сегодня предпринимаются всесторонние меры по уменьшению выбросов зольной пыли от угольных электростанций и радионуклидов от атомных электростанций. В настоящее время эти факторы уже не представляют существенную проблему для охраны окружающей среды.

Как отмечалось в Разделах 5.3-5.5, накопленные твердые высокоуровневые отходы атомных электростанций хранятся уже в течение 40-50 лет, а их радиоактивность уменьшилась всего менее чем на один процент от ее первоначального уровня. Поэтому их надлежит надежно хранить, изолируя от биосферы. Отходы промежуточного уровня помещают в подземные хранилища. Отходы низкого уровня вообще хранятся более традиционно. Радиоактивная зольная пыль от угольных электростанций в прошлом оказывала намного большее воздействие на окружающую среду, потому что это воздействие не воспринималось как угроза природе и соответствующие действия не предпринимались. Места, где сегодня такие отходы хранятся, должны находиться под постоянным контролем.

Тепловое воздействие на окружающую среду связано с неизбежными потерями при производстве электроэнергии и, примерно, одинаково как для угольных, так и атомных электростанций. Тепловой к.п.д. угольных электростанций колеблется от 20 до 40 %. Более новые электростанции имеют к.п.д., обычно, не ниже 32 %. Для атомных электростанций, использующих легко водные реакторы, к.п.д. колеблется от 29 до 38 % и для большинства электростанций сегодня равен, приблизительно, 34 %. Поэтому при существующем уровне запросов на электроэнергию не имеется никаких причин для предпочтения одного топлива другому (уран или уголь) по критерию эффективности использования тепла. Это касается как электростанций, охлаждаемых проточной водой, так и использующих атмосферные градирни. В любом случае теряемое тепло не должно быть "ненужным". В более холодных климатических зонах его используют для централизованного теплоснабжения и для сельскохозяйственных нужд. Это уменьшает выпадение локальных туманов, вызываемых температурными перепадами в окружающей среде.

Главную проблему для охраны окружающей среды, связанную с производством электроэнергии на угольных электростанциях, создают выбросы углекислого газа (CO_2) и двуокиси серы (SO_2). Когда используется уголь, содержащий 2.5 % серы, для обеспечения электроэнергией одного человека в Европе (или Японии) в течение года, то в атмосферу выбрасывается, приблизительно, 8 тонн CO_2 и 100 кг SO_2 . Выбросы CO_2 также происходят при сгорании и других видов органического топлива (нефти или газа).

Двуокись серы, выброшенная в атмосферу в больших количествах, может стать

причиной "кислотных дождей" в подветренных областях. В северном полушарии десятки миллионов тонн SO_2 выбрасывается ежегодно в атмосферу при производстве электроэнергии, хотя такое загрязнение постепенно уменьшается. Кислотные дожди (т.е. при которых дождевая вода имеет $\text{pH} = 4$ и меньше) в северо-восточных областях США и в Скандинавии причиняют значительный экологический и экономический ущерб. В Великобритании и США впервые начали минимизировать эти выбросы путем увеличения использования нефти с меньшим содержанием серы, или природного газа. Однако, такая стратегия порождает новые проблемы, связанные с необходимостью транспортировки больших количеств нефти и газа до потребителей.

В принципе, существует техническая возможность значительного сокращения содержания SO_2 в угольных дымовых газах, но стоимость таких технологий сегодня достаточно высока. Производители электроэнергии в США, тем не менее, тратят на это миллиарды долларов. С другой стороны, с 1980 года по 1986 год выбросы SO_2 во Франции были значительно уменьшены (более чем в два раза) замещением органического топлива на урановое. В то же самое время производство электроэнергии увеличилось на 40 %, и Франция стала крупным экспортером электроэнергии.

Оксиды азота (NO_x), выбрасываемые электростанциями, работающими на органическом топливе, также представляют опасность для окружающей среды. Если в атмосфере присутствуют высокие уровни углеводородов, то окислы азота вступают с ними в реакцию и образуют, так называемый фотохимический смог (дым с примесью тумана). Оксиды азота также оказывают неблагоприятное воздействие на озоновый слой земли, что способствует значительному увеличению количества ультрафиолетовых лучей, достигающих ее поверхности.

6.2 Парниковый эффект

Этим термином называют способность некоторых газов, присутствующих в земной атмосфере, задерживать инфракрасное излучение (т.е. теплоту) вблизи поверхности земли. Накопление "парниковых газов", особенно CO_2 , в земной атмосфере приводит к потеплению климата во многих частях мира. Если этот процесс не остановить, то его продолжение может, в конечном счете, привести к глобальным климатическим изменениям на всей земле. Считается, что именно двуокись углерода оказывает основное влияние на парниковый эффект*.

*Содержание CO_2 в атмосфере оставляет лишь 0.035 % (350 ppm). С начала индустриальной революции произошло его увеличение от 280 до 350 ppm.

Несмотря на то, что в понимании происходящих процессов достигнут определенный прогресс, ученые до сих пор не знают, какое количество **углекислого газа** может абсорбировать окружающая среда, и каким образом поддерживается глобальный баланс CO_2 в атмосфере. Однако, ученые с обеспокоенностью фиксируют постепенное увеличение содержания CO_2 в атмосфере. Это обусловлено, в частности, сжиганием углеродосодержащего органического топлива, в процессе которого углерод быстро преобразуется в атмосферный CO_2 . Такие процессы происходят, например, в автомобильных двигателях внутреннего сгорания, различных индустриальных печах, и при производстве электроэнергии. Постоянная вырубка лесов также вносит вклад в парниковый эффект, поскольку уменьшает поглощение атмосферного CO_2 в процессе фотосинтеза.

Уже в 1977 в отчете Национальной Академии Наук США отмечалось, что "основным ограничивающим фактором на производство энергии с помощью органического топлива в следующих столетиях может оказаться климатическое воздействие от выбросов углекислого газа". Сегодня это уже общепринятая точка зрения. *Глобальный климатический эффект от увеличивающегося содержания CO₂ в атмосфере является сегодня наиболее существенным отличием угольной и атомной электроэнергетики в воздействии на окружающую среду* (см. Рисунок 17).

Глобальные выбросы CO₂ от сжигания органического топлива составляют, приблизительно, 25 миллиардов тонн в год. Из них, примерно, 45 % от сжигания угля и 40 % от нефти. Каждая электростанция мощностью 1000 МВт, работающая на каменном угле, выбрасывает в атмосферу, приблизительно, 7 миллионов тонн CO₂ в год. Если используется бурый уголь, то количество выбросов намного большее. При использовании ядерных реакторов таких выбросов в атмосферу не происходит вообще.

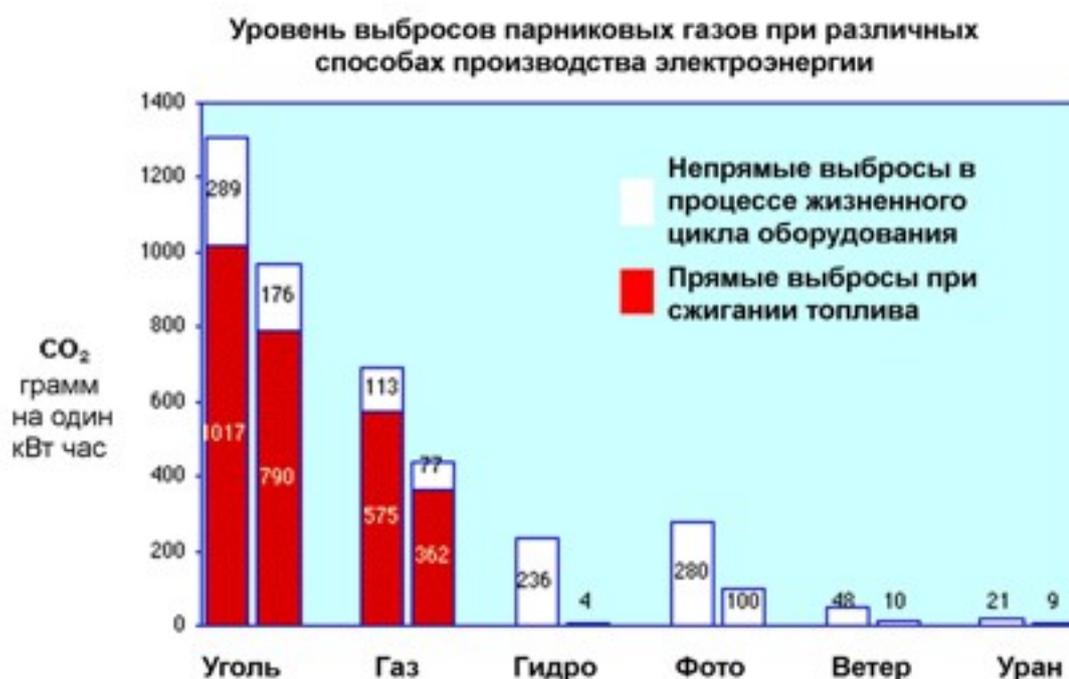


Рисунок 17

Каждые 22 тонны урана, используемые в легко водном реакторе (или 26 т U₃O₈), предотвращают выброс, приблизительно, одного миллиона тонн CO₂.

Поэтому для базисного производства электроэнергии более широкое использование уранового топлива является очевидным (см. также Рисунок 17).

На сегодняшний день имеются международные соглашения, определяющие такую стратегию использования энергетических ресурсов, которая минимизирует выбросы в атмосферу CO₂. Энергосберегающие технологии вряд ли будут столь же эффективны в следующих десятилетиях, как это было, начиная с середины 1970-ых годов, потому что их возможности уже практически исчерпаны.

6.3 Излучение и здоровье

Отметим, что для оценки рисков и влияния на здоровье населения необходимо сопоставить ядерную энергетику с главным альтернативным источником энергии - угольной электроэнергетикой. При этом наряду с экологическими аспектами необходимо также оценить и профессиональные риски.

Традиционно **профессиональные** риски оцениваются на основе коэффициентов смертности при различных инцидентах. Однако сегодня, особенно это касается ядерной энергетики, акцент смещается на анализ менее очевидных и отдаленных последствий воздействия излучения, вызывающих раковые заболевания.

За последние 40 лет накоплен большой статистический материал о различных инцидентах на ядерных реакторах США и Великобритании. Эти данные можно сравнить с аналогичными для угольных электростанций. Сравнение с очевидностью показывает, что ядерная энергетика является в этом аспекте более надежным способом производства электроэнергии. Некоторые данные показаны в Таблицах 12 и 12А. Основная причина неблагоприятных данных для угольной энергетики состоит в том, что для обеспечения работы даже одной электростанции необходимо добыть, обработать и транспортировать огромное количество угля. Горнодобывающая промышленность и обработка такого большого количества сырья значительно увеличивает степень опасности производства, что и отражено в статистике.

Таблица 12

Статистик инцидентов при базовом производстве электроэнергии

Топливо	Количество несчастных случаев за 1970-92 годы	Пострадавшие	Коэффициент смертности на 1 ГВт год произведенной электроэнергии
Уголь	6400	Рабочие	0.32
Природный газ	1200	Рабочие и население	0.09
Гидро	4000	Население	0.80
Ядро	31	Рабочие	0.01

Таблица 12А

Некоторые инциденты, связанные с производством энергии начиная с 1977 года

Место	Год	Число погибших	Событие
Донбасс, Украина	1980	68	Взрыв метана в угольной шахте
Кузбасс, Сибирь	1982	39	Взрыв метана в угольной шахте
Мехико	1984	500 +	Взрыв на трубопроводе
Италия	1985	250	Прорыв дамбы
Чернобыль, Украина	1986	31 +	Авария на ядерном реакторе
Северное Море	1988	167	Взрыв на нефтяной платформе
Уфа, Сибирь	1989	600	Прорыв трубопровода и пожар
Турция	1992	270	Взрыв метана в угольной шахте
Египет	1994	460	Удар молнии в склад топлива

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

Таегю, Южная Корея	1995	100 +	Взрыв газа
Хиньян, Китай	1996	84	Взрыв метана в угольной шахте
Дайтонг, Китай	1996	114	Взрыв метана в угольной шахте
Хиньян, Китай	1997	89	Взрыв метана в угольной шахте
Фашюнь, Китай	1997	68	Взрыв метана угольной шахты
Кузбасс, Сибирь	1997	67	Взрыв метана в угольной шахте
Хуайнянь, Китай	1997	89	Взрыв метана в угольной шахте
Хуайнянь, Китай	1997	45	Взрыв метана в угольной шахте
Шанхай, Китай	1997	28	Взрыв метана в угольной шахте
Гуйжоу, Китай	1997	43	Взрыв метана в угольной шахте
Донбасс, Украина	1998	63	Взрыв метана в угольной шахте
Лианонинг, Китай	1998	71	Взрыв метана в угольной шахте
Уарри, Нигерия	1998	500 +	Прорыв нефтепровода и пожар
Донбасс, Украина	1999	50 +	Взрыв метана в угольной шахте
Донбасс, Украина	2000	80	Взрыв метана в угольной шахте
Шанхай, Китай	2000	40	Взрыв метана угольной шахты
Юньян, Китай	2000	13	Взрыв метана в угольной шахте
В Австралии:			
Аппин	1979	14	Взрыв метана в угольной шахте
Моура	1986	12	Взрыв метана в угольной шахте
Моура	1994	11	Взрыв метана в угольной шахте

Количество смертных случаев на один миллион тонн добытого угля находится в диапазоне от 0.1 в год в Австралии и США до 119 в Турции. Полное количество погибших в Китае на предприятиях угольной промышленности составляет в среднем более чем 1000 человек в год; в Украине - более 200 человек в год (1999 - 274, 1998 - 360, 1995 - 339, 1992 - 459). В Австралии на шахтах с 1902 года погибло 281 человек в 18 инцидентах, хотя Австралийская угольная промышленность считается самой надежной в мире.

Риски в уранодобывающей промышленности подробно обсуждались в Разделе 4.1. Наиболее существенным эффектом здесь является облучение шахтеров газом радон, с последующей вероятностью возникновения рака легкого. Такое облучение практически исключено за последние более чем тридцать лет. Однако, присутствие некоторого количества радона в районах размещения предприятий уранодобывающей промышленности и некоторых продуктов радиоактивного распада, несет в себе некоторую опасность, как и вдыхание пыли в угольной шахте. В обоих случаях, использование современных технологий снижает уровень опасности для здоровья персонала до минимума, и риски от этих факторов намного меньше, чем от техногенных инцидентов.

На предприятиях ядерного топливного цикла, радиационная опасность для персонала сведена до минимума, а аварийные ситуации достаточно редки. Конечно, производство электроэнергии на атомных станциях не свободно от опасностей в профессиональном смысле, но в любом случае такой источник энергии более надежен, чем другие формы превращения энергии. Раковые заболевания не являются исключением и для персонала атомных станций, как и для людей не связанных профессионально с работой на атомных объектах. Это, однако, совершенно не означает, что они вызваны облучением. Проявление раковых заболеваний неоднородно среди населения земного шара, и из-за различных местных особенностей не так просто определить, действительно ли имеется прямая зависимость между низкими дозами профессионального облучения и возможными раковыми новообразованиями. Этот вопрос подробно исследовался во

множестве регионов, и работа в данном направлении продолжается постоянно. Пока никакого доказательства того, что раковые новообразования более часты среди персонала атомных станций, чем среди остального населения подобных возрастов, где смертность от этой болезни составляет 15-25 %, не появилось. При существующих низких уровнях облучения персонала ядерной промышленности, эффекты здесь скорее вероятные, чем измеримые.

Влияние на здоровье населения промышленных предприятий качественно не отличается от воздействия на персонал, хотя для большинства это обстоятельство более очевидно для воздействия ионизирующих излучений, чем каких-либо загрязняющих среду веществ. Наибольшее беспокойство вызывает, конечно, ионизирующее излучение. Поскольку оно всегда ассоциируется с прошлыми испытаниями ядерного оружия, то и порождает серьезные опасения относительно радиационной безопасности ядерной энергетики. К счастью, радиоактивность хорошо измерима. Ее влияние на человека известно и понятно по сравнению, например, со многими химическими веществами, вызывающими с течением времени раковые заболевания.

Существенное качественное различие между атмосферным воздействием угольной электроэнергетики и облучением, связанным с эксплуатацией атомных электростанций состоит в том, что человек, живущий рядом с атомной электростанцией, получает в течение года меньшее количество облучения, чем от нескольких часов полета на самолете (см. Таблицу 13), а угольные электростанции настолько ухудшают качество атмосферы, что это может оказать существенное влияние на здоровье населения. Кроме того, поскольку уголь содержит некоторое количество радия и тория, то угольные электростанции выбрасывают в атмосферу вместе с золой гораздо большее количество радиоактивности, чем любая атомная электростанция.

Таблица 13 иллюстрирует некоторые типичные значения доз облучения от различных **источников излучения**. Вклад в общее облучение от поверхности земли меняется в зависимости от географического расположения. В Канаде, например, диапазон доз меняется в среднем от 500 до 1100 микроЗивертов в год ($\mu\text{Зв}/\text{год}$). Вблизи Сиднея он колеблется от 160 до 900 $\mu\text{Зв}/\text{год}$, в Западной Австралии от 20 до 3000 $\mu\text{Зв}/\text{год}$. Граждане Корнуолла в Великобритании получают в среднем, приблизительно, 7000 $\mu\text{Зв}/\text{год}$. Доза космического излучения меняется в зависимости от высоты и широты. Экипажи самолетов могут получать до 5000 $\mu\text{Зв}/\text{год}$. А от предприятий атомной энергетики граждане Великобритании, например, получают приблизительно 0.3 $\mu\text{Зв}/\text{год}$.

Таблица 13

Ионизирующее излучение. Относительные вклады различных источников излучения.

Земная поверхность радиоактивна, и уровень ее радиоактивности постепенно снижается, поскольку распадаются долгоживущие изотопы. Этот радиоактивный распад и приводит к появлению ионизирующего излучения. Наряду с этим мы подвергаемся воздействию космического излучения. Вклад космического излучения тем больше, чем на большей высоте от уровня моря мы находимся. В дополнение к этим факторам, мы получаем некоторые дозы облучения от искусственных источников излучения (например, при рентгенографии легких). В организме взрослого человека содержится приблизительно 13 мг радиоактивного калия-40, поэтому мы даже облучаем друг друга на близких расстояниях!

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

Источники	μЗв/год	Диапазон
Естественные:		
Поверхность земли + радон в домах	200	200-100000
Поверхность земли + гамма-фон в домах	600	100-1000
Космос (на уровне моря)	300	
+20 на каждые 100 м над уровнем моря	0-500
Продовольствие, спиртные напитки и ткани человеческого тела	400	100-1000
ВСЕГО	1500 (плюс поправка на высоту над уровнем моря)	
Искусственные:		
От испытаний ядерного оружия	3	
Медицина	370	До 75000
От атомной энергетики	0.3	
От угольных электростанций	0.1	
От домашних приборов	0.4	
ВСЕГО	375	
Поведенческие:		
Лыжный спорт и отпуск в горах	8 в неделю	
Воздушное путешествие на самолете	1.5 - 5.0 в час	До 5000

Международная Комиссия по радиологической защите рекомендует в дополнение к природному фону, следующие пределы экспозиции:

Для населения, 1000 (то есть 1 тЗв/год)

Для персонала атомной промышленности 20000 (то есть 20 тЗв/год), усредненный более чем в течение 5 последовательных лет.

Меры по защите от облучения основаны на понимании того, что малое увеличение экспозиции по сравнению с естественным уровнем вряд ли нанесет вред здоровью, но, тем не менее, должно сводиться к минимуму. Международная Комиссия по радиологической защите (ICRP) установила стандарты, основанные на трех основных правилах:

- **Компенсация.** Никакая технология, связанная с радиацией, не должна приниматься к использованию, если она не приводит к преимуществам для персонала или населения.
- **Оптимизация.** Дозы облучения и риски должны быть настолько низкими, насколько это достижимо с учетом экономических и социальных факторов.
- **Ограничение.** Индивидуальные дозы облучения должны иметь ограничения, выше которых радиационный риск считается недопустимым.

Эти правила относятся как к возможным аварийным ситуациям, так и к

существующим условиям облучения.

Основой для этих рекомендаций является, так называемая, "линейная гипотеза", согласно которой любой уровень дозы облучения, независимо от того насколько он низок, приводит к риску для человеческого здоровья. Это предположение дает возможность определить "коэффициенты риска" путем исследования последствий облучения людей высокими дозами (например, после ядерной бомбардировки японских городов) и экстраполяции этих данных в диапазон низких доз. Однако научные исследования указывают на отсутствие какого-либо риска для здоровья при дозах облучения ниже 50 мЗв в год.

Основываясь на этих консервативных правилах, ICRP рекомендует, чтобы дополнительная доза выше естественного фона (исключая медицинскую экспозицию) была ограничена предписываемыми уровнями. А они сегодня таковы: один 1 мЗв в год для населения, и 20 мЗв в год в течение более чем 5 лет для персонала.

Фактический уровень индивидуального риска в соответствии с рекомендациями ICRP для населения очень мал и составляет, приблизительно, 1 летальный исход от ракового заболевания на 20000 человек. Тем не менее, влияние малых доз облучения на здоровье больших групп населения постоянно изучается радиобиологами и физиками. Так, в результате аварии на Чернобыльской АЭС (см. 6.5) большие группы населения подверглись радиоактивному облучению, фактические дозы которого приблизительно известны. Результаты изучения отдаленных последствий этой трагедии будут способствовать лучшему пониманию влияния малых доз облучения на здоровье, если таковое вообще имеет место. Сегодняшние знания относительно влияния излучения на здоровье людей получены в основном при исследовании последствий бомбардировок Хиросимы и Нагасаки в 1945 году, где полученные дозы было достаточно трудно оценить. Конечно, наблюдалось очевидное увеличение числа заболеваний некоторыми типами лейкемии, лимфомы, появления раковых новообразований среди оставшихся в живых.

Человеческий организм имеет защитные механизмы против повреждений, вызываемых ионизирующим излучением, также как против воздействия канцерогенных веществ. Однако, обычно организм имеет дело только с относительно небольшим количеством повреждений в каждый момент времени. У оставшиеся в живых после атомной бомбардировки японских городов было очень большое количество повреждений в организме сразу. Некоторые поправки на это обстоятельство делаются при определении профессиональных рисков. Но, тем не менее, сегодня степень защиты от малоинтенсивного излучения намного больше, чем требуют такие осторожные оценки.

Плутоний - предмет особого беспокойства. Как отмечалось в 5.2, плутоний образуется в результате ядерных реакций, накапливается в отработанном ядерном топливе и выделяется из него после специальной переработки. Плутоний является наиболее токсичным элементом, известным человечеству, и представляет большую опасность, которую надо избегать. Необходимо, однако, сравнить его токсичность с другими материалами, встречающимися в нашей жизни. Если плутоний попадает внутрь организма с пищей, то он менее токсичен, чем цианин или арсенид свинца и вдвое токсичен, чем концентрат кофеина из кофе. Его главная опасность проявляется при вдыхании вместе с мелкодисперсной пылью и последующим поглощением его в легких. Это увеличивает вероятность возникновения рака в 15 и более раз по прошествии нескольких лет. Имеются зарегистрированные документальные свидетельства несчастных случаев возникновения рака, инициированного влиянием плутония. За 30 лет после второй мировой войны около семи тонн плутония было рассеяно в верхних слоях атмосферы в

результате ядерных испытаний. Вредные побочные действия, тем не менее, зарегистрированы не были.

Влияние на людей радиации и канцерогенных веществ, вызывающих раковые заболевания, должны рассматриваться с точки зрения возникновения отдаленных отрицательных последствий. Мы должны быть обеспокоены не только влиянием этих факторов на людей, живущих сегодня, но и оценивать их кумулятивное воздействие на следующие поколения. Некоторые радиоактивные материалы распадаются быстро и становятся безопасными по истечению нескольких дней, недель или нескольких лет, другие же оказывают воздействие в течение долгого времени, также, как и некоторые химические вещества, вызывающие рак. Конечно, некоторые токсичные вещества, такие как тяжелые металлы типа ртути, кадмия или свинца, являются естественной частью нашей среды обитания, как и, впрочем, окружающее нас, ионизирующее излучение. Главная задача для руководителей государств и крупных компаний состоит в том, чтобы предотвратить накопление чрезмерных количеств таких токсинов, наносящих вред людям сегодня или в будущем. Решением такой задачи может стать принятие жестких стандартов на основе всестороннего изучения человека и окружающей его среды.

6.4 Генетические эффекты

Приблизительно шестьдесят лет тому назад было обнаружено, что ионизирующее излучение, которое постоянно присутствует в среде нашего обитания, может стимулировать генетические мутации. Интенсивное изучение показало, что излучение может стать причиной мутаций в растениях и подопытных животных. Однако, результаты экспериментальных исследований генетических повреждений в человеческом организме, вызванных ионизирующим излучением (даже в результате получения больших доз облучения, полученных, например, оставшимися в живых после атомной бомбардировки Японии), указывают на то, что **никаких эффектов мутаций у людей не возникает**.

В клетках растений и животных присутствует особый "строительный" материал (ДНК), который несет генетическую информацию, необходимую для деления и развития клетки, и является наиболее уязвимым при воздействии ионизирующего излучения. Многие из повреждений ДНК поддаются восстановлению, но в небольших количествах клеток структура ДНК меняется. Это может привести к гибели клетки или к развитию рака. При воздействии на клетки, формирующие ткани гонад, изменения, могут передаваться следующим поколениям в виде генетических мутаций. В своем большинстве такие мутационные изменения вредны, и лишь очень немногие могут оказаться полезными.

Уровни облучения, допустимые для населения и персонала в ядерной промышленности, сегодня таковы, что любые генетические последствия не наблюдаются и, скорее всего, они просто не существуют. Эти уровни определены таким образом, чтобы предотвратить повреждение тканей и минимизировать риск появления рака. Экспериментальные данные свидетельствуют, что такое воздействие более вероятно, чем возникновение генетических повреждений. Так, приблизительно 75000 новорожденных детей, родители которых пережили высокие дозы облучения в Хиросиме и Нагасаки в 1945 году, находились под тщательным медицинским контролем. Эти наблюдения подтвердили, что никакого увеличения генетических патологий в результате воздействия больших доз облучения не происходит.

Жизнь на земле зародилась и развивалась в условиях, когда окружающая среда была в несколько раз более радиоактивна, чем сейчас, и радиоактивность - не новое

явление. Если мы уверены, что сегодня нет никаких драматических последствий, вызванных фоновым облучением, то маловероятно, что генетические последствия, вызванные ионизирующим излучением, когда-либо в будущем станут существенными.

6.5 Безопасность реакторов

В настоящее время имеются обширные статистические данные, касающиеся безопасности ядерных установок. Однако, для большинства людей абсолютные характеристики более убедительны, чем малопонятная вероятностная статистика. ***В течение более чем 9500 реакторо-лет эксплуатации ядерных установок в мире зафиксирован лишь один серьезный инцидент, который, тем не менее, не связан с конструкционными особенностями реактора.*** И только этот, "самый тяжелый" сценарий аварии, привел к человеческим жертвам. Существенно, что вот уже четыре десятилетия ядерные технологии используются в 32 странах, а некоторые действующие сегодня реакторы были построены сорок лет тому назад. Однако, это не дает нам оснований для исключения возможности каких-либо аварий, даже при строгом выполнении всех технических стандартов.

Большинство сценариев развития аварийных ситуаций рассматривает, прежде всего, потерю охлаждения реактора. Это может приводить к расплавлению топлива в активной зоне ядерного реактора и выбросу в окружающую среду продуктов деления. Поэтому, обязательным является наличие резервных систем охлаждения реактора. В случае, если и они не срабатывают должным образом, в конструкции реакторов предусматривается система защитных барьеров, предотвращающих радиоактивное загрязнение среды. Как стало очевидно в 1986 году, не все из ранее разработанных в СССР реакторов имели такую "глубоко эшелонированную" защиту. Сегодня, приблизительно, одну четвертую часть стоимости реакторов составляют затраты на обеспечение систем безопасности, гарантирующих персонал и население от последствий различных нештатных ситуаций. В Таблице 14 показана международная шкала ядерных инцидентов.

Авария 1979 года на атомной электростанции Три Майл Айленд в США привлекла внимание к разработке систем, предотвращающих расплвление активной зоны реактора и предохраняющих реактор от сбоев в работе. Выброс радиоактивных веществ в атмосферу в результате этой аварии был мал, а максимальная доза, полученная населением, проживающим около электростанции, была значительно ниже установленных пределов, хотя реактор и был снят с эксплуатации. Этому способствовала, так называемая, гермооболочка (контэйнмент), внутри которой размещался сам реактор. Однако, эта авария произвела существенный общественный резонанс, нанесла серьезный удар по ядерной промышленности США и неблагоприятно сказалась на темпах роста ядерной энергетики в США и в мире.

Серьезная авария в Чернобыле в 1986 году стоила жизни 31 человек (персонал станции и пожарные), 28 из которых погибли в результате радиационного поражения от острой лучевой болезни. Позже было зарегистрировано около 800 случаев рака щитовидной железы у детей, большинство из которых были излечены, а приблизительно в десяти случаях был отмечен летальный исход. Никакого увеличения случаев лейкемии или появления раковых новообразований не было обнаружено в течение последующих десяти лет. Тем не менее, "Мировая организации здравоохранения" ожидает некоторого

увеличения раковых заболеваний в следующем десятилетии, и список жертв от отдаленных последствий на здоровье может увеличиться. В результате аварии около 130000 людей получили дозы облучения выше пределов, рекомендуемых ICRP, и их здоровье постоянно контролируется "Мировой организацией здравоохранения". Радиоактивные выбросы распространились по обширным областям Европы и Скандинавии, причинили ущерб сельскохозяйственным угодьям, увеличили дозовую нагрузку на большие группы населения.

Авария в Чернобыле привлекла общественное внимание к необходимости наличия на реакторных установках специальных гермооболочек, которыми снабжены реакторы в США и Европе. Кроме того, отказ охлаждающих систем в реакторах типа РБМК, которые установлены на Чернобыльской атомной электростанции (реактор большой мощности канальный), ведет к существенному увеличению вырабатываемой реактором мощности. В аварийных состояниях реакторы всех типов могут испытывать увеличение вырабатываемой мощности, которое регулируется системой останова реакции. Легководные реакторы, в которых хладагентом служит вода, автоматически теряют мощность при потере охлаждения, и затем могут быть остановлены с помощью управляющих стержней. В реакторах CANDU, с разделенным управлением и охлаждением, аналогичный уровень безопасности достигается наличием двух систем, которые функционально и физически независимы друг от друга. Одна из них состоит из поглощающих стержней, которые опускаются в активную зону, а вторая - из жидкого поглотителя нейтронов, который поступает в воду управляющего канала. Обе системы поглощают нейтроны и останавливают цепную реакцию деления.

Чернобыльская авария произошла из-за сочетания недоработок проекта и нарушений правил эксплуатации вследствие отсутствия культуры безопасности у персонала. После аварии были внесены существенные изменения в системы безопасности на 15 реакторах типа РБМК, эксплуатируемых в России, Украине и Литве и одном, находящимся в стадии строительства в России. Стандартные проекты российских реакторов сегодня обязательно содержат гермооболочку, аналогично реакторам типа PWR. Разрушенный же Чернобыльский реактор помещен в герметичный саркофаг. Другие три блока на этой атомной электростанции после аварии возобновили свою работу, но по решению правительства Украины в конце 2000 года Чернобыльская атомная электростанция была полностью снята с эксплуатации.

В отчете экспертов "Организации экономического сотрудничества и развития" относительно этой аварии говорится, что *"Чернобыльская авария не пролила свет на какие-либо новые, ранее неизвестные явления или проблемы безопасности, которые не решены или не охвачены текущими программами по безопасности коммерческих энергетических реакторов в государствах членах "Организации экономического сотрудничества и развития"*

Таблица 14
Международная шкала ядерных аварий

Степень и описание	Последствия вне площадки АЭС	Последствия на площадке АЭС	Примеры
7. Тяжелая авария	Сильный выброс: тяжелые последствия для здоровья населения и для	Максимальны; тяжелые повреждения активной зоны и	Чернобыль, СССР, 1986

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

	окружающей среды	физических барьеров	
6. Серьезная авария	Значительный выброс: требуется полномасштабное выполнение плановых мероприятий по восстановлению	Тяжелые повреждения активной зоны и физических барьеров	
5. Авария с рисками для окружающей среды	Ограниченный выброс: требуется частичное выполнение плановых мероприятий по восстановлению	Тяжелые повреждения активной зоны и физических барьеров	Windscale, Великобритания, 1957 (военный реактор); Три Майл Фйленд, США, 1979
4. Авария без значительных рисков для окружающей среды	Минимальный выброс: облучение населения в пределах допустимого	Серьезные повреждения активной зоны и физических барьеров; облучение персонала с летальным исходом	Saint-Laurent, Франция, 1980; Tokai-mura, Япония, 1999
3. Серьезный инцидент	Пренебрежимо малый выброс: облучение населения ниже допустимого предела	Серьезное распространение радиоактивности; облучение персонала с серьезными последствиями	Vandellos, Испания, 1989 (пожар, никакого радиоактивного загрязнения)
2. Инцидент	Ноль	Ноль	
1. Аномальная ситуация	Ноль	Ноль	
0. Событие с отклонением ниже шкалы	Ноль	Ноль	

История развития атомной энергетики знает множество аварийных ситуаций, происшедших на экспериментальных и военных реакторах, но ни один из этих случаев не привел к гибели людей, проживающих вблизи ядерного объекта, или к длительному загрязнению окружающей среды. Следующая таблица (Таблица 15) иллюстрирует некоторые серьезные аварии на реакторах. Все аварии, показанные в Таблице 15, соответствует оценке 4 или выше по Международной шкале ядерных аварий (Таблица 14). *Следует подчеркнуть, что промышленный реактор не может при любых обстоятельствах просто взорваться подобно термоядерной бомбе.*

Таблица 15

Серьезные аварии на военных, исследовательских и коммерческих реакторах

Реактор	Дата	Смертельные случаи	Влияние на окружающую среду	Комментарии
NRX, Канада (экспериментальный реактор,	1952	Ноль	Ноль	Восстановлен, (закрыт в 1992 году)

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

40 МВт)				
Виндскэйл-1, Великобритани я (военный реактор, производящий плутоний)	1957	Ноль	Широко распределенное загрязнение, повреждение хранилища (выброс 1.5×10^{15} Бк)	Погребен
SL-1, США (экспериментал ьный, военный реактор, 3 МВт)	1961	Три оператора	Очень незначительный радиоактивный выброс	Остановлен
Ферми -1 США (экспериментал ьный бридер, 66 МВт)	1966	Ноль	Ноль	Восстановлен, (запущен в 1972 году)
Льюсинс, Швейцария (экспериментал ьный реактор, 7.5 МВт)	1969	Ноль	Очень незначительный радиоактивный выброс	Остановлен
Браунс Ферри, США (коммерческий реактор, 2 x 1080 МВт)	1975	Ноль	Ноль	Восстановлен
Три Майл Айлэнд-2, США (коммерческий реактор, 880 МВт)	1979	Ноль	Незначительная кратковременная доза облучения населения (в пределах пределов ICRP), выброс криптона-85 2×10^{14} Бк	Остановлен
Сант-Лоренц- А2, Франция (коммерческий реактор, 450 МВт)	1980	Ноль	Незначительный радиоактивный выброс (8×10^{10} Бк)	Восстановлен, (остановлен в 1992 году)
Чернобыль-4, Украина (коммерческий реактор, 950 МВт)	1986	31 человек из персонала и пожарные	Радиоактивный выброс на территории Восточной Европы и Скандинавии (11×10^{18} Бк)	Погребен
Ванделос-1, Испания (коммерческий реактор, 480 МВт)	1989	Ноль	Ноль	Остановлен

При максимальных авариях (типа аварий в Виндскэйле в 1957 году и в Чернобыле в 1986), главная опасность для здоровья исходит от продуктов деления, таких как иод-131 и цезий-137. Они биологически активны, и при попадании в организм вместе с пищей, задерживаются в нем. Иод-131 имеет период полураспада 8 дней, и опасен в течение первого месяца после аварии (именно иод-131 вызывал раковые образования щитовидной железы после Чернобыльской аварии). Цезий-137 имеет период полураспада 30 лет, и поэтому потенциально опасен в качестве примеси в травах на пастбищах и в зерновых культурах. Также опасен и изотоп цезия-134, который имеет период полураспада, приблизительно, два года. В то время как опасное воздействие иода-131 может быть уменьшено специальными мерами (эвакуацией населения с загрязненных территорий на несколько недель, йодной профилактикой), радиоактивный цезий может препятствовать производству продовольствия на загрязненных землях в течение долгого времени. Другие радиоактивные вещества, присутствующие в активной зоне реактора, образуются не в таких больших количествах и не являются биологически активными (стронций, теллур-132, трансурановые элементы).

Несмотря на внушительный срок безопасной эксплуатации промышленных ядерных установок, на их постоянное совершенствование, которое делает практически невозможным катастрофическое радиоактивное загрязнение окружающей среды, имеются такие люди, которые против риска использования ядерной энергии. Их опасения должны быть строго взвешены с точки зрения выгоды, которую принесет человечеству использование ядерной энергии. Аналогично тому, как опасения некоторых людей относительно использования самолетов, полеты на которых не менее опасны, должны быть сбалансированы с той пользой, которую приносит авиация остальной части населения. Как бы там ни было, баланс между рисками и выгодами отнюдь не простая научная задача.

ГЛАВА 7 ПОЛИТИЧЕСКИЕ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Отношение к ядерным технологиям всегда было неоднозначным подобно многим другим технологическим новшествам. Эти технологии, с одной стороны, дали возможность человечеству обратиться к фактически неограниченному источнику энергии в условиях появившихся ограничений в использовании органического топлива. С другой стороны - привели к угрозе их военного использования. Вопрос, который мы здесь рассмотрим, состоит в следующем: *до какой степени и каким путем производство электроэнергии с помощью ядерных технологий уменьшает риск распространения и использования ядерного оружия?*

В августе 1945 две ядерные бомбы, изготовленные из урана -235 и плутония -239, были сброшены на Хиросиму и Нагасаки. Это событие способствовало завершению долгой и бессмысленной второй мировой войны. Человечеству была продемонстрирована огромная и невообразимая мощь атомного оружия, приведшая к огромному числу жертв и к росту раковых заболеваний среди оставшихся в живых.

7.1 Международное сотрудничество

Ядерным оружием сегодня владеют несколько государств,* а в течение так

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

называемой "холодной войны" (с 1950-ых по 1980-ые годы) происходило его беспрецедентное накопление, особенно в США и Советском Союзе. За последние сорок лет были предприняты громадные международные усилия для предотвращения присоединения других стран к существующим сегодня пяти ядерным державам. Эти усилия вылились в создание авторитетной международной организации Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ), основанной в 1957 году единогласным решением государств, членом Организации Объединенных Наций.

* Государства, обладающие ядерным оружием - США, Великобритания, Россия, Франция, и Китай. Израиль считается находящимся в "пороговом состоянии", что подчеркивает некоторую неоднозначность относительно уровня развития его ядерных технологий, хотя считается, что это государство способно иметь ядерное оружие. Южная Африка добровольно свернула свою военную ядерную программу. Индия и Пакистан продемонстрировали свое владение ядерным оружием, проведя ядерные испытания в 1998 году. Однако они могут присоединиться к "Международному соглашению о нераспространении ядерного оружия", если подобно Южной Африке добровольно откажутся от ядерных военных программ и уничтожат свое ядерное оружие.

Одна из главных функций МАГАТЭ состоит в "разработке системы мер и гарантий того, что специальные расщепляющиеся и другие материалы не могли быть использованы для военных целей". МАГАТЭ прилагает усилия для обнаружения любых отклонений в производстве ядерных материалов, начиная от ядерного топлива для мирных целей до производства ядерного оружия или других ядерных взрывчатых устройств. МАГАТЭ также уведомляет своих участников относительно использования ядерных технологий в невоенных областях, таких как сельское хозяйство, промышленность и медицина, разрабатывает требования безопасности для атомных электростанций.

В то время, когда создавалось МАГАТЭ, имелись значительные опасения, что многие страны будут стремиться к разработке или приобретению ядерного оружия для модернизации своих вооруженных сил.

Именно в этом контексте и был подписан документ, явившийся краеугольным камнем в обеспечении режима нераспространения ядерного оружия, - "Соглашение о Нераспространении ядерного оружия". *По существу этот документ представляет собой соглашение между государствами, владеющими ядерным оружием и другими странами, заинтересованными в ядерных технологиях. Данный документ предписывает, что результатом взаимопомощи и сотрудничества между странами не может стать никакой завод или материал, который может быть использован для производства ядерного оружия.* Те страны, которые отказываются состоять в этом соглашении, исключаются из международного сотрудничества и торговли, связанной с ядерными технологиями. Соглашение также предоставило "ядерное перемирие" среди неядерных государств, вследствие чего они отказались от ядерного пути развития своих вооруженных сил.

Первая группа сторон, подписавших соглашение - неядерные государства. Каждый участник соглашения не должен производить или приобретать ядерное оружие или другие ядерные взрывчатые устройства. Эти государства обязаны заключить соглашения с МАГАТЭ, предусматривающего применение мер безопасности по реализации их ядерных программ (см. 7.2).

Другие стороны, подписавшие соглашение - так называемые ядерные державы (государства, владеющие ядерным оружием). Эта группа включает страны, которые произвели и испытали ядерное оружие до 1967 года, такие как США, Советский Союз (теперь Россия), Великобритания, Франция и Китай*. От этих стран не требуется

принятия мер безопасности МАГАТЭ, хотя соглашение содержит некоторые обязательства относительно разоружения, которые обращены и к ним. Все страны, подписавшие соглашение приняли на себя некоторые обязательства по безопасности на их мирных ядерных объектах.

* Франция и Народная Республика Китай не ратифицировали соглашение до 1992 года.

Соглашение вступило в силу в 1970 году, позже было дополнено несколькими региональными соглашениями и продлено на неопределенный срок в 1995 году. Недавно, соглашение было дополнено более детальным изложением режима нераспространения ядерного оружия. В сентябре 1996 года был открыт для подписания "Всесторонний договор о запрещении ядерных испытаний", который нацелен на полное прекращение испытаний ядерного оружия. В настоящее время рассматривается возможность разработки и подписания "Соглашения об ограничении производства ядерного топлива", которое запретило бы дальнейшее производство расщепляющихся материалов для производства ядерного оружия.

7.2 Международная ядерная безопасность

В течение более 25 лет система международной ядерной безопасности, разработанная МАГАТЭ, имела заметный международный успех. Это во многом способствовало развитию сотрудничества в области ядерной энергетики и обеспечивало режим нераспространения урановых и плутониевых технологий, направленных на создание ядерного оружия.

Важно отметить, что международная система ядерной безопасности направлена прежде всего на управление ядерным топливным циклом. Она не имеет никакого отношения к инженерным или организационным аспектам безопасности ядерных реакторов, их размещения, или транспортировки. Эти аспекты регулируются другими международными соглашениями. Принципы международной ядерной безопасности являются главным инструментом, посредством которого неядерные государства демонстрируют свои мирные намерения в этой области. Они позволяют предотвращать наращивание ядерного оружия путем взаимных инспекций. Цель таких инспекций состоит в проверке использования ядерного топливного цикла исключительно для мирных целей.

Другими словами, система мер по международной ядерной безопасности призвана дать ответ на вопрос, твердо ли придерживается та или иная нация своих обязательств относительно использования ядерных материалов. Страны, отклоняющиеся от своих мирных ядерных программ, подвергаются определенным санкциям со стороны мирового сообщества. Согласно правилам международной ядерной безопасности, от 186 государств, участников соглашения (в том числе Тайвань) требуется выполнение следующих условий:

- Предоставление отчетов в МАГАТЭ об используемом ядерном топливе и местах его хранения.
- Обеспечение свободного доступа инспекторам МАГАТЭ для осмотра ядерных объектов, мест хранения ядерного топлива и проверки его количества.

МАГАТЭ также контролирует соблюдение ядерной безопасности некоторыми странами*, которые не являются членами соглашения. Сегодня МАГАТЭ контролирует почти 900 ядерных объектов, расположенных в 57 неядерных государствах. Существуют

также соглашения по ядерной безопасности между отдельными странами, например, между некоторыми европейскими государствами, объединенными соглашением "Евроатом", или двусторонние соглашения, например, между Австралией и США, или Японией и США.

* Индия, Пакистан, Израиль, Куба и Бразилия. Первые три государства активно разрабатывают свои ядерные программы, не подпадающие под действие международных соглашений по ядерной безопасности МАГАТЭ, хотя в некоторой части они их придерживаются. Куба и Бразилия проводят свои ядерные программы в рамках действующих соглашений.

Система международной ядерной безопасности оказалась очень эффективной в предупреждении нарушений в сфере обращения ядерных материалов. Однако, в связи с более широким распространением ядерных реакторов, созданием новых исследовательских реакторов, расширением компонентов ядерного топливного цикла, задачи международной ядерной безопасности становятся все более многогранными. Наряду с учетом мировых запасов ядерного топлива и инспекцией ядерных объектов, на первый план выходит работа в странах, не охваченных действием международных соглашений. В этом контексте принципы международной ядерной безопасности постоянно обновляются и дополняются.

Например, Ирак был разоблачен в проведении своей ядерной программы, которая никак не была связана с мирным использованием ядерных технологий. Это дало импульс для пересмотра некоторых принципов международной ядерной безопасности, и того как они должны быть реализованы в случае обнаружения нарушений в торговле ядерными материалами или аналогичных действий. Усовершенствованная система международных мер должна давать гарантии того, что любые подобные несанкционированные действия были бы незамедлительно обнаружены странами, участниками международных соглашений. Основное внимание тогда было бы обращено напрямую к странам, не присоединившимся к международным соглашениям, особенно таким, как Израиль, Пакистан и Индия.

Примером такого международного сотрудничества является соглашение, подписанное в конце 1970-х годов странами экспортерами ядерных технологий, об ограничении продаж технологий по переработке ядерного топлива (обогащение, изготовление, и переработка). Даже Ирак после этого столкнулся с трудностями по продвижению своей ядерной программы. Экспорт ядерных реакторов также находится под плотным контролем данного соглашения, которое предусматривает, во-первых, правительственные гарантии использования поставляемого оборудования в мирных целях, а во-вторых, обеспечение странами заказчиками возможности осмотра всех существующих и будущих ядерных объектов.

В мае 1997 года МАГАТЭ начало разрабатывать и осуществлять усиленные критерии, теперь известные как "Интегрированная международная ядерная безопасность", позволяющие полностью блокировать производство ядерного оружия в государствах. Это стало возможным благодаря значительному опыту МАГАТЭ по контролю за торговлей ядерными материалами, который позволяет смотреть на любые ядерные материалы и технологии как на возможный индикатор необъявленных ядерных программ и, следовательно, необъявленного ядерного топлива. Ожидается, что большинство стран, подписавших соглашение, в конечном, счете согласятся на эти критерии, которые подробно детализированы в Дополнительном Протоколе, предусматривающем более тщательную проверку на их территориях.

Новые критерии дают более широкий доступ для инспекторов к информации о

текущих и запланированных ядерных программах и к местам расположения ядерных объектов. Доступ не будет ограничен только объявленными ядерными установками, а будет расширен почти на все промышленные объекты. Инспекторские проверки могут включать в себя не только наблюдение за объектами, но и контрольный анализ проб окружающей среды. Принятие Протокола даст возможность для инспекции любых объектов без предварительного согласования.

Сегодня многие страны имеют необходимый обученный персонал и сырьевые ресурсы для того чтобы при желании реализовать программу производства ядерного оружия, как это продемонстрировал Ирак. Этому способствовало и широкое распространение использования ядерной энергии в мире, и большое количество исследовательских реакторов, работающих в более чем пятидесяти странах, и появление целой армии специалистов, имеющих определенный опыт в работе с ядерными материалами.

Наиболее важными факторами, укрепляющим режим международной ядерной безопасности, являются, с одной стороны, политическая воля, а с другой - желание каждой нации не подвергаться опасности со стороны своих ближайших соседей.

Нераспространение ядерного оружия, таким образом, это больше политическая проблема, чем техническая, и она лежит далеко в стороне от вопроса доступности или недоступности урана. Вполне достаточно лишь международных санкций для удержания большинства государств от производства ядерного оружия. Главный риск роста ядерных вооружений будет всегда лежать на странах, которые не присоединились к международным соглашениям и проявляют значительную активность в области реализации своих ядерных программ. В этой категории находятся Индия, Пакистан и Израиль. И в то время как требования международной безопасности относятся лишь к некоторым аспектам активности таких государств, другие могут остаться вне поля зрения МАГАТЭ. Многие страны, и в частности, Австралия и Канада, прилагают значительные усилия для решения проблем международной ядерной безопасности (см. 7.5).

7.3 Ядерные материалы

Наибольшее беспокойство с точки зрения увеличения запасов ядерного оружия возникает при непосредственном анализе материалов для ядерного топлива. Это может быть, например, плутоний, содержащийся в отработанном ядерном топливе, которое каждый год заменяется на свежее в ядерных реакторах. Заметим, что для создания атомной бомбы достаточно лишь нескольких килограммов плутония. Более того, практически в каждом государстве имеется достаточное количество природных запасов урана для создания ядерного оружия (см. 3.2).

В Таблице 16 приведены некоторые важные характеристики плутония и способы его использования. Плутоний - это вещество с многообразными свойствами, зависящими от источника его происхождения. Он существует в виде различных изотопов, таких как Pu-238, Pu-239, Pu-240, и Pu-241. Все они - "плутоний", но не все являются расщепляющимися. Только изотопы Pu-239 и Pu-241 могут подвергаться реакции ядерного расщепления в реакторах. Плутоний -239 сам по себе является превосходным ядерным топливом и используется для создания ядерного оружия, поскольку имеет достаточно малую критическую массу и низкий коэффициент самопроизвольного распада. Поэтому плутоний -239 часто называют "оружейным плутонием". Он использовался в

бомбе, сброшенной на город Нагасаки в 1945 году, и применяется в современном ядерном оружии.

Пригодный для использования в реакторах плутоний производится практически на всех ядерных реакторах и содержится в отработанном ядерном топливе, из которого он может быть выделен после специальной обработки. Этот плутоний не является в чистом виде оружием. Он содержит до 40 % более тяжелых изотопов плутония (обычно это Pu-240), которые накапливаются в топливных элементах в течение длительного времени (см. Рисунок 18).

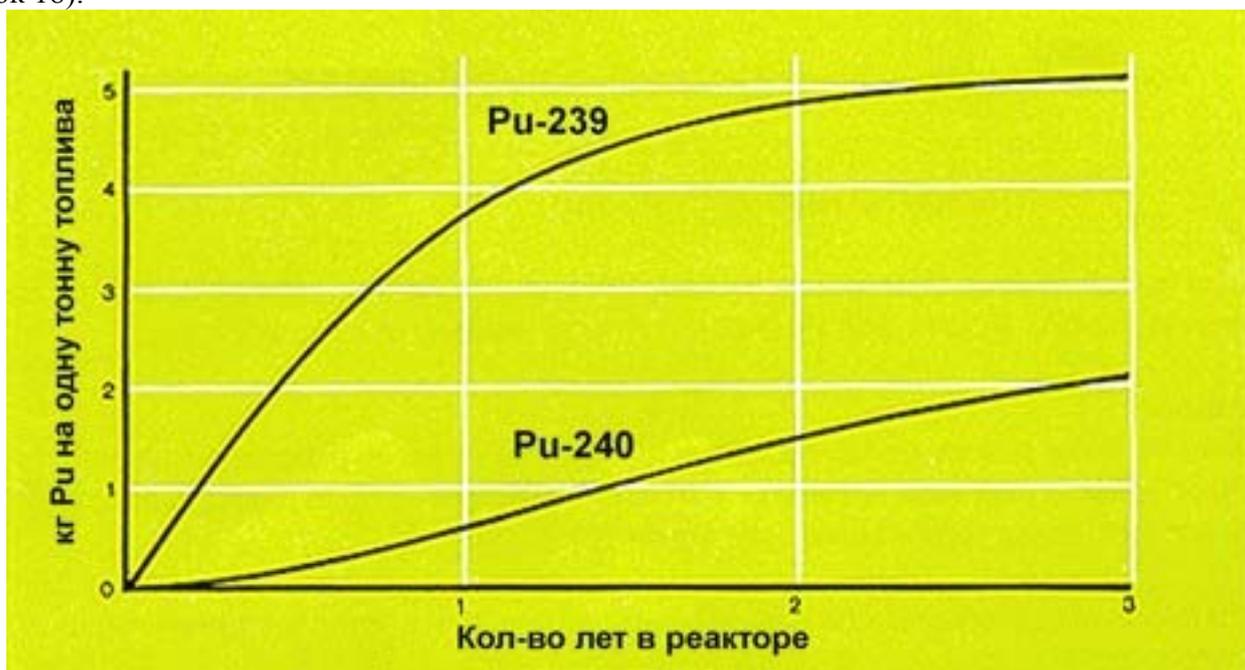


Рисунок 18. Плутоний в активной зоне ядерного реактора

Накопление Pu-239 и Pu-240 в топливных элементах легко-водного реактора в течение 3 лет

Данное обстоятельство практически не влияет на повторное использование плутония в смешанном оксидном топливе для реакторов (MOX- топливо, см. 4.2 и 5.2), но серьезно ограничивает его пригодность для создания ядерного оружия. Вследствие самопроизвольного распада Pu-240, только очень малое содержание этого материала может быть доступно для создания оружия. Конструкция ядерных устройств военного назначения, основанных использовании плутония, пригодного для использования в обычных реакторах, была бы ненадежна, трудна в изготовлении, и пока на практике не реализована *. Однако, концепция международной ядерной безопасности предполагает, что оба вида плутония могут использоваться для создания оружия. Это является основанием для всеобщего запрета переработки и разделения любого плутония из отработанного ядерного топлива.

* В 1962 году ядерное устройство, использующее плутоний с низким выгоранием, произведенный на одном из энергетических реакторов в Великобритании, было испытано в США. Изотопный состав этого плутония не была раскрыт, но очевидно, что устройство содержало приблизительно 90 % Pu-239.

Плутоний

Образование: $U-238 + \text{нейтрон} \Rightarrow U-239 \Rightarrow Np-239 \Rightarrow Pu-239$

(Бета-распады U-239 и Np-239: период полураспада 23.5 минута и 2.35 дней, соответственно)

$Pu-239 + \text{нейтрон} \Rightarrow Pu-240$

$Pu-240 + \text{нейтрон} \Rightarrow Pu-241$

В среднем, одно из четырех поглощений нейтрона ядром Pu-239 приводит к образованию Pu-240. Изотопы Pu-241 и Pu-242 формируются при последующих процессах поглощения нейтронов в ядерном топливе. Изотоп Pu-239, содержащийся в облученном топливе в ядерном реакторе, выгорает также быстро, как и накапливается, а Pu-240 накапливается устойчиво. Очень малое количество Pu-238 формируются при поглощении нейтронов ядрами U-235.

Количество: Обычный реактор мощностью 1000 МВт производит приблизительно 250 кг плутония (в основном Pu-239) каждый год. Эти продукты содержатся в высокоактивном отработанном ядерном топливе если оно повторно не обработано (Рисунок 14). Количество Pu-240 увеличивается с течением времени, пока тепловыделяющие элементы остаются в реакторе (см. Рисунок 18). Pu-240 не расщепляется в реакторе на тепловых нейтронах, но может стать расщепляющимся Pu-241 при дальнейшем поглощении нейтронов. (Pu-240 расщепляется в реакторах на быстрых нейтронах).

Радиоактивность: При распаде Pu-239 испускает альфа-частицы, и превращается в U-235 (см. Приложение). Период полураспада Pu-239 24390 лет, поэтому он имеет довольно низкий уровень радиоактивности. Pu-240 испускает при распаде альфа-частицы, и превращается в U-236 (другой неделяющийся изотоп урана). Его период полураспада - 6600 лет, поэтому он имеет более высокий уровень радиоактивности, чем Pu-239. Изотоп U-236 также испускает нейтроны при спонтанном распаде и превращается в Pu-238 с периодом полураспада 86 лет. Для обеспечения защиты от альфа-радиоактивности производится герметизация плутония от внешних контактов в специальных контейнерах.

Использование: Тепло, выделяющееся при радиоактивном распаде Pu-238 (0.56 Вт/г), позволяет использовать его как источник энергии в термо-электрических генераторах для кардиостимуляторов, космических спутников, навигационных маяков, и т.д. Энергия таких плутониевых источников дала, например, возможность космическому спутнику "Вояджер" посылать на Землю в течение длительного времени изображения планет. Pu-240 также может использоваться для решения подобных задач. В мирных целях изотоп Pu-239 используется в качестве топлива для ядерных реакторов. Изотоп Pu-241 (период полураспада 13 лет) после бета-распада превращается в Америций-241, который используется в качестве наполнителя в большинстве детекторов задымления.

Тип	Состав	Происхождение	Использование
Пригодный для использования в реакторах	55-60% Pu-239, более 19% Pu-240, примерно 30% нерасщепляющихся изотопов	Содержится в количестве, примерно, 1% в составе отработанного ядерного топлива в обычных гражданских реакторах	Как составная часть (5-7%) смешанного оксидного топлива (MOX-топливо) для обычных реакторов. Как топливо для реакторов на быстрых нейтронах.
Оружейный	Pu-239 с содержанием	Производится на специальных реакторах	Для создания ядерного оружия. Может

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

	менее 7% Pu-240	военного назначения.	перерабатываться в топливо для реакторов на быстрых нейтронах или в MOX-топливо
--	-----------------	----------------------	---

Следует отметить, что ядерный реактор, который использует смешанное MOX-топливо, не является производителем плутония, а тот, который и появляется в топливе, еще менее пригоден для производства оружия, чем находящийся в свежем MOX-топливе.

Коммерческий плутоний поэтому менее пригоден для военных целей, чем плутоний, произведенный на специальных реакторах *, разработанных для производства Pu-239. Тем не менее, появление новых лазерных технологий обогащения делает возможным обогащение коммерческого плутония до уровня оружейного. Следовательно, меры международной ядерной безопасности должны быть направлены и на контроль за увеличением количества пригодного только для гражданских реакторов плутония. (Обычные методы обогащения не могут использоваться для разделения изотопов Pu-239 от Pu-240, так как массы атомов практически равны).

*или на исследовательских реакторах, управляемых с помощью тяжелой воды, которые эксплуатируются, например, в Индии.

Топливный цикл в реакторах бридерах, основанный на использовании плутония, имеет некоторые особенности, которые могут способствовать его использованию в решении проблемы нераспространения ядерного оружия. С другой стороны, топливный цикл в обычных реакторах на тепловых нейтронах дает более высокий выход плутония (см. рисунки 13 и 14). Это означает, что в обозримом будущем реакторы на быстрых нейтронах могли бы использоваться как "установки для сжигания отходов" (см. 4.4), понижающих общее количество плутония, образующегося в отработанном ядерном топливе.

Существуют и другие ядерные материалы, которые могут использоваться для создания оружия, это - изотопы урана. Наиболее известный из них - это уран-235, материал, из которого была изготовлена бомба, сброшенная на город Хиросиму в 1945 году. Этот материал может производиться путем обогащения естественного урана на обогатительных заводах, но не до 3 - 4 процентов, как это требуется для топлива легководных реакторов, а до 93 процентов и выше по содержанию U-235.

Другой изотоп урана, пригодный для производства ядерного оружия, это - U-233. Этот материал накапливается в ядерном топливе при поглощении нейтронов торием -232, аналогично образованию Pu-239 из U-238 (см. 4.2). Однако, использование ториевых реакторов (см. 3.6) не продвинулось дальше экспериментальных исследований, а U-233 пока не рассматривается в контексте расширения ядерных вооружений.

Хотя все вышеупомянутые материалы и могут использоваться для производства взрывчатых веществ, они, тем не менее, не являются широко доступными для практического использования, а международные усилия делают их еще менее доступными.

В последние годы, международное сообщество обеспокоено проведением собственной военной ядерной программы в Северной Корее, использующей исследовательский реактор для производства плутония. Это обстоятельство было установлено в ходе инспекторских проверок. Организация Объединенных Наций наложила запрет на использование собственных ядерных реакторов в Северной Корее в

соответствии со специальным соглашением 1994 года (Agreed Framework 1994), которое предполагает введение определенных международных санкций для получения полных гарантий соблюдения требований МАГАТЭ по ядерной безопасности и нераспространению ядерного оружия. Компромиссное решение проблемы Северной Кореи состояло в том, что международный консорциум во главе с США, Южной Кореей и Японией взял на себя обязательство построить в Северной Корее два больших современных ядерных реактора для производства электроэнергии, которые невозможно использовать в военных целях.

Большая озабоченность мирового сообщества вызвана опасениями, что Ирак активно развивает свою военную ядерную программу. Эти опасения усилились в ходе войны в Персидском заливе. После перемирия в 1991 году Организация Объединенных Наций смогла квалифицировано подтвердить что Ирак, подписавший международный договор о нераспространении ядерного оружия, тайно реализовывал программу его создания, используя материалы и средства, не охваченные инспекторскими проверками МАГАТЭ. Основным направлением его незаконной деятельности была разработка собственных урановых месторождений и его обогащение. Как отмечалось в разделе 7.2, такая ситуация должна приводить к расширению режима нераспространения и международной ядерной безопасности в соответствии с программой МАГАТЭ "Интегрированной международной ядерной безопасности".

До сих пор имеются вопросы относительно ядерных намерений Индии, Пакистана и Израиля. Ни одна из этих стран не связана обязательствами по договору о нераспространении ядерного оружия. Индия и Пакистан уже продемонстрировали свою способность к созданию ядерного оружия, а Израиль активно развивает свою военную ядерную программу. Тем не менее, международные усилия по соблюдению этими странами режима нераспространения ядерных технологий военного назначения продолжаются.

7.4 Использование оружейного урана и плутония для производства электроэнергии

По иронии судьбы международные усилия, направленные на ядерное разоружение, привели к некоторым серьезным проблемам безопасности в мире. Демонтаж ядерных боеголовок, в соответствии с соглашением о разоружении между США и Россией, привел к накоплению ядерных оружейных материалов (плутония и высокообогащенного урана). После распада Советского Союза возникли опасения возможного расхищения, контрабанды или незаконной торговли такими материалами, в результате чего они могли бы попасть в руки террористов или государств, уклоняющихся от выполнения режима нераспространения ядерного оружия. Ненадежный контроль оборота ядерных материалов внутри России, размер Российских ядерных программ, и несоответствующая международным стандартам защита ядерных объектов - вот некоторые обстоятельства, которые могут способствовать попаданию ядерных технологий и материалов в преступные руки.

Совместные усилия многих государств в 1990-ые годы способствовали значительному усилению физической защиты таких материалов. Требования локализации и изоляции ядерных оружейных материалов (особенно плутония), которые более не требуются для военных целей, стали приоритетными для международного сообщества. МАГАТЭ использует и политические методы в контроле над использованием запасов оружейного плутония. Большие усилия предпринимаются в предохранении его от хищений, диверсий и в определении наиболее подходящих мест для его размещения*.

* Количество производимого пригодного для реакторов плутония из отработанного топлива в обычных гражданских реакторах, а это почти 100 тонн в год, значительно превышает количество оружейного плутония.

Перспектива использования оружейного плутония (содержащего более 93% Pu-239) в смешанном оксидном топливе (МОХ) для гражданских реакторов привлекает сегодня всеобщее внимание. Было бы вполне разумно производить МОХ-топливо с использованием смеси оружейного и пригодного для гражданских реакторов плутония. Это был бы, пожалуй, единственный способ его эффективной утилизации, который постоянно бы удалял оружейный плутоний из оборота. В настоящее время прилагаются большие усилия по разработке такого "плутониевого цикла", а так называемый "Саммит восьмерки", в который входят страны Большой семерки и Россия, постоянно проводят консультации по этому вопросу.

После трех десятилетий озабоченности возможностью использования в сфере вооружений урана, предназначенного для коммерческой ядерной энергетики, мы теперь становимся свидетелями того, как оружейный уран направляется на сугубо мирные цели для производства электроэнергии.

Первый такой материал был доставлен в США после демонтажа Советских военных боеголовок в 1995 году, и было положено начало переработке и использованию оружейного урана для производства электроэнергии. Оружейный высокообогащенный уран разбавлялся в соотношении 25:1 с обедненным ураном, получаемым на обогатительных заводах (см. также 3.5).

7.5 Политика Австралии и Канады в сфере ядерной безопасности

Обе страны - последовательные сторонники строгого международного режима нераспространения ядерного оружия, способствующего усилению национальной и международной безопасности. Обе страны заинтересованы в поисках гарантий того, что экспорт ядерных материалов и технологий будет использоваться только в мирных целях.

Основной интерес Австралии в сфере международной ядерной безопасности сосредоточен на контроле над надлежащим использованием ее урана в ядерных программах других стран. Интерес Канады более широк, и охватывает как проблемы полного топливного цикла внутри страны, так и экспорт урана и реакторных технологий. В обеих странах, экспорт урана контролируется федеральными правительствами.

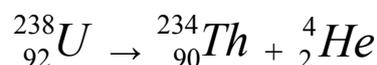
После второй мировой войны Канада взяла на себя обязательства не разрабатывать собственное ядерное оружие, хотя в то время имела для этого все возможности. Канада и Австралия участвовали в составлении проекта Устава МАГАТЭ, их представители постоянно представлены в Совете МАГАТЭ, в многочисленных технических комитетах и консультативных группах.

В своем первом отчете в 1976 году Австралийский Урановый Комитет (Ranger Uranium Environmental Inquiry) совершенно ясно указал на необходимость разработки адекватных критериев международной ядерной безопасности применительно к добыче урана в Австралии. Австралийское правительство тогда выработало основные принципы своей политики в области ядерной безопасности, которые были реализованы в течение 1977 года. В 1970-ых годах Австралия была включена в Международную программу по контролю над ядерным топливным циклом, и продолжает использовать свой авторитет

крупнейшего экспортера урана, для всестороннего внедрения высоких стандартов в сфере международной ядерной безопасности. Свои действия в этом направлении Австралия осуществляет совместно с Канадой, крупнейшим в мире производителем урана и экспортера реакторных технологий.

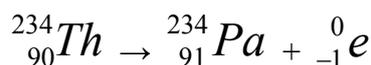
ПРИЛОЖЕНИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ РАДИОАКТИВНОСТЬ И ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Радиоактивный распад нестабильных ядер может происходить двумя путями – в результате α – или β - радиоактивного распада. При α – распаде ядра происходит самопроизвольное деление атомного ядра с числом протонов Z и числом нейтронов N на альфа – частицу (ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$) и ядро – продукт. В процессе альфа – распада ядро теряет четыре нуклона и полностью преобразуется. Зарядовое число продукта распада оказывается на две единицы меньше исходного, а массовое число – на четыре. Примером альфа – радиоактивного изотопа может служить изотоп урана – 238. Для этого изотопа продуктом реакции является ядро тория:

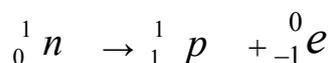


При этом распаде ядро тория и альфа – частица разлетаются с кинетическими энергиями 0.07 МэВ и 4.18 МэВ.

Явление бета – распада представляет собой самопроизвольное деление атомного ядра с испусканием электронов. Как и для альфа – распада, уравнение этой ядерной реакции похоже на уравнение химической реакции. Бета – радиоактивен, например, изотоп тория, полученный при альфа – распаде урана -238. В результате реакции бета – распада торий превращается в протоптиний ${}^{234}_{91}\text{Pa}$:



Возникает вопрос: а откуда же в ядре электроны? Дело в том, что нуклоны способны к взаимным превращениям, и в результате одного из таких превращений



и образуются электроны.

Оба вида радиоактивного распада могут сопровождаться гамма – излучением – жестким электромагнитным излучением с высокой проникающей способностью.

Что происходит в дальнейшем с вырвавшимся из заточения внутри атома сгустком энергии — излучением? Поток энергии, переносимой различными компонентами излучения, движется во внешней среде и взаимодействует с ней. Альфа-частицы несут на себе заряд, равный двум зарядам электрона. Поэтому им приходится с большим трудом протискиваться сквозь чашу атомов вещества, на которое налетает этот поток ионов гелия. Взаимодействуя с атомами, альфа-частицы быстро раздают свою энергию на освобождение электронов из атомов среды, т.е. на многократные акты ионизации. Поэтому пробеги ионов гелия в среде очень малы — даже в воздухе при нормальном атмосферном давлении они пробегают не более 10 см.

Бета-частицы — электроны — реже взаимодействуют с атомами среды, их электрический заряд меньше, они намного легче, так что пробег в воздухе для них возможен около метра. Еще меньше вероятность столкновения с атомами среды и потеря энергии на их ионизацию у гамма-квантов, они пробегают в воздухе десятки метров, пока не растратят всю свою энергию. Поэтому это излучение и называют проникающим. Приведем сравнительную таблицу свойств радиоактивного природного излучения, указывая заодно, какие возможны способы защиты от такого типа излучения.

Тип излучения	Состав излучения	Ионизирующая способность	Проникающая способность
α	Ионы He^{++}	Очень высокая	Низкая. Защита: 0,1 мм воды, лист бумаги
β	Электроны	Высокая	Высокая. Защита: слой алюминия до 0,5 мм.
γ	Электромагнитное излучение	Низкая	Очень высокая. Защита: слой свинца до нескольких см.

Количественной мерой ионизирующей способности проникающего излучения принимается количество пар ионов (ведь в процессе ионизации на две части разделяется изначально нейтральная система и образуется пара ионов разного знака), которое порождает данный тип излучения в 1 см³ сухого воздуха, находящегося при комнатной температуре (+18 °С) и нормальном атмосферном давлении. Условная единица измерения ионизирующих возможностей излучения была названа рентгеном и ей соответствует такая интенсивность излучения, при которой в 1 см³ образуется примерно два миллиарда пар ионов (более точно, $2,08 \cdot 10^9$). Как только введена количественная характеристика поля ионизирующего излучения, можем присвоить ей имя: экспозиционная доза. Единицей ее измерения является рентген: $1R = 2 \cdot 10^9$ пар ионов/см³ воздуха.

По сути дела, экспозиционная доза определяет энергетические возможности ионизирующего излучения. Когда эта единица вводилась в обиход, ее использовали для оценки эффективности генератора рентгеновского излучения. Но эта мера ионизирующего излучения перестала быть удобной, когда применение рентгеновских лучей в медицинской практике стало повсеместным. Дело в том, что понятие экспозиционной

дозы опирается на способность ионизировать сухой воздух. На практике же понадобилась характеристика, показывающая насколько эффективно излучение ионизирует ткани человеческого организма. Поэтому было предложено измерять степень воздействия проникающего излучения на вещество количеством энергии, поглощаемой облучаемым материалом.

Таким образом, *поглощенная доза* — это количество энергии, поглощаемое единицей массы облучаемого вещества. Конечно, эта величина характеризует не только способность излучения переносить энергию, но одновременно и способность вещества отбирать ее у излучения. Нужно, впрочем, сказать, что ионизация воздуха рентгеновским излучением очень мало отличается от ионизации мягких тканей организма.

Поглощенная доза измеряется в рэдах (рад.). Однако в Международной системе единиц для поглощенной дозы есть более удобная единица — Грей (Гр): 1 Гр = 100 рад = 1 Дж/кг. Радиационный эффект, т.е. мера того, насколько сильным оказывается воздействие излучения на вещество, как раз и определяется поглощенной дозой. Можно сказать, что поглощенная доза — это универсальная характеристика взаимодействия радиации и материи. Но — только для неживой материи!

Более подробное изучение облучения живых тканей показало, что в этом случае результат воздействия излучения (так называемый *радиобиологический эффект*) зависит не только от количества энергии, которое отдает излучение атомам живой среды, но и от плотности ионизации — количества пар ионов, которые образуются вдоль направления прохождения пучка излучения. Например, легкий электрон, попав внутрь вещества, ионизирует на своем пути далеко не каждый атом — столкнувшись с одним атомом, он минует сотни других атомов, пока не столкнется с каким-нибудь еще, превращая и его в ион. Не так обстоит дело с более тяжелыми частицами. Например, протон, который почти в 2000 раз тяжелее электрона, на своем пути ионизирует практически все встречающиеся атомы.

Для учета дополнительной характеристики облучения — плотности ионизации атомов на своем пути — используется специальный *коэффициент относительной биологической эффективности (КОБЭ)*. С его помощью удастся сравнивать радиобиологические эффекты, производимые разными типами излучения в одной и той же среде при равных количествах энергии, поглощаемой средой (при равных поглощенных дозах). Этот коэффициент характеризует способность излучения данного вида воздействовать на ткани организма, т.е. говорит об относительной биологической эффективности разных излучений.

Иначе говоря, степень влияния на среду, например, нейтронного потока может быть эквивалентна воздействию на среду пучка гамма-квантов. Скажем, некоторый процесс происходит в органическом веществе при поглощенной дозе гамма-лучей в 2 Гр. Тот же процесс с теми же параметрами в той же среде может быть вызван и быстрыми нейтронами, но в этом случае достаточно поглощенной дозы в 0,2 Гр. Таким образом, для нейтронов $K_{ОБЭ} = 10$. Так возникает новое понятие дозиметрии — *эквивалентная доза*.

Единицей измерения эквивалентной дозы является биологический эквивалент рада — бэр, 1 бэр = 1 рад·КОБЭ. Однако и эта единица уже устарела. Теперь принято измерять эквивалентную дозу в Зивертах (Зв): 1 Зв = 100 бэр. Смысл этих величин, правда, очень приблизительно, можно определить так: эквивалентная доза в 1 Зв означает, что на 1 квадратный сантиметр площади органической среды (живой ткани) попадает около 100 миллиардов квантов излучения (1 мбэр означает, что на каждый квадратный сантиметр площади ткани попадает миллион радиоактивных частиц).

Ян Гор-Лесси, "Ядерное электричество"

При определении коэффициента $K_{ОБЭ}$, который равен отношению поглощенных доз разных типов излучений, какое-то из излучений приходится считать эталонным. Если его воздействие на среду полагать равным некоторой условной единице, то воздействие другого типа облучения будет отличаться в $K_{ОБЭ}$ раз. В качестве эталонного выбирается гамма-облучение, для бета-электронов коэффициент относительной биологической эффективности тоже равен 1, для протонов и быстрых нейтронов — от 3 до 10, для альфа-частиц и тяжелых ионов $K_{ОБЭ}$ равен 20.

Предлагаем Вам оценить Вашу индивидуальную годовую дозу облучения, исходя из данных, приведенных в таблице 3. Полученные после подсчета результаты, Вы можете сопоставить с наиболее вероятными эффектами при различных значениях доз облучения и мощностей дозы, отнесенных к целому телу.

Таблица 3

Источник ионизирующего излучения	Годовая доза
КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	
На уровне моря	0,2 мЗв
Прибавьте на каждые 100 м над уровнем моря	0,03 мЗв
ИЗЛУЧЕНИЕ ЗЕМЛИ	
В зоне известняков	0,3 мЗв
В зоне осадочных пород	0,5 мЗв
В зоне гранитов	1,2 мЗв
ВАШЕ ЖИЛИЩЕ	
Из дерева	0,01 мЗв
Из кирпича	0,1 мЗв
Из бетона	0,5 мЗв
Если Вы живете в 30-км зоне АЭС, добавьте	0,02 мЗв
Если Вы живете вблизи от центра испытаний ядерного оружия, добавьте	0,03 мЗв
ВАША ПИЩА	
Естественные радиоизотопы, содержащиеся в продуктах (минералы, мясо, овощи, рыба и т.п.)	0,02 мЗв
ВАШИ ПОЛЕТЫ НА САМОЛЕТЕ	
На каждые 500 км добавьте	0,04 мЗв
ВАШИ ТЕЛЕВИЗОР И ЧАСЫ	
При средней продолжительности просмотра телевизора 1 час в день, добавьте	0,05 мЗв
Если Вы носите светящиеся часы, добавьте	0,02 мЗв
ВАШ ОТПУСК	
Неделя отпуска в горах на высоте 2000 м	1 мЗв
ВАШЕ ЗДОРОВЬЕ	
Рентгенография легких	1 мЗв
Рентгенография зубов	0,2 мЗв
Абдоминальная томография	15 мЗв
РЕЗУЛЬТАТ ВАШЕГО РАСЧЕТА	

А теперь сравните результаты Ваших расчетов с приведенными ниже цифрами и оцените степень той опасности, которую вносит в Вашу жизнь радиация. Ниже приведены данные, которые представляют наиболее вероятные эффекты при различных значениях доз облучения и мощностей дозы к целому телу.

Таблица 4

Величина дозы или мощности дозы	Комментарий
10000 мЗв (10 Зивертов)	При кратковременном облучении причинили бы немедленную болезнь и последующую смерть в течение нескольких недель
Между 2000 и 10000 мЗв (2 - 10 Зивертов)	При кратковременном облучении причинили бы острую лучевую болезнь с вероятным фатальным исходом
1000 мЗв (1 Зиверт)	При кратковременном облучении, вероятно, причинили бы временное недомогание, но не привели бы к смерти. Поскольку доза облучения накапливается в течение времени, то облучение в 1000 мЗв вероятно привело бы к риску появления раковых заболеваний многими годами позже
50 мЗв/в год	Самая низкая мощность дозы, при которой возможно появление раковых заболеваний. Облучение при дозах выше этой приводит к увеличению вероятности заболевания раком
20 мЗв/в год	Усредненный более чем 5 лет - предел для персонала в ядерной и горнодобывающих отраслях промышленности
10 мЗв/в год	Максимальный уровень мощности дозы, получаемый шахтерами, добывающими уран
3 - 5 мЗв/в год	Обычная мощность дозы, получаемая шахтерами, добывающими уран.
3 мЗв/в год	Нормальный радиационный фон от естественных природных источников ионизирующего излучения, включая мощность дозы почти в 2 мЗв/в год от радона в воздухе. Эти уровни радиации близки к минимальным дозам, получаемым всеми людьми на планете
0.3 - 0.6 мЗв/в год	Типичный диапазон мощности дозы от искусственных источников излучения, главным образом медицинских

0.05 год	мЗв/в	Уровень фоновой радиации, требуемый по нормам безопасности, вблизи ядерных электростанций. Фактическая доза вблизи ядерных объектов намного меньше
-------------	-------	--

СЛОВАРЬ НЕКОТОРЫХ ТЕРМИНОВ

Авария - нарушение эксплуатации АС, при котором произошел выход радиоактивных продуктов и/или ионизирующих излучений за предусмотренные проектом для нормальной эксплуатации границы в количествах, превышающих установленные пределы безопасной эксплуатации. **Авария** характеризуется исходным событием, путями протекания и последствиями. Под **аварией** часто понимают событие, не связанное с радиационными последствиями.

Аварийная ситуация - состояние АС, характеризующееся нарушением пределов и/или условий безопасной эксплуатации, не перешедшее в аварию.

Административное руководство АС - должностные лица, которым эксплуатирующей организацией предоставлены права и поручены обязанности по эксплуатации АС.

Альфа-частица - положительно заряженная частица, испускаемая ядром и состоящая из двух протонов и двух нейтронов.

Атомная станция (АС) - ядерный реактор (реакторы), с комплексом систем, устройств, оборудования, сооружений и персоналом, необходимых для производства энергии в заданных режимах и условиях применения, располагающиеся в пределах конкретной территории. Обычно под термином **атомная станция (АС)**, если это особо не оговаривается, понимается любой из объектов, т.е. АЭС, АСТ, АЭС.

Атомная станция теплоснабжения (АСТ) - атомная станция, предназначенная для производства тепловой энергии для целей отопления и горячего водоснабжения.

Атомная электрическая станция (АЭС) - атомная станция, предназначенная для производства электрической энергии.

Атомное законодательство - законы, законодательные акты о защите, окружающей среды, статьи уголовного кодекса, другие акты, имеющие силу законов, определяющие общественные отношения при использовании атомной энергии.

Безопасность АС - свойство АС при нормальной эксплуатации и в случае аварий ограничивать радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду установленными пределами. Уровень безопасности считается приемлемым, если обеспечено соблюдение требований специальных норм и правил. Составные элементы

понятия "безопасность АС" - техническая, ядерная, радиационная, экологическая безопасность.

Бета-частица - испускаемая радиоактивным нуклидом частица, по величине массы и заряда равна электрону. Электрический заряд может быть положительным - в этом случае бета-частица называется позитроном.

Блок АС - часть АС, выполняющая функцию АС в определенном проекте объема.

Гамма-излучение - электромагнитное излучение, испускаемое ядром в результате квантового перехода от одного энергетического уровня к другому.

Деление ядерное - процесс, в ходе которого одно ядро расщепляется на два и более ядер и происходит выделение энергии.

Ввод в эксплуатацию - процесс, во время которого системы и оборудование АС начинают функционировать и проверяется их соответствие проекту, включающий в себя предпусковые наладочные работы, физический и энергетический пуск и завершающийся сдачей АС в промышленную эксплуатацию.

Внутренняя защищенность реактора - свойство обеспечивать безопасность на основе естественных обратных связей и процессов.

Выбросы радиоактивности на объектах ядерной энергетики - газовые, аэрозольные выбросы и жидкие сбросы, которые содержат радиоактивные вещества.

Дозовые пределы - в Нормах радиационной защиты НРБ-95 устанавливаются дозовые пределы:

- для персонала 2 бэр/год в среднем за последовательные 5 лет, но не более 5 бэр/год,
- для населения 0,1 бэр/год в среднем за 5 лет, но не более 0,5 бэр/год.

Запроектная авария - авария, вызванная не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождающаяся дополнительными по сравнению с проектными авариями отказами систем безопасности сверх единичного отказа, ошибочными решениями персонала, которые могут привести к тяжелым повреждениям или к расплавлению активной зоны, уменьшение последствий которой достигается управлением аварией и/или реализацией планов мероприятий по защите персонала и населения.

Защитные системы (элементы) безопасности - технологические системы (элементы), предназначенные для предотвращения или ограничения повреждений ядерного топлива, оболочек тепловыделяющих элементов, оборудования и трубопроводов, содержащих радиоактивные продукты.

Изотопы - нуклиды с одинаковым числом протонов, но различным количеством нейтронов.

Ионизирующее излучение - потоки заряженных частиц высокой энергии, которые непосредственно или косвенным путем вызывают ионизацию вещества.

Консервативный подход - это такой подход к анализу протекания аварии, при котором для параметров и характеристик принимаются значения и пределы, заведомо приводящие

к более неблагоприятным результатам.

Критерии (пределы) безопасности - установленные нормативно-техническими документами и/или органами Государственного надзора и контроля значения параметров и/или характеристик последствий аварий, при соблюдении которых обеспечивается безопасность АС.

Культура безопасности - квалификационная и психологическая подготовленность всех лиц, при которой обеспечение безопасности АС является приоритетной целью и внутренней потребностью, приводящей к самосознанию ответственности и к самоконтролю при выполнении всех работ, влияющих на безопасность.

Локализирующие системы (элементы) безопасности - технологические системы (элементы), предназначенные для предотвращения или ограничения распространения выделяющихся при авариях радиоактивных веществ и излучений за установленные проектом границы и выхода их в окружающую среду.

Независимые системы (элементы) - системы (элементы), для которых отказ одной системы (элемента) не приводит к отказу другой системы (элемента).

Нейтрон - электрически незаряженная элементарная частица с массой, приблизительно равной одной атомной единице массы (а.е.м.).

Нормальная эксплуатация - эксплуатация АС в определенных проектом эксплуатационных пределах и условиях.

Нормативы безопасности - государственные положения для обеспечения безопасности персонала, населения, окружающей среды.

Нуклид - разновидность атома, характеризуемая числом протонов и нейтронов, а в некоторых случаях энергетическим состоянием ядра.

Обеспечивающие системы (элементы) безопасности - технологические системы (элементы), предназначенные для снабжения систем безопасности энергией, рабочей средой и создания условий для их функционирования.

Опытная эксплуатация - этап ввода АС в эксплуатацию от начала энергетического пуска до приемки АС в промышленную эксплуатацию.

Основные правила и нормы безопасности в АЭ - общие положения обеспечения безопасности АС, правила ядерной безопасности, нормы радиационной безопасности, санитарные правила проектирования и эксплуатации АС, требования к размещению и концентрации мощности АС исходя из ограничений по безопасности и экологии

Отказы по общей причине - отказы важных для безопасности систем (элементов), возникающих вследствие одного отказа, ошибки персонала, внутреннего или внешнего воздействия. Внутренние воздействия - воздействия, возникающие при исходных событиях аварий, включая ударные волны, струи, летящие предметы, изменение параметров среды (давление, температура, химическая активность и т.п.), пожары и т.п. Внешние воздействия - воздействия характерных для площадки АС природных явлений и деятельности человека, включая землетрясения, высокий и низкий уровень наземных и подземных вод, ураганы, аварии на воздушном, водном и наземном транспорте и т.п.

Ошибка персонала - единичное непреднамеренное неправильное воздействие на управляющие органы или единичный пропуск правильного действия; или единичное непреднамеренное неправильное действие при техническом обслуживании оборудования и систем, важных для безопасности.

Пассивное устройство (элемент) - устройство (элемент), функционирование которого связано только с вызвавшим его работу событием и не зависит от работы другого активного устройства, например, управляющего устройства, энергоисточника и т.п. По конструктивным признакам пассивные устройства делятся на пассивные устройства с механическими движущимися частями (например, обратные клапаны) и пассивные устройства без механических движущихся частей (например, трубопроводы, сосуды).

Первый контур - контур, вместе с системой компенсации давления, по которому циркулирует теплоноситель через активную зону, под рабочим давлением.

Период полураспада - время, требующееся для распада половины атомов данного радиоактивного вещества.

Последствия аварии - возникшая в результате аварии радиационная обстановка, наносящая ущерб за счет превышения установленных пределов радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду.

Пределы безопасной эксплуатации АС - установленные проектом значения параметров технологического процесса, отклонения от которых могут привести к аварии.

Предпусковые наладочные работы - этап ввода АС в эксплуатацию, при котором законченные строительством системы и элементы АС приводятся в состояние эксплуатационной готовности с проверкой их соответствия установленным в проекте критериям и характеристикам и завершающийся готовностью АС к физическому пуску.

Проектная авария - авария, для которой проектом определены исходные события и конечные состояния, предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие с учетом принципа единичного отказа систем безопасности или одной, независимой от исходного события ошибки персонала ограничение ее последствий установленными для таких аварий пределами.

Проектные пределы - значение параметров и характеристик состояния систем (элементов) и АС в целом, установленные в проекте для нормальной эксплуатации, аварийных ситуаций и аварий.

Продукт деления - нуклид, образующийся в результате либо деления, либо последующего радиоактивного распада образовавшегося таким же образом радиоактивного нуклида.

Продукт распада - нуклид или радионуклид, образующийся при распаде. Он может образовываться непосредственно при распаде одного радионуклида или в результате серии последовательных распадов нескольких радионуклидов.

Промышленная эксплуатация - эксплуатация АС, принятой в установленном порядке, соответствие проекту и безопасность которой подтверждены испытаниями на этапе ввода АС в эксплуатацию.

Радиационная безопасность - свойство предотвращать переоблучение людей и окружающей среды, система технических и организационных мер, обеспечивающая такую

защищенность персонала и населения от радиационных воздействий, при которой не возникают нестохастические, соматические эффекты, а вероятность стохастических эффектов мала и считается приемлемой. **Радиационная безопасность** - система мер по защите персонала, населения и окружающей среды от воздействия проникающих излучений, направленная на обеспечение отсутствия неблагоприятных эффектов или вреда здоровью от облучения ионизирующими частицами людей, живых существ и элементов природы.

Радиоактивность - самопроизвольный распад атомных ядер, сопровождающийся испусканием частиц или электромагнитного излучения.

Радионуклид - нуклид, испускающий ионизирующее излучение.

Радиоэкологический ущерб -

- чистые потери - потери популяций из-за облучения от загрязненных поверхностей, водоемов, донных отложений при питании представителей биоценозов загрязненной растительностью.
- уничтожения загрязненных особей.
- косвенные потери - нарушение равновесия в экосистеме из-за выполнения работ по дезактивации территорий и водоемов, отчуждения территорий.

Реакторная установка - комплекс систем и элементов атомной станции, предназначенный для преобразования ядерной энергии в тепловую, включающий реактор и непосредственно связанные с ним системы, необходимые для его нормальной эксплуатации, аварийного охлаждения, аварийной защиты и поддержания в безопасном состоянии, при условии выполнения требуемых вспомогательных и обеспечивающих функций другими системами станции. Границы реакторной установки уточняются для каждой АС Главным конструктором РУ и Генпроектировщиком.

Сетевой теплоноситель - среда, посредством которой тепло транспортируется от АС к внешнему и внутреннему потребителю.

Системы (элементы) безопасности - системы (элементы), предназначенные для выполнения функций безопасности. Системы (элементы) безопасности по характеру выполняемых ими функций разделяются на защитные, локализующие, обеспечивающие и управляющие.

Системы (элементы) контроля и управления - системы (элементы), предназначенные для контроля и управления системами нормальной эксплуатации.

Системы (элементы) нормальной эксплуатации - системы (элементы), предназначенные для осуществления нормальной эксплуатации.

Снятие блока с эксплуатации - процесс осуществления комплекса мероприятий после удаления ядерного топлива, исключаящий его использование в качестве источника энергии и обеспечивающий безопасность персонала и окружающей среды.

Специальные нормы и правила - нормы и правила, одобренные для применения в атомной энергетике Государственными органами надзора и контроля.

ТВЭЛ - топливный элемент реактора, состоящий из сердечника, содержащего делящееся вещество и, может быть, разбавитель, и прочной тонкостенной оболочки.

Тепловые нейтроны - нейтроны, замедленные до скорости, соответствующей средней тепловой энергии атомов или молекул, через которые они проходят. Средняя энергия нейтронов при обычных температурах составляет 0,025 эВ, что соответствует средней скорости 2200 м/с.

Техническая безопасность - предупреждение потерь прочности, целостности, других материальных качеств систем, комплекс мер для предотвращения опасных отказов систем. Под **технической безопасностью** ядерной установки понимают достигаемые техническими средствами и организационными мерами ее свойства, определяемые прочностью и герметичностью оборудования, сосудов и трубопроводов, надежностью систем локализации радиоактивности, качеством систем контроля, управления и диагностики состояния, необходимые для того, чтобы при эксплуатации предупреждать возникновение и предотвращать развитие опасных состояний и отказов элементов систем, грозящих нарушением пределов и условий безопасной эксплуатации установки, а также контролировать и поддерживать работоспособность барьеров безопасности. **Техническая безопасность АС** должна обеспечиваться высоким качеством всех общеинженерных работ, определяющих надежность функционирования и безопасную эксплуатацию оборудования атомных энергетических установок.

Техническое обслуживание - комплекс операций по контролю и поддержанию работоспособного и исправного состояния объекта.

Управление запроектной аварией - действия, направленные на предотвращение развития проектных аварий в запроектные и на ослабление последствий запроектных аварий. Для этих действий используются любые имеющиеся в работоспособном состоянии технические средства, предназначенные для нормальной эксплуатации, для обеспечения безопасности при проектных авариях или специально предназначенные для уменьшения последствий запроектных аварий.

Управляющие системы (элементы) безопасности - системы (элементы), предназначенные для инициирования действий систем безопасности, осуществления контроля и управления ими в процессе выполнения заданных функций.

Условия безопасной эксплуатации - установленные проектом минимальные условия по количеству, характеристикам, состоянию работоспособности и условиям технического обслуживания систем (элементов), важных для безопасности, при которых обеспечивается соблюдение пределов безопасной эксплуатации и/или пределов безопасности.

Уровень аварийной готовности - установленная степень готовности персонала, штабов и гражданской обороны и других привлекаемых сил, а также используемых технических средств для действий по защите персонала и населения в случае аварии на АС.

Физическая защита АС - технические и организационные меры обеспечения сохранности содержащихся на АС делящихся и радиоактивных материалов и других материальных ценностей и предотвращение несанкционированного доступа на АС и установленные проектом ее важные участки.

Физический пуск - этап ввода АС в эксплуатацию, включающий загрузку реактора ядерным топливом, достижение критического состояния реактора и выполнение

необходимых физических экспериментов на уровне мощности, при которой теплоотвод от реактора осуществляется за счет естественных теплотерь (рассеяния).

Экологическая безопасность - необходимая и достаточная защищенность окружающей среды от вредных воздействий атомных станций при нормальной эксплуатации и в случае аварий. Под экологической безопасностью АС понимают свойства АС не оказывать на окружающую среду таких воздействий за счет выбросов или сбросов радиоактивных веществ, тепла, химических веществ, которые могли бы причинить вред для обитателей окружающей среды, флоре и фауне в природных экосистемах, нарушали бы биологическое равновесие, изменяли бы климатические и другие условия, необходимые для сохранения и обогащения природы.

Экологический ущерб - величина стоимости работ по восстановлению качества окружающей среды

Эксплуатация - вся деятельность, направленная на достижение безопасным образом цели, для которой была построена АС, включая работу на мощности, пуск, остановки, испытания, техническое обслуживание, ремонт и перегрузку топлива, инспектирование во время эксплуатации и другую, связанную с этим деятельность.

Эксплуатирующая организация - объединение (организация), назначенное(ая) вышестоящим органом государственного управления осуществлять собственными силами или с привлечением других предприятий (организаций) деятельность на всех этапах жизненного цикла ядерной установки по выбору площадки, проектированию, строительству, вводу в эксплуатацию, эксплуатации и снятию с эксплуатации АС и имеющее(ая) разрешение органов государственного контроля и надзора на осуществление этой деятельности.

Эксплуатационный персонал АС - лица, осуществляющие эксплуатацию АС.

Эксплуатационные пределы - значения параметров и характеристик состояния систем (элементов) и АС в целом, заданных проектом для нормальной эксплуатации.

Элементы - оборудование, приборы, трубопроводы, кабели, строительные конструкции и другие изделия, обеспечивающие выполнение заданных функций самостоятельно или в составе систем и рассматриваемые в проекте в качестве структурных единиц при выполнении анализов надежности и безопасности.

Энергетический пуск - этап ввода АС в эксплуатацию, при котором АС начинает производить энергию в соответствии с проектом и осуществляется подъем мощности и проверка работы АС на уровнях мощности вплоть до установленной для промышленной эксплуатации.

Ядерная авария - авария, связанная с повреждением ТВЭЛОВ, превышающем установленные пределы безопасной эксплуатации и/или облучением персонала, превышающего допустимое для нормальной эксплуатации, вызванная

- нарушением контроля и управления цепной ядерной реакции деления в активной зоне реактора,
- образованием критической массы при перегрузке, транспортировке и хранении

ТВЭЛОВ,

- нарушением теплоотвода от ТВЭЛОВ.

Ядерная безопасность - предотвращение тяжелых ядерных аварий, система мер для снижения вероятности аварий с повреждением ядерного топлива или переоблучением персонала, например при разгонах реакторов на мгновенных нейтронах.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

(курсивом выделены ссылки, добавленные при переводе)

1. **World Energy Outlook**
OECD International Energy Agency,
Paris 1998, ISBN 92-64-16185-6
2. **Energy for Tomorrow's World**
World Energy Council
St Martins Press, New York 1993, ISBN 0-312-10659-9
3. **Energy for Tomorrow's World P Acting Now!**
World Energy Council
World Energy Council, London 2000, ISBN 1-901640-06-X
4. **Global Energy Perspectives**
ed Nakicenovic, Grubler & McDonald for World Energy Council & IASA
Cambridge Uni Press 1998, ISBN 0-521-64569-7
5. **Uranium 1999: Resources, Production and Demand.** ("Red Book")
Joint report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency.
Paris 2000, ISBN 92-64-17198-3
6. **Nuclear Power, Nuclear Fuel Cycle and Waste Management:** status and trends.
Part C of IAEA Yearbook; International Atomic Energy Agency
Vienna 1994, ISBN 92-0-102494-0
7. **Radioactive Waste Management in Perspective**
OECD Nuclear Energy Agency
Paris 1996, ISBN 92-64 14692-X
8. **Radiation in Perspective, applications, risks and protection**
OECD Nuclear Energy Agency
Paris 1997, ISBN 92-64-15483-3
9. **The Nuclear Energy Option**, an alternative for the 90s.
Bernard L Cohen
Plenum Press, New York 1990, ISBN 0-306-43567-5
10. **The Future of Nuclear Power**
Geoffrey Greenhalgh

- Graham and Trotman, London 1988, ISBN 0-86010-987-9
11. **Nuclear Renewal**, common sense about energy
Richard Rhodes
Viking Penguin 1993, ISBN 0-670-85207-4
 12. **Power Production: What are the Risks?**
Prof J H Fremlin
Oxford University Press 1987, ISBN 0-19-286078-X
 13. **Chernobyl Ten Years On - Radiation and Health Impact**
OECD Nuclear Energy Agency
Paris 1996, (112 pp)
 14. **Бейлин В.А., Боровик А.С., Малышевский В.С., Янчевский С.Н.** Ростовская атомная. Несекретные материалы. Ростов-на-Дону, Ростиздат.- 2001, 110 стр.
 15. **Бейлин В.А., Боровик А.С., Малышевский В.С.** Радиация, жизнь, разум. Ростов-на-Дону, Ростиздат.- 2001, 112 стр.
 16. **Преображенская Л.Б., Зарубин В.А., Никандорова А.В.** Популярно о ядерной энергетике. Москва. ИздатАТ - 1993, 48 стр.
 17. **Международные оценки последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Отчет Научного комитета по действию атомной радиации ООН - 2000. Специальное приложение к журналу "Медицинская радиология и радиационная безопасность" - 2001, 29 стр**
 18. **Яворовский З.** Реалистическая оценка воздействия аварии на Чернобыльской АЭС на здоровье людей. Атомная энергия, том 86, вып. 2, 1999, стр. 140-150.
 19. **Мадоян А.А., Аракелян Э.К., Минасян С.А.** Расчет нестационарных характеристик и показателей графиков нагрузки и агрегатов ТЭС. Ереван, Изд-во "Айастан", 1989, 135 стр.
 20. **Головченко П.К., Жарков А.В., Кормушкиен Ю.П., Мустафинов Э.Н., Поваров В.П., Терещенко А.Б.** Оценка воздействия Ростовской АЭС на окружающую среду. Основные положения. Ростов-на-Дону, 1992, 88 стр.
 21. **Внуков В.С., Рязанов Б.Г.** Проблемы и опыт обеспечения ядерной безопасности при хранении отработавшего топлива АЭС. Атомная энергия, том 91, вып. 4, 2001, стр. 263-272.
 22. **Петросянец А.М.** Ядерная энергетика. М. Наука, 1981, 187 стр.
 23. **Ораевский В.Н.** Ядерная энергетика. Киев, Наукова думка, 1978, 316 стр.
 24. **Блохинцев Д.И.** Рождение мирного атома. Москва, Атомиздат - 1977, 112 стр.
 25. **Сивинцев Ю.В.** Насколько опасно облучение? Москва, Знание - 1988, 96 стр.
 26. **Гладков К.А.** Атом от А до Я. Москва, Атомиздат - 1974, 272 стр.

Ян Гор-Лесси

ЯДЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

**Урановый информационный центр в сотрудничестве с Советом полезных
ископаемых, Австралия**

Перевод с английского
Вячеслав Сергеевич Малышевский

