

В. Л. Гурачевский

**ВВЕДЕНИЕ В АТОМНУЮ ЭНЕРГЕТИКУ.
ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ АВАРИЯ И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ**

Издание 2-е, переработанное и дополненное

Минск
Институт радиологии
2014

УДК 621.039+614.876.084
ББК 31.4
Г95

Рецензенты:
доктор технических наук Л. В. Мисун,
кандидат технических наук Н. Н. Тушин

Гурачевский, В.Л.
Г95 Введение в атомную энергетику. Чернобыльская авария и ее последствия / В. Л. Гурачевский. – Минск : Институт радиологии, 2014. – 176 с.: ил.
ISBN 978-985-7003-62-4.

Представлены сведения о месте АЭС в современной энергетике, устройстве и работе реакторов различного типа, проблемах и перспективах ядерной энергетики.

Обсуждаются вопросы чернобыльской аварии и ее последствий: особенности реакторов РБМК-1000; предпосылки, причины и развитие аварии; мероприятия по ее локализации; экологические, медицинские и социально-экономические последствия.

Во втором издании в связи с новыми научными данными переработаны разделы по медицинским последствиям аварии.
Для широкого круга читателей.

УДК 621.039+614.876.084
ББК 31.4

Издано в рамках выполнения Программы совместной деятельности по преодолению последствий чернобыльской катастрофы в рамках Союзного государства на период до 2016 года.

ISBN 978-985-7003-62-4

© Гурачевский В. Л., 2014.
© РНИУП «Институт радиологии», 2014.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
1. ВВЕДЕНИЕ В АТОМНУЮ ЭНЕРГЕТИКУ	7
1.1. Атомная энергетика	7
1.2. Сводка сведений из ядерной физики, необходимых для понимания этой книги	11
1.3. Как работает атомная станция	15
1.4. Немного о физике и истории реакторов	19
1.5. Разновидности реакторов для АЭС. Водо-водяные (PWR) реакторы. Авария на АЭС Три-Майл-Айленд	25
1.6. Реактор ВВЭР-1000 и его усовершенствованный вариант ВВЭР-1200	29
1.7. BWR-реакторы. Авария на АЭС Фукусима-1	32
1.8. Реактор на тяжелой воде (PHWR), газовые реакторы (GCR и AGR)	34
1.9. «Чернобыльский» реактор РБМК-1000	37
1.10. Реакторы новых поколений	38
1.11. Управление реактором и ядерная безопасность	44
1.12. Ядерный топливный цикл и проблема захоронения радиоактивных отходов	49
2. ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ АВАРИЯ И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ	56
2.1. История реакторов РБМК-1000 и Чернобыльской АЭС	56
2.2. Устройство реактора РБМК-1000 и его особенности	61
2.3. Ксеноновое отравление и оперативный запас реактивности. Авария на Ленинградской АЭС	67
2.4. Что предшествовало аварии (испытание с выбегом турбины)	70
2.5. Хронология событий 25 апреля 1986 года	74
2.6. 26 апреля 1986 года	77
2.7. Авария и первые часы после нее	82
2.8. Правительственная комиссия	90
2.9. Локализация аварии	93

2.10. Ликвидаторы	99
2.11. Эвакуация. Защита населения. Информирование об аварии	104
2.12. Чернобыльский саркофаг	112
2.13. Состояние разрушенного блока и объекта «Укрытие»	117
2.14. Наказание виновных	120
2.15. Что усугубило последствия аварии	130
2.16. Эволюция представлений о причинах чернобыльской аварии	135
2.17. Экологические последствия аварии	144
2.18. Дозы облучения и здоровье	154
2.19. Медицинские последствия	158
2.20. Социально-экономические последствия	164
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	168

ПРЕДИСЛОВИЕ

Ядерная физика и техника относятся к самым сложным областям знания. Однако существует два круга вопросов, которые непосредственно связаны с этими областями, но волнуют практически каждого жителя Беларуси. Речь идет о чернобыльской аварии, с одной стороны, и зарождении ядерной энергетики в Беларуси – с другой.

Так получилось, что страна, в наибольшей степени пострадавшая от аварии на АЭС, приняла решение о строительстве атомной станции на своей территории. Автор не ставил перед собой задачи разрешить это противоречие, считая, что каждый человек вправе иметь собственное мнение на сей счет. Однако, чтобы это мнение было объективным, нужно обладать достаточно полной информацией и об атомной энергетике, и о чернобыльской аварии.

Обе эти темы недостаточно полно освещены в литературе для неспециалистов. Автор на основании опыта чтения многочисленных лекций по данной тематике для студентов и слушателей курсов повышения квалификации БГАТУ попытался связно изложить ответы на основные вопросы, обычно волнующие аудиторию. Для понимания материала вполне достаточно знаний школьного курса физики, тем не менее по некоторым сложным вопросам в книге можно найти краткие разъяснения.

Первая часть представляет собой введение в атомную энергетику. Здесь обсуждается информация о том, для чего появились и как работают ядерные реакторы, каковы достоинства и недостатки атомной энергетики, какие реакторы распространены в мире и какой планируется построить в Беларуси, что случилось в Фукусиме и как в мире решается проблема захоронения радиоактивных отходов. Эта часть имеет вполне законченный вид, но одновременно она необходима и для понимания деталей чернобыльской аварии.

Во второй части анализируются предпосылки и причины чернобыльской аварии, ее ход, первоочередные меры по локализации и ликвидации, долгосрочные экологические, медицинские и социально-экономические последствия. Эти вопросы отражают заметную часть истории огромной страны, целого поколения людей и, по мнению автора, достойны изучения и обсуждения.

Многие годы документы о чернобыльской аварии были засекречены. Случившееся 26 апреля 1986 года преподносилось как результат многочисленных нарушений правил безопасности недостаточно квалифицированными операторами при проведении никем

не санкционированного эксперимента на современном, высоконадежном реакторе. Как выяснилось в конце предыдущего и начале нового столетия, все было с точностью до наоборот...

Удивительно, но часть документов по чернобыльской аварии до сих пор недоступна. По этой причине продолжают появляться новые доклады российских, украинских, международных организаций и комиссий с анализом хода аварии и ее причин. В данной книге используется как хорошо известный фактический материал, так и данные, получившие огласку совсем недавно. Не все из них можно считать стопроцентно подтвержденными. Однако умолчать о них нельзя, поскольку они исходят от людей, которые принимали непосредственное участие в событиях, связанных с аварией.

Книга основана на обширном фактическом материале, поэтому ее можно использовать как справочник. По мнению автора, ее можно использовать и как методическое пособие для студентов и слушателей курсов повышения квалификации при изучении соответствующих разделов учебных планов.

1. ВВЕДЕНИЕ В АТОМНУЮ ЭНЕРГЕТИКУ

1.1. Атомная энергетика

Одной из причин возникновения и развития атомной энергетики служит растущая потребность человечества в энергии. Ее рост в последние столетия имеет характер, близкий к экспоненциальному [1]. Это объясняется тем, что многие достижения цивилизации, связанные с использованием тех или иных видов энергии, открывают веер новых возможностей для развития.

В меньшем историческом масштабе мировое потребление энергии растет примерно линейно: за последние 45 лет в среднем на 2,5 % в год. В 2010 году оно составило в пересчете на нефть (нефтяном эквиваленте) 12 млрд. тонн (данные British Petroleum). По потреблению энергии на одного человека лидируют США, Япония, Германия, Франция, Англия. Наибольшие темпы роста производства энергии характерны для Китая, Индии, Южной Кореи. Структура годового потребления энергии представлена на рис. 1.

По данным Международного энергетического агентства [2]

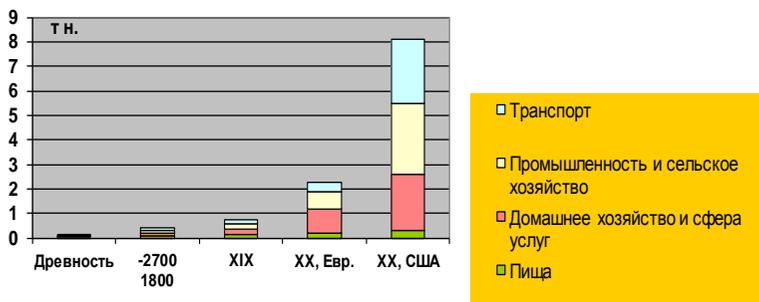


Рис. 1. Годовое потребление энергии одним человеком в тоннах нефти (т н.)

в 2010 году атомными электростанциями вырабатывалось 12,9% всей производимой в мире электроэнергии (табл. 1). Более двух третей электричества производилось станциями на органическом топливе.

Атомной энергетике присущи определенные достоинства и недостатки. К преимуществам относится следующее.

1. Ядерное топливо чрезвычайно эффективно. При производстве одного и того же количества энергии ядерного топлива требуется в миллионы раз меньше, чем органического. В ядерном реакторе ВВЭР-1000 (Россия) мощностью 1000 *МВт* топлива массой 70–80 *тонн* хватает на 4–5 лет работы. Для сравнения, Троицкая ГРЭС (Россия) мощностью 2000 *МВт* сжигает за сутки два железнодорожных состава угля [3].

Таблица 1. Доля энергии, вырабатываемой на электростанциях различного типа

<i>Тип электростанции или вид топлива</i>	<i>Доля, %</i>
Уголь	40,6
Газ	22,2
ГЭС	16,0
АЭС	12,9
Мазут	4,6
Другие	3,7

2. Разведанных запасов топлива для ядерных реакторов, а это, прежде всего, уран, больше, чем органического – при нынешних объемах энергопотребления органического топлива для тепловых станций хватит на десятки, ядерного – сотни лет [1].

3. Нормально работающая АЭС производит незначительные выбросы вредных веществ в атмосферу. Выбросы тепловых станций, содержащие сернистый газ, оксиды азота, оксиды углерода, углеводороды, альдегиды, огромны. Их масса составляет от 13 тысяч *тонн* в год для газовых до 165 тысяч *тонн* для угольных станций мощностью 1000 *МВт*. При этом из атмосферы потребляется около 10 миллионов *тонн* кислорода в год [3]. По данным ВОЗ выбросы угольных электростанций являются прямой или косвенной причиной каждой третьей смерти в развивающихся странах.

4. До недавнего времени стоимость единицы энергии, произведенной на АЭС [1], была меньше, чем для других электростанций, исключая ГЭС (рис. 2). В последние годы эта стоимость растет в связи со значительным повышением требований безопасности к реакторам и удорожанием их строительства. Следует учитывать, что в то же время растет цена нефти и газа для тепловых станций. Стоимость угольных станций нового типа с уменьшенными выбросами также возрастает, а возможности строительства крупных новых ГЭС практически исчерпаны.

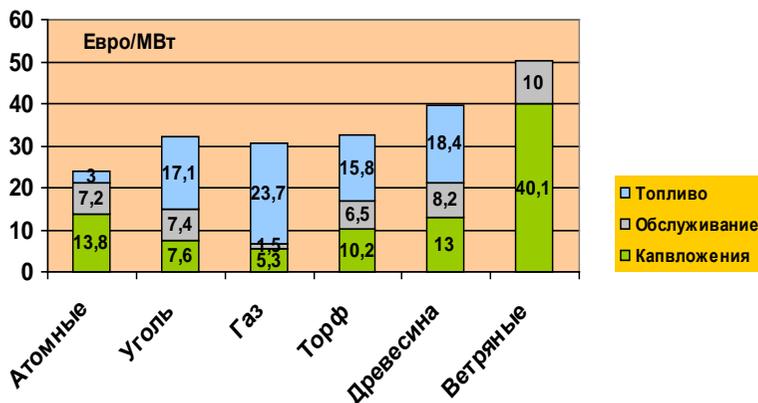


Рис. 2. Стоимость энергии, производимой на электростанциях (2001 г.)

Основные недостатки АЭС:

- до сих пор не удалось исключить возможность аварий с тяжелыми последствиями для природы и населения;
- не решены в полной мере проблемы с захоронением отходов ядерного топлива [4];
- вывод АЭС из эксплуатации растягивается на время, превышающее срок ее службы, который обычно составляет 30-60 лет; значительного опыта решения таких задач человечеством пока не накоплено [5,6].

Из имевших место серьезных аварий выделяются три: на АЭС Три-Майл-Айленд (шт. Пенсильвания США, 1979 г.), на Чернобыльской АЭС (СССР, 1986 г.), на АЭС «Фукусима-1» (Япония, 2011 г.). Каждая из этих аварий, помимо негативного воздействия на окружающую среду и население, в значительной мере сказалась на развитии самой атомной энергетики.

На АЭС Три-Майл-Айленд (*Three Mile Island*) отказ оборудования и ошибки операторов привели к расплавлению активной зоны реактора (см. раздел 1.5). Часть радиоактивных веществ была выброшена в атмосферу. Эта авария не привела к человеческим жертвам, тем не менее в США вплоть до 2013 года не строились новые АЭС.

После чернобыльской аварии такие страны, как Австрия, Италия, Польша, Швейцария, Голландия, Испания, Швеция, либо отменили свои атомные программы, либо приняли решение о за-

крытии своих АЭС. В большинстве стран Европы, а также в России и Украине фактически не было начато строительство ни одной новой атомной электростанции. Заметно сократилось финансирование программ атомной промышленности, начали свертываться научные исследования в этой области.

Рост цен на органическое топливо и угроза глобального потепления заставили мир заговорить об «атомном возрождении» [7]. По состоянию на 2012 год в дополнение к 435 реакторам, действующим в 30 странах мира (табл. 2), строились 66 новых АЭС (из них 26 – в Китае) [8]. В мире планировалось построить за 20 лет дополнительно 158 блоков. Над строительством еще более чем 300 энергоблоков страны размышляли, но о намерениях уже заявили. По оценкам Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) к 2025 году доля энергии, вырабатываемой на АЭС, могла бы достигнуть 44%.

Таблица 2. Число действующих в мире атомных реакторов (2012 г.)

США	104	Великобритания	16	Чехия	6	Бразилия	2
Франция	58	Китай	16	Швейцария	5	Болгария	2
Япония	50	Украина	15	Финляндия	4	Мексика	2
Россия	33	Швеция	10	Венгрия	4	Румыния	2
Корея	23	Германия	9	Словакия	4	Словения	1
Индия	20	Испания	8	Пакистан	3	Армения	1
Канада	18	Бельгия	7	Аргентина	2	Голландия	1
Всего: 435				ЮАР	2	Иран	1

Несомненно, авария на Фукусима-1 (см. раздел 1.7) приведет к пересмотру этих планов. Так, правительство Германии в 2011 году приняло решение прекратить к 2022 году эксплуатацию всех своих атомных электростанций (в 2011 году – 17 блоков, 26 % вырабатываемой электроэнергии). Правительство Швейцарии приняло аналогичное решение: закрыть до 2034 года все свои пять реакторов (39,5 % вырабатываемой энергии).

Уместно отметить, что по состоянию на 2014 год число реакторов в ряде стран уменьшилось: в США – на 4, Японии – на 8, Германии – на 8, Великобритании – на 3, Испании – на 1. В то же время в Китае построено 8 новых реакторов, Корею – 2, России, Индии, Канаде, Пакистане и Иране – по 1.

Можно предположить, что для стран, где в силу сложившихся реалий доля АЭС в общем объеме вырабатываемой электроэнергии велика, отказ от атомной энергетики будет затруднителен. В их числе Франция (75,2%), Словакия (53,5%), Бельгия (51,7%), Украина (48,6%), Армения (45%), Венгрия (43%) и др.

1.2. Сводка сведений из ядерной физики, необходимых для понимания этой книги

В состав **атома**, представляющего собой мельчайшую неделимую частицу любого химического элемента, входят положительно заряженное ядро и окружающие его электроны, обладающие отрицательным зарядом. Размер атома составляет около 10^{-10} м, размер ядра – примерно в 100 000 раз меньше (рис. 1).

Ядро состоит из **нуклонов**: положительно заряженных *протонов* и нейтральных *нейтронов*. Нуклоны – тяжелые частицы, их масса почти в 2000 раз больше массы электрона. Поскольку расстояния между протонами в ядре очень малы, они отталкиваются друг от друга гигантскими электрическими силами. Ядро существует благодаря тому, что эти силы отталкивания компенсируются силами притяжения, действующими между нуклонами, – **ядерными силами**.

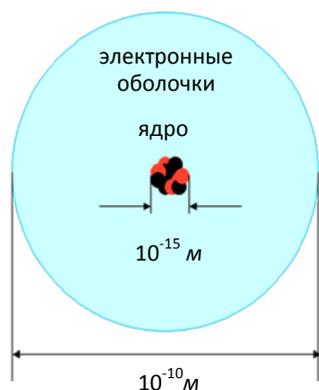


Рис. 3. Схема атома

Любое ядро можно характеризовать двумя числами: числом протонов **Z** и числом нейтронов **N**. Так как по величине заряд протона равен заряду электрона, а атом в целом электрически нейтрален, то **Z** одновременно означает число электронов в атоме и порядковый номер элемента в таблице Менделеева.

На практике вместо числа **N** используют **A** – **массовое число**, то есть суммарное число нуклонов $Z+N$. Так, запись $^{235}\text{U}_{92}$ означает ядро урана с числом протонов 92 и суммарным числом протонов и нейтронов 235. Правый нижний индекс в обозначении ядра можно опускать, потому что по обозначению элемента (**U**) в таблице Менделеева легко находится **Z** (92).

Каждый химический элемент имеет несколько разновидностей. Для любой из них число протонов одинаково, как и должно быть для определенного элемента, а число нейтронов и, соответ-

венно, массовое число – различно. Эти разновидности, отличающиеся только числом нейтронов, называют *изотопами*, а в случае, когда речь идет о ядрах, – *нуклидами*. Простейший элемент – водород – имеет три разновидности: обычный водород ${}^1\text{H}_1$, дейтерий ${}^2\text{H}_1$, тритий ${}^3\text{H}_1$. У более тяжелых элементов число изотопов достигает нескольких десятков.

Некоторые изотопы, точнее их ядра – нуклиды, с течением времени испытывают самопроизвольный распад, то есть превращаются в другие нуклиды с испусканием излучения. Это явление называется **радиоактивным распадом**. К основным разновидностям радиоактивного распада относятся альфа- и бета-распад.

При **альфа-распаде** ядро испускает совокупность двух нейтронов и двух протонов, называемую *альфа-частицей*. Нетрудно понять, что α -частица представляет собой ядро атома гелия ${}^4\text{He}_2$. В результате образуется дочернее ядро с числом протонов на 2, а массовым числом – на 4 меньше. Альфа-частицы, испущенные множеством ядер, образуют **альфа-излучение**.

Бета-распад обусловлен тем, что нуклоны в ядре испытывают взаимопревращение. Так, любой нейтрон может превратиться в протон, электрон и *антинейтрино*: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. Возможен и процесс превращения протона в нейтрон, позитрон (античастицу к электрону) и *нейтрино*: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$. Нейтрино и антинейтрино – частицы, вначале введенные физиками чисто умозрительно для того, чтобы в обоих превращениях выполнялись законы сохранения, присущие ядерной физике. Эти частицы не обладают ни зарядом, ни массой, что существенно затруднило их экспериментальное обнаружение. После того как оно состоялось, выяснилось, что нейтрино играют важную роль в процессе существования вселенной.

Бета-распад с испусканием электрона характерен для нуклидов, имеющих избыток нейтронов по сравнению со стабильными ядрами данного элемента. Так как при этом нейтрон превращается в протон, то для дочернего ядра число Z возрастает на единицу, а массовое число не меняется. Испускаемый ядром электрон имеет скорость, соизмеримую со скоростью света, и называется *бета-частицей*. Совокупность таких электронов, испущенных множеством радиоактивных ядер, образует **бета-излучение**.

После альфа- или бета-распада ядро может возникнуть в состоянии с избыточной энергией – **возбужденном состоянии**. Избыток энергии высвобождается спустя очень короткое время путем испускания **гамма-излучения**. Гамма-излучение можно рассматривать двояко: как электромагнитное излучение очень большой час-

тоты (*жесткое*), или как поток частиц – *гамма квантов*, не имеющих заряда и массы покоя. При переходе ядра из возбужденного состояния в основное число протонов и нейтронов не изменяется, поэтому такой процесс не является распадом. Гамма-излучение часто сопровождает процессы альфа- или бета-распада.

Радиоактивное ядро может распасться в произвольный момент времени, при этом вероятность распада ядра в единицу времени одинакова для всех нуклидов одного сорта. Отсюда вытекает, что число распадов за единицу времени в образце вещества, содержащем множество радионуклидов, пропорционально их числу. В этом состоит сущность **закона радиоактивного распада**. Его следствием является убывание числа радионуклидов N в образце по закону геометрической прогрессии. Этот процесс удобно описывать **периодом полураспада T** – временем, за которое содержание радионуклидов в образце уменьшается в два раза (рис.4). Понятно, что за два периода полураспада число радионуклидов уменьшится в 4 раза, за три – в восемь и т.д.

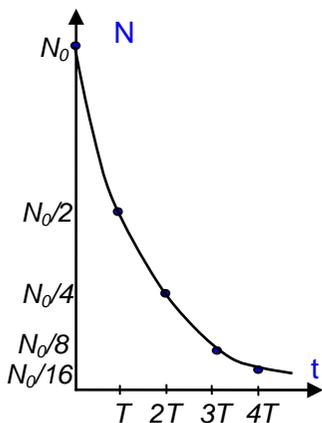


Рис. 4. Графическое представление закона радиоактивного распада

Для характеристики радиоактивных образцов используется физическая величина, называемая *активностью*. **Активность** одновременно характеризует быстроту распада радионуклидов в образце, интенсивность испускаемого им излучения, а в соответствии с законом радиоактивного распада и содержание в нем радионуклидов. Современная единица измерения активности – *1 беккерель (Бк)*. Такой активностью обладает образец, в котором за 1 с происходит один ядерный распад. Устаревшая единица активности – *кюри (Ки)*. Она соответствует активности 1 г радия и равна $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

С целью описания воздействия излучений на человека используется понятие *доза облучения*. Базовая величина дозиметрии – поглощенная **доза** – численно равна энергии излучения, поглощенной в единице массы объекта. Единица ее измерения – *1 грэй = 1 Дж/кг*. Зная поглощенную дозу, с помощью специальных коэффициентов можно вычислить т. н. **эффективную дозу облучения**, которая приме-

нима ко всему телу, учитывает как тип излучения (α , β , или γ), так и неодинаковую чувствительность разных органов и тканей человеческого тела к излучению. Эффективная доза измеряется в *зивертах* ($Zв$), эта величина наиболее полно описывает воздействие малых доз облучения на человека. В случае больших доз корректнее использовать поглощенную дозу в грэях, тем не менее, далее по тексту книги автор решил представлять все дозы в единообразных единицах измерения (*зивертах*), что не сильно исказит суть информации. Полезно знать, что смертельная доза примерно равна $10 Zв$, а дозу, составляющую менее $1 мЗв$ (*миллизиверта*) в год, принято считать безопасной для человека.

Доза зависит от характеристики и расположения источника излучения (*уровня радиации*) и растет с увеличением времени облучения. Поэтому отношение дозы ко времени, называемое **мощностью дозы** (МД), можно использовать для описания уровня радиации. Основным режимом работы любого *дозиметра* является измерение именно мощности дозы. В качестве единиц измерения МД используют $1 мкЗв/час$ (*микрзиверт в час*) или более крупные единицы. Уровень естественной (фоновой) радиации от гамма-излучения примерно равен $0,1 мкЗв/час$. Устаревшая, но действовавшая в период чернобыльской аварии единица измерения дозы гамма или рентгеновского излучения – 1 *рентген* (P), а мощности дозы – $1 мкP/час$. При этом можно полагать, что $1 P = 0,01 Zв$, а $1 мкP/час = 0,01 мкЗв/час$. Подробнее о дозах и единицах их измерения пойдет речь в 2.18.

Воздействие ядерных излучений характеризуют **ионизирующей способностью**. **Ионизация** – процесс, в результате которого из атома вещества под воздействием излучения выбивается электрон, а сам атом превращается в положительный ион. Ионизация приводит к изменениям в биологических объектах и наносит вред живому организму. Все три рассмотренных типа излучений относят к *ионизирующим*, причем альфа-излучение обладает очень высокой ионизирующей способностью, бета – высокой, гамма – низкой.

В плане **проникающей способности** для альфа- и бета-излучения, как и для всех заряженных частиц, можно ввести понятие *максимального пробега в веществе*. Заряженные частицы замедляются веществом, они теряют свою энергию вплоть до полной остановки. Это означает, что для таких излучений всегда можно подобрать слой вещества – *экран*, который их не пропустит. Альфа-излучение обладает очень низкой проникающей способностью: от него можно защититься всего лишь слоем бумаги. У бета-

излучения проникающая способность низкая, в большинстве случаев роль экрана может сыграть лист пластика, фанеры и даже алюминиевая фольга.

Гамма-излучение обладает высокой проникающей способностью. Подобрать экран, полностью от него защищающий, нельзя. Причина в том, что гамма-кванты всегда движутся со скоростью света и, следовательно, не могут замедляться в веществе (а могут либо поглощаться, либо рассеиваться). Убыль гамма-квантов при прохождении через слой вещества пропорциональна толщине этого слоя. Поэтому по аналогии с периодом полураспада можно ввести понятие *слой половинного ослабления*. Каждый такой слой снижает интенсивность гамма-излучения в два раза. После прохождения второго слоя интенсивность снизится еще вдвое, а всего – в четыре раза. Для трех слоев будет достигнуто ослабление в 2^3 , то есть в 8 раз, и т.д. Слой половинного ослабления в воздухе – около 150 м, в воде – 18 см, а в свинце – 1 см.

1.3. Как работает атомная станция

Общим для АЭС и обычных тепловых станций является нагрев вещества, которое называется **теплоносителем**, с последующим превращением его тепловой энергии в механическую, а затем электрическую. Обычно теплоносителем служит вода.

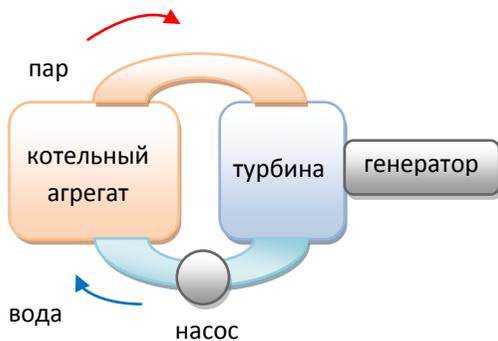


Рис. 5. Упрощенная схема электростанции

Обычно теплоносителем служит вода.

В **котлоагрегате** (на АЭС это **реактор**, или, как говорят ядерщики, просто «котел») вода нагревается и превращается в пар, который подается на турбину (рис. 5). Турбина вращает ротор генератора, который вырабатывает электричество.

Отработавший пар конденсируется, а полученная вода насосом снова подается к источнику тепла. Основные различия между станциями разного типа – в источнике тепла для нагрева воды и устройстве котла.

В АЭС вода нагревается за счет *цепной ядерной реакции деления*.

Ядерную реакцию деления открыли немецкие физики Отто Ган и Фриц Штрассман. В конце 1938 года они получили неожиданный результат: при бомбардировке урана нейтронами образуется барий, массовое число которого почти вдвое меньше, чем у урана. Верное объяснение результатам эксперимента было дано в январе 1939 г. Лизой Мейтнер и Отто Фришем. Ими было установлено, что под действием нейтрона ядро урана может расщепиться на два более легких ядра – осколка с испусканием 2–3 новых нейтронов [9].

В феврале 1939 года Нильс Бор выдвинул предположение, что делиться способен только изотоп урана с массовым числом 235. Стало понятно, что при захвате одного нейтрона из ^{235}U образуется нестабильный уран-236 (рис. 6), который быстро делится на осколки с выделением двух или трех нейтронов, гамма-лучей и высвобождением энергии, например,



Для понимания записей такого вида следует обратить внимание на то, что суммарное число протонов и суммарное число нейтронов после каждого превращения не меняются.

Позднее выяснилось, что под воздействием нейтрона способно делиться

практически любое тяжелое ядро. Однако для подавляющего большинства элементов деление возможно только при энергии нейтрона, превышающей некоторое пороговое значение. Возможность же практического использования ядерной энергии обусловлена существованием элементов, ядра которых делятся под воздействием нейтронов любой энергии, в том числе сколь угодно малой. Вещества, обладающие подобным свойством, называются **делящимися веществами**. Таким образом, более точная формулировка гипотезы Бора состоит в том, что ^{235}U – делящийся изотоп.

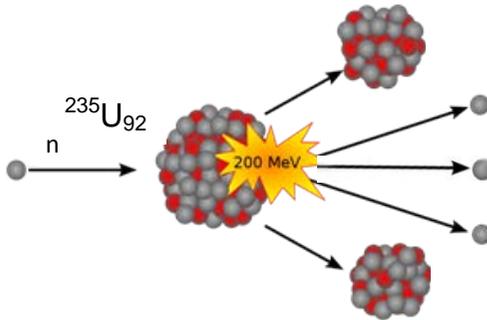


Рис. 6. Ядерная реакция деления

Основными чертами ядерной реакции деления являются:

- **огромная высвобождаемая энергия;**
- **радиоактивность осколков деления.**

Энергетический эффект реакции можно рассчитать по знаменитому уравнению Эйнштейна $E = mc^2$, где m – разность масс объектов, стоящих в левой и правой части реакции деления. Оказалось, что при делении одного ядра ^{235}U высвобождается около 200 МэВ энергии ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$). Для сравнения: при сжигании обычного топлива в пересчете на один его атом выделяются единицы электрон-вольт энергии.

В ходе деления урана-235 может образовываться множество различных пар осколков (обычно неравной массы) с Z от 30 (цинк) до 64 (гадолиний) и массовыми числами от 72 до 161. Им передается часть энергии деления в виде как кинетической, так и внутренней или т. н. *энергии возбуждения*. Более 80% высвобождаемой энергии составляет кинетическая энергия осколков.

Пониманию механизма выделения энергии при делении ядер способствуют следующие простые рассуждения. Уже отмечалось, что в ядрах силы электрического отталкивания протонов компенсируются ядерными силами притяжения. Однако ядерные силы являются короткодействующими и при расстояниях между нуклонами порядка диаметра нуклона они становятся пренебрежимо малыми. Поэтому, как только наметилось возникновение осколков, ядерные силы притяжения между ними резко уменьшаются и начинают играть преобладающую роль кулоновские силы отталкивания. Они очень велики в силу малости расстояния между осколками. В результате осколком сообщается огромная кинетическая энергия.

Отношение числа нейтронов к числу протонов в ядре ^{235}U равно 1,55. У стабильных элементов, имеющих массу, близкую к массе осколков деления, это отношение составляет 1,25–1,45. Следовательно, осколки деления сильно перегружены нейтронами и являются нестабильными. Практически мгновенно они испускают 2 или 3 нейтрона (в среднем около 2,3), а остатки энергии возбуждения идут на испускание гамма-квантов. Но и после этого осколки имеют избыток нейтронов, а значит, могут испытывать бета-распад. До достижения стабильного (невозбужденного) состояния обычно проходит серия последовательных β -распадов.

Следует учитывать, что осколки уносят за собой только часть электронов исходного атома, и поэтому представляют собой многозарядные ионы. Часть их энергии передается атомам

среды путем ионизации и возбуждения. В конечном итоге осколки тормозятся и превращаются в нейтральные атомы, называемые **продуктами деления**, а высвобожденная энергия очень быстро превращается в тепло.

Особо следует подчеркнуть факт испускания в результате деления 2–3 нейтронов, ведь каждый из них способен вызвать следующие реакции деления. При определенных условиях, прежде всего, при наличии многих ядер делящегося вещества (^{235}U), возможна **цепная ядерная реакция деления** (рис. 7). В этом случае процесс распространяется лавинообразно и с мгновенной скоростью высвобождает гигантское количество энергии.

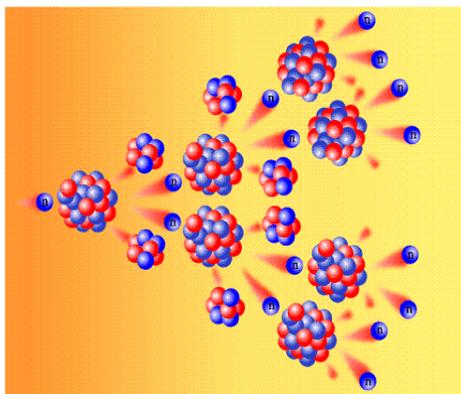


Рис. 7. Цепная ядерная реакция

Для деления его ядер нейтроны должны обладать довольно большой энергией, превышающей порог в $1,4 \text{ МэВ}$. Заметим также, что с делением конкурируют другие процессы взаимодействия нейтронов с ядрами, в частности, *неупругое рассеяние*, которое сопровождается испусканием гамма-квантов. Энергия испытавших такое рассеяние нейтронов становится ниже пороговой, и они уже не могут вызвать деление. **Преобладающая же часть возникающих в ходе реакции деления нейтронов испытывает радиационный захват ядрами ^{238}U , превращая их в ^{239}U .** Таким образом, большинство нейтронов либо поглощается ураном-238, либо вылетает наружу. Поэтому цепная реакция в природном уране, как, впрочем, и в чистом уране-238, не развивается.

Осознание этих фактов несколько умерило оптимизм тех ядерщиков, которые считали, что открыт скорый путь для использования энергии ядра.

Развитию цепной реакции препятствуют две основные причины: **поглощение нейтронов ядрами без испускания вторичных нейтронов** и уход нейтронов за пределы рабочего вещества, поддерживающего цепной процесс.

Здесь уместно отметить, что в природном уране содержится только 0,7% делящегося урана-235, практически вся оставшаяся часть – это ^{238}U . Для деления

1.4. Немного о физике и истории реакторов

Тем не менее, физики многих стран мира, особенно Германии, Англии, Франции и США, продолжали упорно работать над извлечением ядерной энергии [10].

Так, в 1939 году работающими в США венгром Лео Силардом и итальянцем Энрико Ферми была высказана идея, что цепной реакции можно достичь путем помещения ядер природного урана в вещество, которое могло бы *замедлить* нейтроны, не поглощая их. Суть идеи в том, что «медленные», то есть с невысокой энергией, нейтроны практически не поглощаются ядрами ^{238}U , а значит, перестают выбывать из цепной реакции.

В декабре 1939 года выдающийся физик Вернер Гейзенберг представил руководству немецкой армии секретный доклад «О возможности технического получения энергии при делении урана». В нем было указано, что для выработки энергии можно использовать обычный уран, если соединить его с веществом – замедлителем нейтронов. Как отмечалось в докладе, «...при смеси уран – тяжелая вода в шаре радиусом около 60 см, окруженном водой (около 1000 кг тяжелой воды и 1200 кг урана), начнется спонтанное выделение энергии».

В докладе также отмечалось, что есть другой способ извлечения ядерной энергии, который состоит в **обогащении** природного урана изотопом ^{235}U , то есть повышении концентрации ^{235}U при соответствующем снижении доли ^{238}U в рабочем веществе. Именно такой метод представлялся наиболее подходящим для создания взрывного устройства колоссальной мощи.

Обогащение природного урана оказалось сопряженным с серьезными трудностями. Для создания ядерного оружия требовалось выделение ^{235}U практически в чистом виде, причем в количестве десятков килограмм. Даже опытным экспериментаторам это казалось недостижимым. Дело в том, что изотопы одного и того же элемента тождественны по своим химическим свойствам. Следовательно, путь лежал только в использовании ничтожных различий атомов ^{235}U и ^{238}U по своим физическим свойствам: например, размерам и массе.

Для практической реализации обогащения были предложены, в частности, методы *газовой диффузии* и *газового центрифугирования*. Оба метода требовали предварительного превращения урана в газообразную фазу (например, гексафторид урана) и оказались чрезвычайно затратными. Различие в массе изотопов ^{235}U и ^{238}U со-

ставляет 3 нейтрона, и это лишь около 1,28%. На такую, а на практике еще меньшую долю, увеличится содержание урана ^{235}U при одной прогонке через ту или иную систему разделения. Следовательно, для приемлемого **обогащения** природного урана ураном-235 требуются тысячекратные повторения циклов (рис. 8).



Рис. 8. Каскад центрифуг для обогащения урана

Возможность же развития цепной реакции в природном уране, причем не обязательно взрывного характера, базируется на как можно более быстром снижении энергии нейтронов, испущенных ^{235}U , до таких значений (единицы эВ и меньше), при которых они практически не поглощались бы ядрами ^{238}U . Для получения таких *медленных* или *тепловых* нейтро-

нов требуются специальные вещества – **замедлители**.

Одним из приемлемых замедлителей является водород в составе воды. Масса его ядра (протона) почти равна массе нейтрона, и, следовательно, при соударении с ним нейтрон теряет практически всю свою энергию. Но обычный водород слишком сильно поглощает нейтроны. Поэтому более подходящим замедлителем, несмотря на почти в два раза большую массу, оказывается *дейтерий* (D, тяжелый водород), входящий в состав *тяжелой воды* D_2O . Такой замедлитель эффективнее обычной воды, так как значительно меньше поглощает нейтроны. Кроме дейтерия было найдено еще лишь одно вещество, эффективно замедляющее, но не поглощающее нейтроны – углерод в составе графита высокой степени очистки.

На этом пути была обнаружена новая возможность для создания ядерного взрывного устройства. Оказалось, что поглощение нейтронов ураном-238, которое препятствует цепной реакции в природном уране, приводит к образованию нового элемента с массовым числом 239, названного позднее **плутонием**. При этом из ^{238}U образуется ^{239}U , а из него после двух β -распадов плутоний-239: $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$. Самое главное при этом, что ^{239}Pu – **делящийся изотоп**. Так родилась идея создания атомного

реактора – «котла» для приготовления оружейного плутония из природного урана. Именно на это и были направлены усилия Л. Силарда и Э. Ферми.

Извлечение плутония из продуктов работы реактора оказалось не такой сложной задачей, как обогащение урана, ведь для такого выделения можно использовать химические методы. Оказалось также, что *критическая масса* плутония, необходимая для создания взрывного устройства, примерно на порядок меньше, чем для урана-235.

Критическая масса – минимальное количество делящегося вещества, необходимое для начала самоподдерживающейся цепной реакции деления. Для высокообогащенного урана значение критической массы составляет около 52 кг, для плутония-239 – 11 кг. Критическую массу можно уменьшить примерно вдвое, окружив образец делящегося вещества слоем материала, отражающего нейтроны, например, бериллия или природного урана.

Существование критической массы легко объяснить. Дело в том, что число образующихся при делении нейтронов пропорционально объему, то есть кубу размера вещества, а число теряющихся нейтронов – площади поверхности, то есть квадрату размера. Поэтому, начиная с определенного размера, когда нейтронов больше рождается, чем выбывает, реакция лавинообразно ускоряется, что приводит к ядерному взрыву.

Позднее выяснилось, что кроме ^{238}U и ^{239}Pu **есть еще одно делящееся вещество – уран-233**. Подобно тому как ^{239}Pu получается из урана-238, ^{233}U получается в реакторах из тория-232. Отличие в том, что в урановой руде содержится 0,7% делящегося урана-235, а в ториевой нет делящихся изотопов, поэтому при производстве урана-233 к торию необходимо добавлять обогащенный делящийся изотоп.

Пути дальнейших исследований в разных странах разошлись. В Германии под руководством В. Гейзенберга в основном развивались исследования цепной реакции в природном уране с использованием в качестве замедлителя тяжелой воды, производство которой было налажено в оккупированной Норвегии. Эксперименты по обогащению урана и использованию в качестве замедлителя графита в силу ряда причин оказались неудачными.

Среди союзников зрело беспокойство по поводу возможного создания ядерной бомбы немцами. В США это беспокойство подержали ученые во главе с эмигрировавшим из Германии Альбертом Эйнштейном. Это привело к развертыванию с 1943 года сек-

ретного т.н. «манхэттенского проекта». Целью проекта, возглавляемого физиком Робертом Оппенгеймером и генералом Лесли Гровсом, ставилось создание ядерного оружия. Работа развивалась в двух основных направлениях: с использованием высокообогащенного (до 80-90%) урана-235 и плутония-239.

Для наработки нужного количества этих веществ потребовалось строительство как чрезвычайно сложных производств по обогащению природного урана, так и ядерных реакторов для получения плутония из урана-238. Первый в мире ядерный реактор был запущен в 1942 году в Чикаго под руководством Энрико Ферми.

Реактор представлял собой послойно уложенные блоки из высокоочищенного графита общей массой 350 т (рис. 9). Блоки

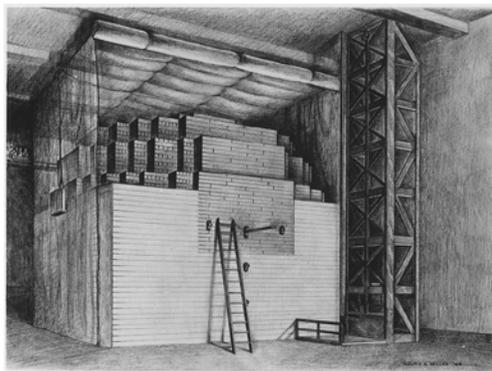


Рис. 9. Реактор Ферми

каждого второго слоя имели полости для ядерного топлива, образующие кубическую решетку с шагом около 21 см. В качестве топлива использовался природный (необогащенный) уран в виде прессованных оксидов (33 т UO_2 и 3,7 т U_3O_8) и металлических слитков общей массой около 5,6 тонн. Для управления реакцией служили перемещаемые в реак-

торе стержни из кадмия и бора, сильно поглощающие нейтроны.

Стержнями управляли с пульта в ручном и автоматическом режиме. Специальный стержень аварийной защиты подвешивался на веревке, которую можно было перерубить в случае чрезвычайной ситуации. Падающий в реактор стержень должен был надежно заглушить ход цепной реакции. Из-за незамысловатой конструкции реактор называли *Chicago Pile* (английское слово *pile* означает «штабель», «поленница»).

В октябре 1943 года был пущен первый экспериментальный уран-графитовый реактор **X 10** по наработке плутония (Оак-Ридж, штат Теннесси) [11].

Первым промышленным реактором по производству плутония для ядерных бомб стал уран-графитовый реактор **B** в Хэнфорде (штат Вашингтон). Реактор мощностью 250 МВт, производительностью 6 кг плутония в месяц был пущен в 1944 году (рис. 10). Он

содержал около 200 тонн необогащенного урана, 1200 тонн графита и охлаждался водой со скоростью 5 куб. м/мин.



Рис. 10. Реактор В

На завершающей стадии манхэттенского проекта были созданы три ядерных взрывных устройства. Плутониевый стационарный заряд «Тринити» был взорван при первом ядерном испытании 16 июля 1945 года близ города Аламогордо на севере штата

Нью-Мексико. Урановая бомба «Малыш» была сброшена на Хиросиму 6 августа 1945 года, плутониевая «Толстяк» – на Нагасаки 9 августа 1945 года.

Отметим, что производство плутония очень затратное. Один килограмм плутония в наши дни стоит несколько миллионов долларов. Стоимость высокообогащенного урана – примерно раз в 5 меньше.

Успеху манхэттенского проекта способствовали как щедрое финансирование, так и бегство в США вследствие фашистского геноцида ряда выдающихся европейских ученых. Следует отметить вклад английских физиков, передавших в США все свои разработки в области ядерной области.

В СССР разработкой ядерного оружия занимался Специальный комитет при Совете Министров СССР, руководимый Л. П. Берией. Общее научное руководство осуществлял Игорь Васильевич Курчатов. Системные работы начались только после войны. Первый советский реактор Ф-1 заработал 25 декабря 1946 года. Он состоял из графитовых блоков и имел форму шара диаметром примерно 7,5 м, в отверстиях которого размещались урановые стержни (рис. 11). Реактор не имел системы охлаждения, поэтому работал на уровнях мощности около ватта.

Первый промышленный реактор А-1 [11] мощностью 100 МВт был пущен 19 мая 1948 г. в Челябинске-40 на химкомбинате «Маяк», (ныне г. Озерск Челябинской области). К лету



Рис. 11. Реактор Ф-1

1949 года из облученного в нем урана было выделено примерно 4 кг плутония. Из него под руководством Юлия Борисовича Харитона в Арзамасе-16 (ныне – Саров) была изготовлена ядерная бомба, испытанная 23 сентября 1949 года на полигоне под Семипалатинском.

27 июня 1954 года в г. Обнинске

вступила в строй первая в мире атомная электростанция с реактором АМ-1 [12] электрической мощностью 5 МВт (рис. 12). Один из разработчиков первой АЭС – академик Андрей Капитонович Красин, лауреат Ленинской премии, в 1965 году создал и по 1977 год возглавлял Институт ядерной энергетики АН БССР. В 70–80-х годах сотрудниками института был создан и испытан уникальный мобильный (на колесах) ядерный реактор «Памир» [13].



Рис. 12. Первая АЭС: внешний вид и реакторное отделение

За рубежом первая АЭС мощностью 46 МВт была введена в эксплуатацию в 1956 году в Колдер-Холле (Великобритания). Через год вступила в строй АЭС мощностью 60 МВт в Шиппингпорте (США).

1.5. Разновидности реакторов для АЭС. Водо-водяные (PWR) реакторы. Авария на АЭС Три-Майл-Айленд

Известны десятки разновидностей ядерных реакторов, но для выработки электроэнергии на АЭС используется лишь несколько основных типов [14] (табл. 3).

Наиболее распространены PWR (*Pressurised Water Reactor*), или **водо-водяные реакторы**. Свое название они получили вследствие того, что в качестве и замедлителя нейтронов, и теплоносителя используется обычная вода. Первоначально такие реакторы разрабатывались для подводных лодок. Первая АЭС с PWR была запущена в США (Шиппингпорт) в 1957 году, первый советский ВВЭР мощностью 210 МВт был пущен в 1964 году на Нововоронежской АЭС.

Вода в реакторе циркулирует в двух *контурах* (рис. 13). В одном из них, проходящем через сам реактор, она находится под давлением около 160 атм, благодаря чему не закипает, нагреваясь почти до 290°C. Циркуляцию воды через первый контур обеспечивают **главные циркуляционные насосы** (ГЦН) с производительностью около 20 000 м³/ч и мощностью свыше 5 МВт. Для поддержания постоянства давления и компенсации изменений объема воды при ее разогреве или охлаждении используется специальный *компенсатор давления*.

В *парогенераторе* вода первого контура проходит примерно через 10 000 теплопередающих трубок, нагревая воду второго контура. Находясь под меньшим давлением, она закипает, а образовавшийся пар подается на турбину. Из отработанного пара в *конденсаторе* снова образуется вода. Для охлаждения конденсатора используется вода из внешнего водоема либо *градирни* (башня обычно в виде гиперболоида или усеченного конуса). В градирне большое количество стекающей вниз горячей воды охлаждается встречным потоком атмосферного воздуха.

С целью предотвратить попадание радиоактивных продуктов цепной ядерной реакции (осколки деления и трансураниевые элементы) в окружающую среду такая АЭС имеет несколько **барьеров защиты**. Во-первых, это герметичный **корпус реактора**, который изготавливается из прочной стали толщиной около 20 см. **Двухконтурная схема** получения пара ограничивает распространение радионуклидов в случае аварийного разрыва первого контура. Современные реакторы этого типа обязательно имеют и третий защитный барьер – *гермооболочку* или *контейнмент* (*Containment*).

Таблица 3. Разновидности энергетических реакторов

Международное название (МАГАТЭ)	Русское название	Распространенность в мире	Топливо, % ^{235}U	Замедлитель	Теплоноситель	Особенности
PWR <i>Pressurised Water Reactor</i>	<i>Реактор с водой под давлением, ВВЭР – водородяной энергетический реактор</i>	61% (США, Франция, Япония, Россия, Китай)	3-5	вода	вода	Стальной корпус и бетонная оболочка. Два контура, вода кипит во втором контуре
BWR <i>Boiling Water Reactor</i>	<i>Кипящий реактор</i>	21% (США, Япония, Швеция)	2-3	вода	вода	Стальной корпус и бетонная оболочка. Один контур, в котором вода превращается в пар
PHWR <i>Pressurised Heavy Water Reactor (CANDU)</i>	<i>Тяжеловодный ядерный реактор</i>	9% (Канада)	0,7	тяжелая вода	тяжелая вода	Двухконтурный, с бетонной оболочкой
LWGR <i>Light Water Graphite reactor</i>	<i>РБМК Реактор большой мощности канальный</i>	3% (Россия)	2	графит	вода	Бескорпусный, без бетонной оболочки, одноконтурный
GCR <i>Gas-cooled Reactor</i>	<i>Охлаждаемый газом реактор</i>	2% (Великобритания)	0,7	графит	CO ₂	Стальной корпус в бетонной оболочке, двухконтурный
AGR <i>Advanced Gas-cooled Reactor</i>	<i>Усовершенствованный охлаждаемый газом реактор</i>	3% (Великобритания)	2,3	графит	CO ₂	Бетонный котел высокого давления, двухконтурный

Контеймент – герметичное сооружение, изготавливаемое из сверхпрочного железобетона толщиной не менее метра. Обычно

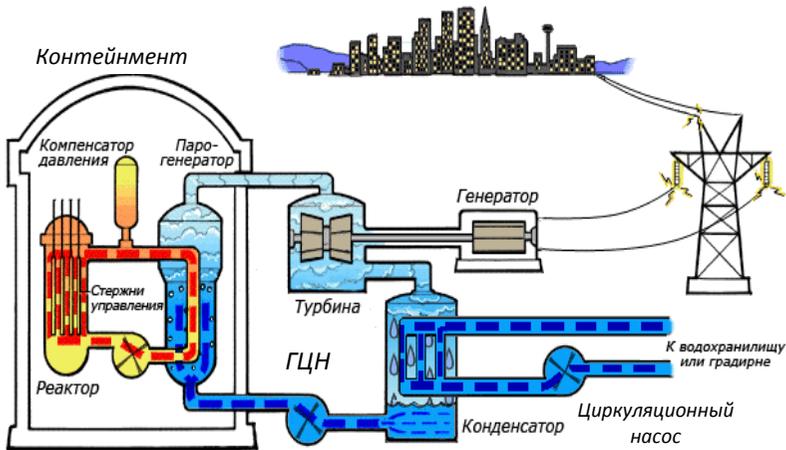


Рис. 13. Схема АЭС с водо-водяным реактором

имеется и негерметичная часть; она окружает оболочку и называется *обстройкой*. К параметрам контейнента в последние годы предъявляются повышенные требования. Следует отметить, что во многом благодаря контейненту последствия ядерной аварии на АЭС Три-Майл-Айленд не приняли катастрофического характера.

Второй блок АЭС Три-Майл-Айленд представлял собой реактор с двухконтурной системой охлаждения мощностью 906 *MВт*. Первопричиной аварии, произошедшей 28 марта 1979 года примерно в 4:00, стал отказ питательных насосов во втором контуре системы охлаждения реактора [15]. Автоматически отключился турбогенератор и включилась аварийная система подачи питательной воды в парогенераторы. Однако, несмотря на работоспособность всех трех аварийных насосов, вода в парогенераторы не поступала. Позднее выяснилось, что после завершения планового ремонта, проходившего на блоке за несколько дней до аварии, были закрыты задвижки насосов.

В дальнейшем операторы допустили ряд ошибок, которые серьезно ухудшили ситуацию и привели к перегреву активной зоны реактора. Как потом было признано, эти ошибки возникли из-за перегрузки операторов информацией, часть которой вовсе не относилась к ситуации, а часть была просто неверной. После аварии бы-

ли внесены изменения в блоки управления реактором и систему подготовки операторов.

Хотя в результате аварии ядерное топливо частично расплавилось, радиоактивные вещества в основном остались внутри контейнента. В атмосферу попали радиоактивные газы, выброшенные через предохранительный клапан. Однако выброс наиболее опасных нуклидов, таких как йод-131, был незначительным. Было решено, что в эвакуации населения, проживавшего рядом со станцией, нет необходимости, при этом губернатор Пенсильвании рекомендовал покинуть пятимильную зону беременным женщинам и детям дошкольного возраста. Средняя эффективная доза облучения для людей, живущих в 10-мильной зоне, составила 80 мкЗв и не превысила 1 мЗв для любого из жителей.

Работа по устранению последствий аварии осуществлялась в период с 1979 по 1993 год, она обошлась в 975 миллионов долларов США. Были проведены выгрузка топлива из реактора и дезактивация территории станции. Эксплуатация непострадавшего первого блока станции возобновилась в 1985 году.

После Три-Майл-Айленда в мире не происходило серьезных аварий на водо-водяных реакторах, поэтому они считаются наиболее безопасными. В отличие от них реактор РБМК не обладал тремя важнейшими ступенями защиты: мощным корпусом, контейнментом и двухконтурной схемой генерации пара.

К одному из защитных барьеров относят и корпуса *тепловыделяющих элементов* (ТВЭЛов). **ТВЭЛ** представляет собой герметичную трубку, которая заполняется урановым топливом. Материал трубки должен быть прочным, хорошо пропускающим нейтроны, устойчивым к воздействию воды, высокой температуры и радиации. Обычно с этой целью используется цирконий, легированный ниобием. Для российского реактора ВВЭР-1000 наружный диаметр трубки составляет 9,1 мм, длина – 3,8 м, толщина оболочки – 0,65 мм.

Топливо изготавливается в виде т. н. *таблеток* из керамической двуокиси урана (температура плавления $2800 \text{ }^\circ\text{C}$), обогащенного ураном-235 до 3–5% (рис. 14). Такое относительно высокое обогащение необходимо ввиду того, что используемая в водо-водяных реакторах вода является не лучшим замедлителем нейтронов.

Таблетки с топливом, разумеется, радиоактивны, но огромный период полураспада ^{238}U и ^{235}U (4,5 и 0,7 млрд. лет, соответственно) делает их радиоактивность незначительной. Активность одного грамма ^{238}U составляет всего 12 *кБк*, ^{235}U несколько выше – 78 *кБк*. Распадаясь, эти изотопы испускают альфа-излучение, которое обладает очень низкой проникающей способностью. Оно полностью поглощается в поверхностном ороговевшем слое кожи, поэтому не опасно при внешнем облучении. Однако в работающем реакторе под действием сильного потока нейтронов именно в таблетках накапливаются радионуклиды – продукты ядерного распада, обладающие колоссальной активностью.



Рис. 14. Таблетка с урановым топливом

1.6. Реактор ВВЭР-1000 и его усовершенствованный вариант ВВЭР-1200

Устройство типичного водо-водяного реактора ВВЭР-1000 (Россия) мощностью 1000 *МВт* представлено на рис. 15 [16]. В активной зоне реактора, то есть в нижней части его стального корпуса находятся ТВЭЛы, сгруппированные в 163 *тепловыделяющие сборки* (ТВС).

ТВС – достаточно сложные устройства. Каждая состоит из 312 ТВЭЛов и имеет 18 трубчатых каналов для ввода *поглощающих стержней*. Именно в виде ТВС ядерное топливо поступает на АЭС и загружается в реактор. Периодически реактор останавливается, и отработавшие сборки заменяют новыми. При этом полностью изменяется расстановка всех ТВС в активной зоне реактора.

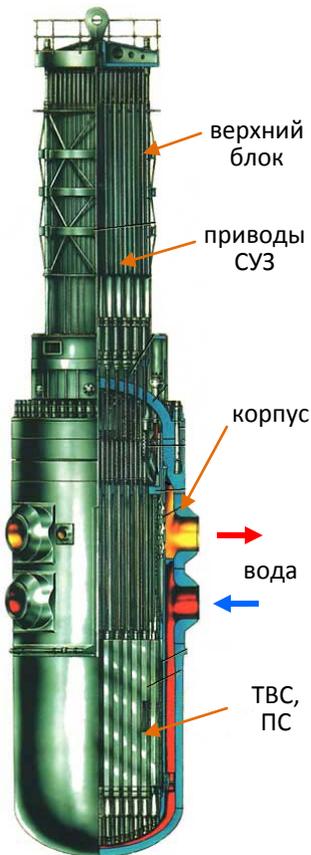


Рис. 15. Реактор ВВЭР-1000

Основу системы управления и защиты (СУЗ) составляют подвижные **поглощающие стержни (ПС)**. Они представляют собой тонкостенные трубки диаметром 8,2 мм, которые выполнены из циркония и на длину около 3,7 м заполнены карбидом бора, очень сильно поглощающим нейтроны. Стержни объединены в пучки, или *кластеры* по 18 стержней в каждом. Кластеры снабжены штангами, которые через специальные трубы выведены в верхний блок реактора. Там на них воздействуют **приводы** из шаговых двигателей на основе электромагнитов. Один привод перемещает весь кластер, который по направляющим каналам может двигаться внутри тепловыделяющей сборки. Все ТВС оснащены каналами для

входа ПС, но практически в реакторе работает 61 кластер.

В крайнем нижнем положении поглощающие стержни находятся между ТВЭЛами, препятствуя развитию цепной ядерной реакции. Когда же ПС находятся в верхней части реактора, они не мешают ходу реакции деления. Таким образом, перемещая стержни, можно управлять мощностью реактора.

Вертикальное расположение стержней и их управление электромагнитами обеспечивают эффективную защиту при авариях. При обесточивании электромагнитов, удерживающих кластеры, они падают вниз под действием силы тяжести, что приводит к ав-

томатической аварийной остановке реактора при отказах в его жизненно важных системах, а также по команде оператора.

Станция, которую планируется построить в Беларуси, относится к типу АЭС-2006 (рис. 16). Она базируется на реакторе ВВЭР-1200, прототипом которого является ВВЭР-1000.

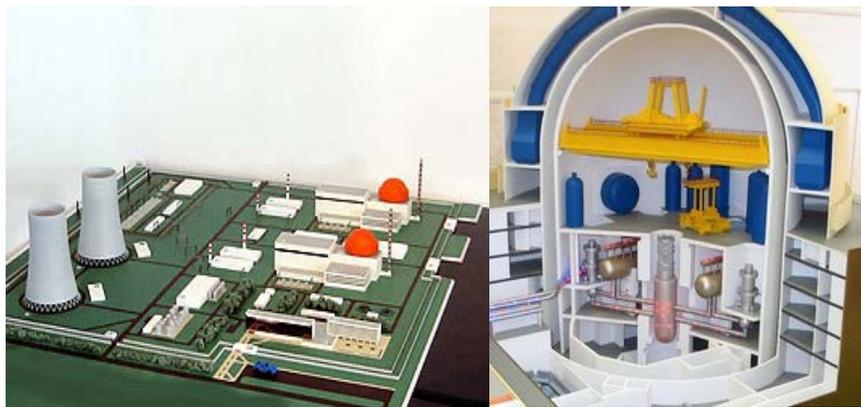


Рис. 16. АЭС-2006 с реактором ВВЭР-1200

Подробного описания реактора и станции в литературе пока нет, поэтому приведем их основные заявленные отличия.

- Мощность реактора – 1200 MВт , чему соответствуют несколько иные значения параметров, например, диаметра корпуса, степени обогащения топлива ураном-235 и т. д.
- За счет применения новых материалов и технологий увеличен до 60 лет срок службы энергоблока.
- Имеется двойная железобетонная гермооболочка со стальной внутренней облицовкой и вентилируемым через фильтры межоболочечным пространством. Внутренняя оболочка рассчитана на воздействия при аварии в реакторе (давление, температура, летящие предметы и пр.), внешняя – на такие факторы, как ураган, удар падающего самолета.
- Используются дополнительные пассивные системы безопасности, которым не требуется электрического питания для выполнения их функций: гермоемкость системы аварийного охлаждения активной зоны реактора, ловушка расплава (при тяжелой аварии с расплавлением активной зоны), пассивная система отвода остаточного тепла.
- Станция устойчива к землетрясениям.

1.7. ВВР-реакторы. Авария на АЭС Фукусима-1

Кипящий водо-водяной реактор (*Boiling Water Reactor, BWR*) – второй по распространенности в мире реактор [14]. Он содержит корпус, контеймент, но не имеет двухконтурной системы генерации пара. Пар образуется непосредственно в активной зоне, после чего направляется в турбину (рис. 17). Рабочее давление в реакторе около 70 атмосфер, температура носителя – 280 °С. С турбины пар поступает в конденсатор, где охлаждается водой из специального бассейна и превращается в воду. Контеймент допускает давление примерно в 6,8 избыточных атмосфер.

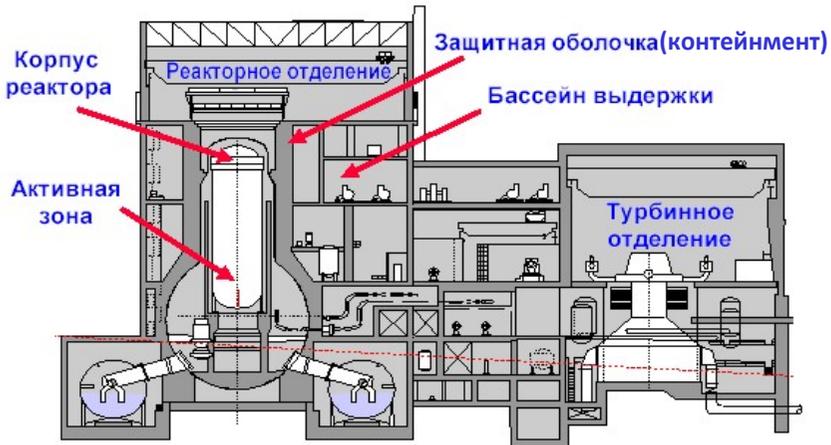


Рис. 17. Реактор типа ВВР

Кольцеобразное сооружение в нижней части реактора – бак-барботер с водой, куда при повышении давления в корпусе направляется для конденсации выброшенный пар

В реакторах такого типа поглощающие элементы системы управления и защиты располагаются снизу, где наиболее велик нейтронный поток. Такая схема также более удобна при перегрузках топлива. Освобождая верхнюю часть реактора от приводов СУЗ, она позволяет также более удобно организовать *сепарацию*, то есть отделение пара от воды. Однако в этом случае невозможна пассивная защита путем опускания поглощающих элементов собственным весом без внешней подачи энергии.

Сами поглощающие элементы выполнены в виде длинных плоских щитков из борной стали или карбида бора, рассекающих

тепловыделяющие сборки (ТВС) на четыре сегмента. ТВС таких реакторов не имеют значительных особенностей, однако таблетки топлива немного меньше обогащены ураном-235 (2–3%) по сравнению с PWR.

Основной недостаток реактора BWR связан с отсутствием второго контура для теплоносителя: утечка радиации в первом контуре может привести, несмотря на специальные фильтрующие приспособления, к проникновению продуктов ядерного деления в окружающую среду.

Шесть реакторов японской АЭС Фукусима-1 были построены с 1971 по 1979 год по проектам фирмы Дженерал Электрик (США). Блоки с номерами 1 (BWR-3, 460 *MВт*), 2 (BWR-4, 784 *MВт*) и 6 (BWR-5, 1100 *MВт*) были построены фирмой Дженерал Электрик, блоки 3 и 5 (BWR-4) – японской фирмой Тошиба, № 4 (BWR-4) – Хитачи.

В результате землетрясения 11 марта 2011 г. три работающих на тот момент энергоблока (№ 1–3) были остановлены действием аварийной защиты. Однако спустя час из-за последовавшего цунами было прервано необходимое для охлаждения остановленных реакторов электроснабжение, в том числе от резервных дизель-генераторов.

Заглушенный реактор, в котором прекращена цепная реакция, продолжает генерировать большое количество тепла за счет излучения накопленных радиоактивных продуктов деления. **Остаточное тепловыделение** ТВЭЛов в первые секунды составляет около 6,5 % от уровня мощности до остановки реактора, через час – примерно 1,4 %, через год – 0,023 %. Аналогичный процесс происходит с отработанными топливными элементами, которые на всех АЭС помещают в **бассейны выдержки**. В бассейнах циркулирует вода, которая одновременно со съемом тепла выступает в качестве защиты персонала от излучений (биологической защиты).

При отсутствии охлаждения температура как в активной зоне, так и в бассейнах выдержки повышается, что в конечном итоге может привести к расплавлению ТВЭЛов. Это грозит попаданием радионуклидов в грунт под зданием реактора и в воздух над бассейнами выдержки. Ситуация усугубляется тем, что при взаимодействии водяного пара с цирконием идет **пароциркониевая реакция** с образованием водорода и тепла:

$2 \text{H}_2\text{O} + \text{Zr} = 2 \text{H}_2 + \text{ZrO}_2 + Q$, где $Q = 6530 \text{ кДж/кг}$,
что может привести к взрыву гремучего газа.

Сразу после прекращения работы резервных дизель-генераторов владелец станции компания ТЕРСО заявила правительству Японии об аварийной ситуации. Без достаточного охлаждения во всех трех работавших реакторах начались снижение уровня воды и повышение давления, создаваемого образующимся паром.

Особенно серьезная ситуация возникла на энергоблоке № 1. Чтобы не допустить взрыва реактора, пар сбрасывали в гермооболочку, где давление возросло примерно вдвое сверх допустимого. Чтобы не разрушилась гермооболочка, пар из нее пришлось сбрасывать в атмосферу. Однако при этом в обстройку реакторного отделения проникло большое количество водорода, в результате чего произошел взрыв гремучего газа.

Аналогичные процессы проходили и на блоках № 2, 3. По имеющимся на июнь 2011 года данным на первом блоке возникли повреждения и течи не только в гермооболочке, но и в корпусе реактора. На втором блоке произошла протечка сильно загрязненной радионуклидами воды в гидротехнические сооружения и через них в океан. По одному из предположений, на блоке № 4 взрыв водорода произошел вблизи бассейна выдержки.

1.8. Реактор на тяжелой воде (PHWR), газовые реакторы (GCR и AGR)

Наиболее распространены тяжеловодные реакторы **CANDU** (*CANada Deuterium Uranium*) [14]. Такие реакторы Канада строила также в Южной Корее, Пакистане, Румынии, Китае и Аргентине. В названии подчеркнуты две основные особенности реактора – использование тяжелой (дейтериевой) воды и природного урана.

Реактор не имеет прочного корпуса, но содержит двухконтурную схему генерации пара и контейнмент (рис.18). Нагревательная камера заполнена замедлителем, в ней расположена система горизонтальных труб – *каналов* с тепловыделяющими сборками (ТВС). Поглощающие стержни (ПС) двигаются по вертикали, обеспечивая пассивную защиту при обесточивании электроприводов. По каналам мимо ТВС прокачивается тяжелая вода первого контура. Первый контур находится под высоким давлением, поэтому вода в нем не закипает. В парогенераторе тепло передается вскипающей обычной воде второго контура.

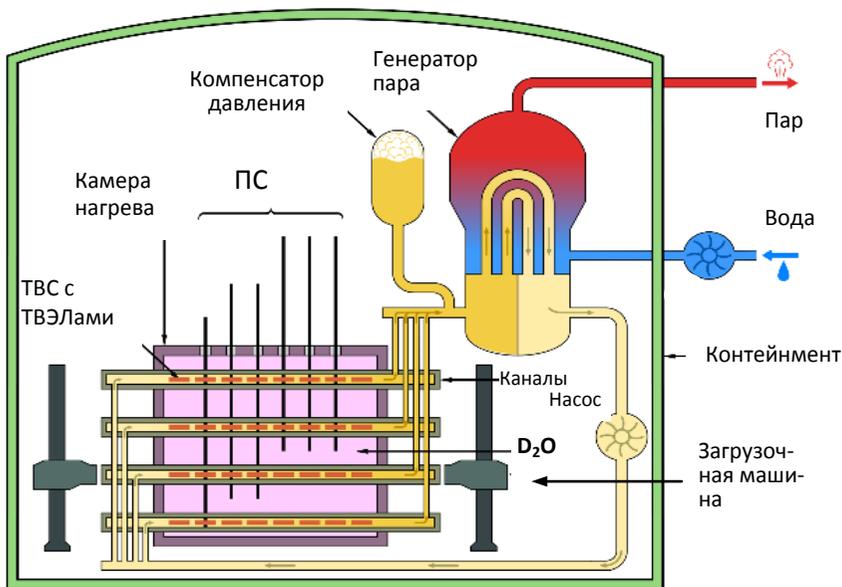


Рис. 18. Реактор на тяжелой воде (D_2O) CANDY

Стоимость тяжелой воды велика и составляет сотни долларов за литр. Однако это самый лучший замедлитель, поэтому реакторы такого типа могут работать на необогащенном или слабо (1-2 %) обогащенном уране. К другим особенностям относится возможность перезагрузки топлива без остановки реактора.

Охлаждаемый газом реактор (GCR) [14] – корпусной ядерный реактор, в котором замедлителем служит графит, теплоносителем – газ (например, углекислый газ). Генерация пара – двухконтурная, однако теплообменник находится снаружи контейнента (рис. 19). Такие реакторы строились в Великобритании и получили название «Magnox», в связи с применением ТВЭЛов из магниевого сплава, слабо поглощающего нейтроны.

Использование в качестве замедлителя графита позволяет применять в качестве ядерного топлива природный и слабообогащенный уран. Газ прокачивают через реактор под давлением 10–20 атм, он нагревается в реакторе примерно до 400°C.

В усовершенствованных газовых реакторах (AGR) корпус и контеймент совмещены в котел высокого давления (рис. 20). Для оболочек ТВЭЛов вместо магния используется нержавеющая сталь,

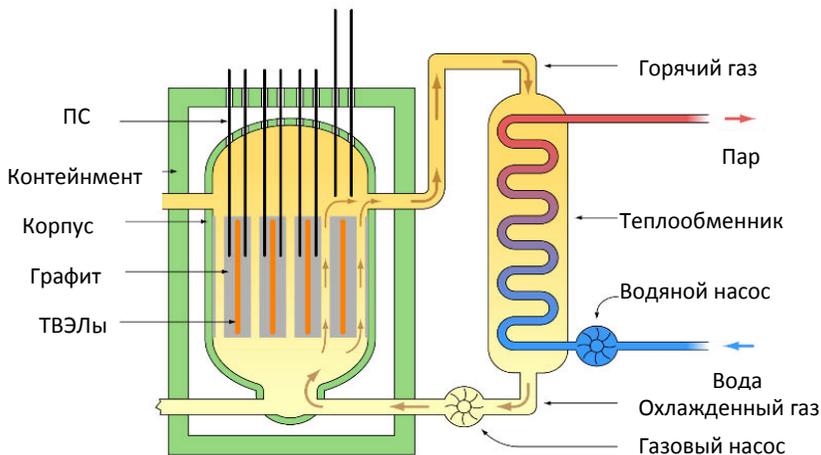


Рис. 19. Газовый реактор (GCR)

а топливом служит слабообогащенный уран. Такие изменения позволили повысить температуру углекислого газа на выходе до $690\text{ }^{\circ}\text{C}$, а КПД АЭС – до 40 %.

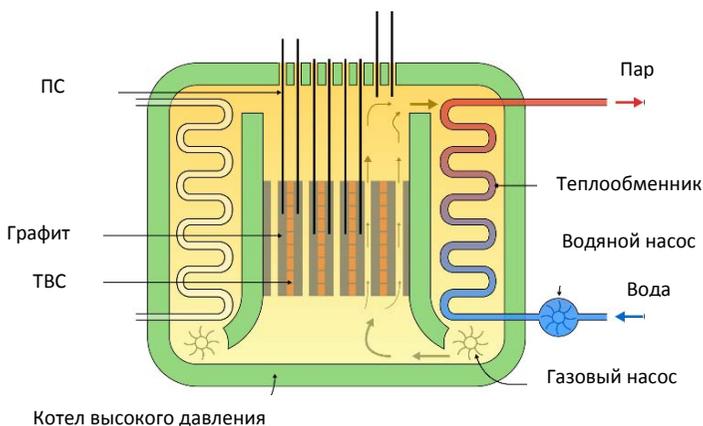


Рис. 20. Усовершенствованный газовый реактор

1.9. «Чернобыльский» реактор РБМК-1000

Реактор РБМК (по международной классификации – *Light Water Graphite reactor, LWGR*) – реактор большой мощности канального типа, использующий в качестве топлива слабообогащенный (около 2%) уран, замедлителя нейтронов – графит, теплоносителя – воду. Он не имеет ни корпуса, ни контейнента и использует одноконтурную систему генерации пара.

Прототипами РБМК были разработанные в начале 60-х годов промышленные реакторы типа АДЭ [11], которые использовались для наработки оружейного плутония. От них, в частности, унаследована возможность работы на относительно дешевом топливе с низким обогащением.

Основная идея реактора РБМК – использование в реакторе для производства плутония циркониевых труб высокого давления. В трубах, называемых *технологическими каналами*, находятся топливные сборки с ТВЭЛами, мимо которых прокачивается вода для отвода выделяющегося тепла. В сравнении с реактором ВВЭР, где используется единый мощный корпус для всех ТВЭЛов, в РБМК каждый канал представляет собой как бы небольшой корпус для находящихся в нем топливныхборок. Отсюда вытекают как достоинства, так и недостатки этого реактора.

Основное преимущество РБМК – отсутствие сложных в изготовлении корпуса и парогенератора, что допускает производство реакторов на обычных машиностроительных заводах. Отсутствие корпуса снимает ограничения на мощность реактора: ее рост достигается простым увеличением размеров активной зоны. Можно производить перегрузку топливных элементов без останковки реактора, что дает возможность наработки радионуклидов технического и медицинского назначения, а также радиационного легирования различных материалов.

В то же время именно значительные размеры активной зоны заставили отказаться при строительстве АЭС с РБМК от контейнентов, без которых уже тогда в мире не сооружался ни один реактор. Это означало отсутствие дополнительного барьера на пути выброса радионуклидов при аварии. Да и эксплуатационные выбросы радиоактивных инертных газов, составляющие у РБМК до четырех тысяч *кюри* в сутки, значительно выше, чем у ВВЭР (до ста *кюри* в сутки).

Реакторы этого типа содержат большое количество трубопроводов, арматуры, различных вспомогательных систем, что затрудняет эксплуатацию, требует большого штата квалифицированного персонала, повышает нагрузку на него.

АЭС с реакторами РБМК строились только в бывшем СССР. Всего было введено в эксплуатацию 17 блоков: 15 – РБМК-1000 с электрической мощностью 1000 МВт и два РБМК-1500 (1500 МВт). При этом 2 реактора было запущено уже после чернобыльской аварии: РБМК-1500 на Игналинской АЭС в 1987 году и РБМК-1000 на Смоленской АЭС в 1990 году. По состоянию на 2013 год продолжают работать по 4 блока РБМК-1000 на Ленинградской и Курской АЭС и 3 блока на Смоленской АЭС; семь из них работают сверх установленного проектом 30-летнего срока. 4 блока Чернобыльской АЭС и 2 блока РБМК-1500 Игналинской АЭС выведены из эксплуатации.

Подробнее устройство реактора РБМК-1000 будет рассмотрено в 2.2.

1.10. Реакторы новых поколений

Деление всех ядерных реакторов на *поколения* (в зарубежной литературе – *генерации*) достаточно условно [1]. Такую классификацию естественно основывать на историческом факторе. Однако такие важные особенности, как новизна конструкции, возможность массового производства, учет требований безопасности, не всегда точно укладываются на историческую шкалу.

К **первому поколению** принято относить реакторы, построенные в период 1950 – начало 60-х годов (рис. 21). Многие из них использовались для производства плутония или для оснащения подводных лодок, а некоторые имели двойное назначение: получение плутония и производство энергии. Практически все они были уникальными (исключение – серия английских реакторов Magnox, построенных в конце 50-х годов).

Под вторым поколением обычно подразумеваются реакторы, которые строились серийно с конца 60-х и до начала 90-х годов прошлого века. Некоторые из них можно отнести ко 2-му поколению лишь формально: по своей сути они принадлежат к поколению 1. Это относится к первым серийным советским водо-водяным реакторам ВВЭР-440, которые выпускались в конце 60-х – начале 70-х годов. В конструкции этих реакторов были обнаружены серьезные проектные изъяны, вследствие чего страны, входящие в Ев-

Generations of Nuclear Energy

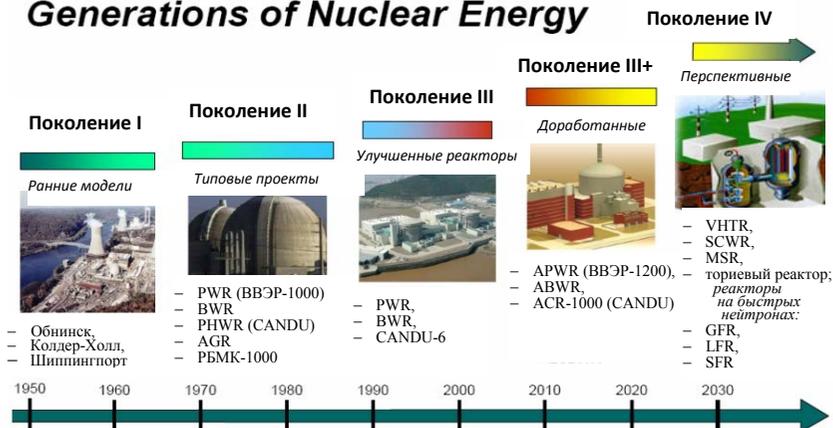


Рис. 21. Поколения реакторов для АЭС

росоюз, а также страны-члены Большой Восьмерки считают, что такие энергоблоки не соответствуют приемлемым стандартам безопасности. Сказанное относится и к реакторам РБМК, которые начали строиться в 1973 году, однако по своей идеологии недалеко ушли от реакторов первого поколения. Ко второму поколению относится большинство реакторов, находящихся сейчас в эксплуатации, в том числе ранние модификации ВВЭР-1000.

Реакторы АЭС, которые строятся с конца прошлого столетия, относят к **поколениям 3 и 3+**. Это реакторы PWR, BWR и CANDU, конструкция которых улучшена. На первый план выдвинуты требования безопасной работы, причем предпочтение отдается «пассивным» средствам обеспечения безопасности, а не инженерно-техническим. Так, система аварийного охлаждения должна больше полагаться на естественные процессы, например, конвекцию. К другим чертам реакторов поколений 3 и 3+ относят:

- унификацию конструкции, позволяющую снизить капитальные затраты, сократить сроки строительства, облегчить лицензирование;
- простоту и компактность, благодаря чему они должны быть легче в управлении и меньше подвержены эксплуатационным нарушениям;
- повышенный срок эксплуатации – обычно шестьдесят лет;
- пониженную вероятность аварий с расплавлением активной зоны;

- сниженное воздействие на окружающую среду;
- более глубокое выгорание ядерного горючего с целью снижения как расхода топлива, так и количества отходов.

Различие между реакторами поколений 3 и 3+ в литературе формулируется нечетко. Подразумевается, что реакторы поколения 3+, которые строятся в наши дни, благодаря некоторым доработкам должны иметь дополнительные преимущества в плане безопасности и экономики.

К **поколению 4** относят реакторы, которые находятся на стадии разработки; их планируется строить через 10–20 лет. В их числе **VHTR** (*Very High Temperature Reactor*) – *сверхвысокотемпературные реакторы* с газовым или солевым охлаждением [1]. Прототипом для них служат газовые реакторы с графитовым замедлителем, но в качестве теплоносителя предлагается использование гелия либо расплава соли. При этом его температура на выходе из реактора может составлять около 1000°C, что повышает КПД. Кроме того, в качестве побочного применения возможно производство тепла либо водорода с помощью термохимического цикла IS (йод-сера).

В цикле IS к воде добавляют йод и диоксид серы, что приводит к экзотермической реакции с образованием йодида водорода и серной кислоты. При дальнейшем нагреве до 850°C серная кислота разлагается, высвобождая кислород и возвращая в оборот диоксид серы. Йодид водорода разлагается при температуре около 350°C, высвобождая водород и возвращая в оборот йод. Конечный результат реакции – разложение воды на водород и кислород. Все реактивы возвращаются в первоначальном виде, а отходы отсутствуют.

К VHTR относится *газоохлаждаемый ядерный реактор с шаровыми ТВЭЛами* (**PBMR** – *Pebble Bed Modular Reactor*). Название происходит из-за того, что предлагаемые топливные элементы (всего их около 400 000) имеют форму «голышей» размером с теннисный шар (рис. 22). Каждый ТВЭЛ имеет графитовое ядро, содержащее в себе частицы обогащенного (до 10%) урана, заключенное в капсулы из твердого углерода. Теплоносителем служит гелий под давлением.



Рис. 22. Топливо PBMR-реактора

Такая технология позволяет создавать т.н. модульные реакторы малой мощности (до 300 МВт) с размерами не больше грузового контейнера. Это означает, что собирать их можно на заводе и доставлять на место по железной дороге, в грузовике или на барже. Модульные реакторы могут компоноваться друг с другом или работать в качестве самостоятельных блоков. Их можно использовать в отдаленных районах, пустынной местности в качестве опреснительных установок и при восстановлении тяжелой нефти, для чего большие реакторы обычно непригодны.

Надкритический реактор с водяным охлаждением (SCWR – Supercritical Water Reactor) представляет собой высокотемпературный одноконтурный реактор с водяным охлаждением [1]. Он функционирует при таких значениях давления и температуры, когда теряется различие между жидкостью и паром. Базисная установка имеет мощность 1700 МВт. По сравнению с водо-водяными реакторы SCWR должны обладать более высокими значениями мощности, КПД, а благодаря упрощенному устройству – меньшей стоимостью.

В реакторе на расплавах солей (*MSR – Molten Salt Reactor*) ядерное топливо жидкое, оно же одновременно выступает в качестве теплоносителя [1]. Такой реактор должен работать при высокой температуре (600–700°C) и давлении немного выше 1 атм, что позволяет обойтись без тяжелого и дорогого корпуса.

MSR-реакторы могут быть основаны на урановом или ториевом топливном цикле. В любом случае топливо расплавляется в соли типа фторида натрия, и эта смесь циркулирует в активной зоне с графитом в качестве замедлителя. Тепло, вырабатываемое в соли, отводится во второй контур, использующий гелий или водяной пар.

Уже отмечалось, что торий-232 не относится к делящимся изотопам, поэтому цепная реакция на нем невозможна. Однако, подобно тому как в обычных реакторах происходит наработка плутония-239 из урана-238, торий-232 при захвате нейтрона превращается через несколько промежуточных продуктов в делящийся уран-233. Этого элемента не существует в природе, поэтому для начальной заправки реактора необходимо использовать уран-235. В последующее же время он будет сам себя обеспечивать ураном-233, причем единственным расходным веществом является торий-232. Такие реакторы весьма перспективны, поскольку запасов тория в природе примерно в 5 раз больше, чем урана, причем ториевые месторождения доступнее.

В долгосрочной перспективе особый интерес вызывают *реакторы на быстрых нейтронах* [17]. В таких реакторах отсутствует замедлитель нейтронов, необходимый, чтобы предотвратить поглощение нейтронов ураном-238. Напротив, такое поглощение активно используется с целью получения из ^{238}U плутония-239, который является делящимся изотопом. Для того чтобы цепная реакция все-таки шла с необходимым выделением большого количества нейтронов, топливом служит высокообогащенный до десятков процентов уран либо смесь урана с плутонием.

Вспомним, что в результате деления одного ядра ^{235}U рождается 2–3 нейтрона, каждый из которых может превратить ядро ^{238}U в плутоний-239. В действительности на 100 разделившихся ядер урана-235 возникает 120–140 ядер плутония. Иными словами, реакторы на быстрых нейтронах могут производить плутония-239 больше, чем в него было загружено урана-235! Этот процесс называется *воспроизводством ядерного горючего*.

Особую выгоду имеет использование в качестве топлива не урана, а плутония. Дело в том, что ядра плутония-239 дают в среднем 2,9 нейтрона на 1 акт деления (для урана это число составляет около 2,3). Работающий реактор одновременно «сжигает» и «производит» плутоний, но *коэффициент воспроизводства* может достигать 1,4–1,7. Такие реакторы называют *реакторами-размножителями* или *бридерами* (**FBR** – *Fast Breeder Reactor*).

В военных программах прошлого века реакторы на быстрых нейтронах представляли интерес с точки зрения наработки оружейного плутония. В наши дни внимание к ним обусловлено возможностью значительно полнее использовать природный уран путем превращения ^{238}U в плутоний (напомним, что в природном уране содержание урана-238 в 100 с лишним раз больше, чем делящегося ^{235}U). В зависимости от конструкции произведенный плутоний может использоваться либо в этом же реакторе, либо в будущих реакторах на быстрых нейтронах, либо в обычных по сути реакторах.

Особый интерес вызывает возможность «сжигания» больших накопленных запасов оружейного плутония и некоторых видов ядерных отходов (подробнее об этом – в следующем параграфе).

Быстрым реакторам свойственно повышенное тепловыделение, поэтому в качестве теплоносителя подходят вещества с большой теплоемкостью – например, расплавленный натрий. Циркулируя в первом контуре, он нагревается и передает тепло натрию второго контура, а тот, в свою очередь, превращает в пар воду третьего

контура. Именно натрий используется в российском реакторе на быстрых нейтронах БН-600, который был запущен в 1980 году и до сих пор работает (рис. 23).



Рис. 23. Реактор БН-600 на Белоярской АЭС (Россия)

Отсутствие замедлителя нейтронов и использование теплоносителя под низким давлением в определенном смысле упрощают конструкцию реактора и делают ее более компактной. Мощность реактора может регулироваться либо поглощающими нейтроны элементами, либо подвижными тепловыделяющими сборками. В небольших реакторах в качестве регулятора удобнее подвижный отражатель: ходом цепной реакции управляют, изменяя утечку нейтронов.

На сегодняшний день перспективными для строительства считаются три разновидности реакторов на быстрых нейтронах:

- *реактор на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением (SFR – Sodium-Cooled Fast Reactor);*
- *реактор на быстрых нейтронах с газовым охлаждением (GFR – Gas-Cooled Fast Reactor);*
- *реактор на быстрых нейтронах со свинцовым охлаждением (LFR – Lead-Cooled Fast Reactor).*

1.11. Управление реактором и ядерная безопасность

Ядерный реактор работает на той же физической основе, что и ядерная бомба. Однако для описания цепной реакции деления в реакторе вместо понятия критической массы удобнее использовать т. н. **коэффициент размножения нейтронов k** , определяемый как отношение числа нейтронов последующего и текущего поколений [18]. При $k > 1$ цепная реакция лавинообразно нарастает (*надкритический режим*), при $k < 1$ – затухает (*подкритический режим*). Управление реактором требует обеспечения значений k , которые влекут начальный рост нейтронного потока, его поддержание на заданном уровне ($k = 1$) и остановку при необходимости. Это может достигаться различными способами, но обычно, как мы уже знаем, – системой движущихся стержней из материала, сильно поглощающего нейтроны (бор, кадмий). Подчеркнем, что недопустимы значения k , значительно превышающие единицу: это может привести к стремительному неуправляемому процессу выделения огромного количества энергии.

Управлять таким потенциально опасным объектом можно благодаря тонкой физической особенности реакции деления – наличию т. н. *запаздывающих нейтронов*. Большинство нейтронов, образующихся в результате бета-распада осколков деления, вылетают из ядер практически мгновенно (за время 10^{-16} с). Их среднее время жизни в реакторе до повторного захвата последующими ядрами не превышает 10^{-3} с. Это означает, что за секунду возникнет свыше 1000 новых поколений нейтронов, поэтому при $k > 1$ скорость нарастания цепной реакции деления чрезвычайно велика. В таких условиях осуществлять управляющие воздействия на поток нейтронов практически невозможно.

Однако при распаде таких осколков, как ядра брома и йода, нейтроны испускаются со значительной задержкой, составляющей около 10 с. Таким образом, в реакторе всегда существует небольшая доля β *запаздывающих* нейтронов, составляющая около 0,005. Их присутствие позволяет устанавливать такой режим работы реактора, при котором скорость изменения нейтронного потока в сотни раз меньше, чем на мгновенных нейтронах, и в конечном итоге – обеспечить надежное управление.

Для описания динамики работы реактора, в том числе при воздействии дестабилизирующих факторов, вместо величины k удобнее использовать величину **реактивности ρ** , характеризующую отклонение k от единицы: $\rho = (k-1)/k$ [19]. В надкритическом

режиме реактивность положительна, в подкритическом – отрицательна. Если какой-либо фактор приводит к снижению коэффициента размножения, говорят, что он порождает отрицательную реактивность. Если же k увеличивается, фактор вносит положительную реактивность.

С реактивностью связан **период реактора**, т.е. время, за которое нейтронная мощность увеличивается в $e \approx 2,73$ раз. Период обратно пропорционален реактивности.

Значение ρ можно представить в виде суммы реактивностей для мгновенных и запаздывающих нейтронов. Рассмотрим случай, когда суммарная реактивность положительна (при этом $k > 1$), но не превышает доли запаздывающих нейтронов β . В таких условиях развитие цепной реакции только на мгновенных нейтронах невозможно (для них значение k не «дотягивает» до единицы), а значит, поведение реакции будет полностью обусловлено запаздывающими нейтронами. Как следствие, быстродействия системы управления реактором вполне хватает для того, чтобы держать цепную реакцию под надежным контролем.

В случае же, когда положительная реактивность превышает 0,005, происходит *неконтролируемый разгон на мгновенных нейтронах*, что, по сути, близко к ядерному взрыву. Возможный в этом случае эффект, конечно же, не идентичен взрыву бомбы. Дело в том, что уже на ранней стадии развития цепной реакции топливо начнет испаряться, ТВЭЛы и сам реактор разрушатся, то есть оставшаяся часть топлива окажется разнесенной в пространстве. При этом вновь рождающиеся нейтроны будут преимущественно выбывать из цепной реакции, и она начнет затухать, не охватив все запасы ядер урана-235.

Таким образом, возникновение ситуации, когда положительная реактивность превышает величину β , недопустимо: это самое страшное, что может произойти с ядерным реактором. Поэтому во всех реакторах, начиная с реактора Ферми, кроме системы регулирования имеется **аварийная защита (АЗ)**, назначение которой – обеспечить как можно более быстрое введение в реактор большой отрицательной реактивности, т.е. заглушение реактора.

Во времена первого реактора эта функция аварийной защиты получила название SCRAM (*Safety Control Rod Axe Man*) по ассоциации с образом человека, перерубающего канат, на котором висит падающий в реактор стержень (рис. 24). В большинстве реакторов механизм работы аварийной защиты очень похож, только вме-

сто перерубания каната происходит разъединение электромагнитной муфты, удерживающей стержни в поднятом положении.

В современных вариантах реакторов ВВЭР используют специальные баки с борсодержащей жидкостью над реактором. При аварийной ситуации содержимое этих баков самоотеком оказывается внутри активной зоны, и цепная ядерная реакция гасится большим количеством бора, ядра которого хорошо поглощают нейтроны.

Защита от неконтролируемого разгона, как правило, входит составной частью в **систему управления и защиты** (СУЗ) реактора.

Сигнал аварийной защиты (АЗ), по которому происходит заглушение реактора, обычно формируется из показаний нейтронных датчиков, причем контролируется как мощность реактора (АЗМ), так и скорость ее роста (АЗСР). Надежность защиты обеспечивается многократным дублированием, схемами предотвращения от ложных срабатываний и другими средствами.

Кроме роста мощности реактора, возможны и другие аварийные ситуации, связанные с какими-либо опасными отклонениями процессов в АЭС. В их числе нарушения режима охлаждения активной зоны реактора, разрыв контура циркуляции теплоносителя и др. В этих случаях также вырабатывается сигнал аварийной защиты, приводящий к сбросу поглощающих стержней. Обеспечивающие его схемы называются *технологическими защитами*. Однако, в отличие от АЗМ и АЗСР, которые срабатывают независимо от оператора, некоторые технологические защиты могут блокироваться с пульта управления, чтобы избежать излишних остановок энергоблока.

Безопасность реактора обеспечивается и тонкими физическими механизмами [20]. Оказывается, при изменении мощности реактора работает отрицательная обратная связь,

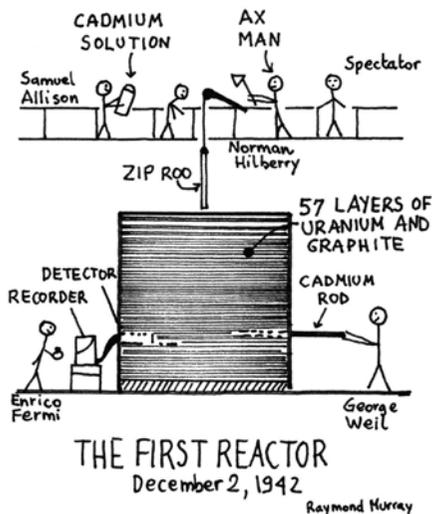


Рис. 24. Схема первой аварийной защиты

противодействующая этому изменению. Основным режим работы реактора, когда процесс деления находится в устойчивом равновесии и его мощность постоянна, соответствует значению $k = 1$. Пусть в результате воздействия дестабилизирующего фактора k становится немного больше единицы, что при неизменности других параметров приводит к быстрому экспоненциальному росту скорости ядерной реакции. Как следствие, растет тепловая мощность, а значит, и температура ядерного топлива. Известно, что в этом случае уменьшается вероятность захвата нейтронов ядрами ^{235}U и, следовательно, скорость цепной реакции уменьшается. Таким образом, случайное повышение скорости ядерной реакции гасится.

Для оценки влияния разных факторов на реактивность вводятся понятия *коэффициентов реактивности*. Коэффициент реактивности по какому-то параметру – реактивность, вносимая при изменении параметра на единицу (производная реактивности по этому параметру). Описанная в предыдущем абзаце закономерность может быть сформулирована как наличие у реактора *отрицательного мощностного коэффициента реактивности*. Она лежит в основе ядерной безопасности реактора, обеспечивает стабильную работу реактора на заданном уровне мощности и исключает опасность самопроизвольного возрастания мощности. Если же рост k вызван перемещением управляющих стержней, происходит медленное изменение мощности реактора и стабилизация ее на новом значении, а не развитие взрыва.

На практике на мгновенную мощность реактора влияет множество параметров активной зоны, которые, в свою очередь, зависят от мощности, например, плотность теплоносителя, температура графитовой кладки. Поэтому полный мощностной коэффициент реактивности складывается из нескольких составляющих. При этом разные эффекты имеют разные вклады и проявляются с разной степенью инерционности. Так, например, движение регулирующих стержней происходит достаточно медленно, а разогрев топлива и теплоносителя происходит достаточно быстро. В связи с этим различают два мощностных коэффициента реактивности: быстрый, который отражает изменение реактивности до завершения переходных процессов, и полный, который проявляется по их прекращении, то есть при медленном переходе с одного стационарного уровня мощности на другой.

В «Правилах ядерной безопасности атомных электростанций» (ПБЯ-04-74) [21] было записано: «3.2.2. При проектировании

реактора следует стремиться к тому, чтобы полный мощностной коэффициент реактивности не был положительным при любых режимах работы АЭС. Если полный мощностной коэффициент реактивности в каких-либо эксплуатационных условиях положителен, в проекте должна быть обеспечена и особо доказана ядерная безопасность реактора при работе в стационарных, переходных и аварийных режимах».

Специальные средства обеспечения безопасности предусмотрены при разгерметизации контура охлаждения реактора (аварии с потерей теплоносителя), в том числе при **максимальной проектной аварии (МПА)** – разрыве всасывающего или напорного коллектора (его внутренний диаметр около метра) главного циркуляционного насоса – ГЦН. Как уже отмечалось, даже в остановленном реакторе продолжается значительное выделение тепла (в первое время около 7 % от мощности до остановки). Если это тепло не отводить, возможна тяжелая авария с разрушением активной зоны.

При нормальной остановке реактора отвод этого остаточного тепла обеспечивается продолжающими работу ГЦН. В случае же разрыва напорного коллектора ГЦН работающего реактора его активная зона или ее часть остается без охлаждения – это и есть максимальная проектная авария. Для ее предотвращения предусмотрена специальная **система аварийного охлаждения реактора (САОР)**. Она состоит из гидробаллонов с большим запасом воды и включающихся после этого дополнительных насосов аварийного охлаждения. Вода из гидробаллона под давлением (например, за счет созданной в емкости газовой подушки) может быстро поступать в каналы реактора, минуя ГЦН и разрушенную часть контура отвода тепла. Автоматика распознает такую аварию и выдает аварийные сигналы: МПА для запуска САОР и АЗ для заглушения реактора.

Возможна еще одна аварийная ситуация – **«потеря собственных нужд»**, т.е. исчезновение электропитания насосов и вообще всего вспомогательного оборудования, обслуживающего энергоблок. Для случаев обесточивания АЭС, когда невозможно взять питание от собственного генератора, соседнего энергоблока или резервного трансформатора из внешней линии электропередач, предусмотрен автономный источник энергии – резервная дизельная электростанция. Она запускается автоматически и примерно через минуту подает питание на электрические шины собственных нужд.

1.12. Ядерный топливный цикл и проблема захоронения радиоактивных отходов

В силу огромной радиоактивности продуктов деления и трансурановых элементов содержимое отработанных на АЭС ТВЭЛов несет смертельную опасность для человека. Часть образовавшихся радионуклидов имеет короткий период полураспада, поэтому значительного снижения радиоактивности и остаточного тепловыделения можно достичь, помещая ТВЭЛы в заполненные водой бассейны выдержки на время порядка 10–20 лет. Такие бассейны есть на любой АЭС; естественно, что операции по выгрузке ТВЭЛов и их перемещению максимально роботизированы.

Как это ни удивительно, на вопрос, что дальше делать с радиоактивными отходами, до сих пор не найдено однозначного ответа. При этом не вызывает сомнений, что отработавшие ТВЭЛы следует поместить в прочный герметичный контейнер и каким-то образом захоронить. Большинство специалистов сходится во мнении, что самое надежное место захоронения – так называемый *геологический могильник* [4].

Такой могильник (репозиторий) должен содержать систему шахт и туннелей, расположенных в плотной скалистой породе на глубине сотен метров от поверхности земли. Важно, чтобы в нем были обеспечены вентиляция, охлаждение контейнеров и минимизировано воздействие влаги.

Для предотвращения коррозии и возможного воздействия воды стальные контейнеры целесообразно запечатать в дополнительные



Рис. 25. Контейнеры для захоронения

медные оболочки (рис. 25) и разместить их в гнезда, засыпаемые глиной.

Этот способ захоронения изучался экологами на протяжении десятилетий и теоретически представляется, что он исключает попадание радионуклидов в окружающую среду.

Реальное же положение дел с захоронением радиоактивных отходов выглядит просто драма-

тично: до сих пор в мире не создано ни одного геологического хранилища. Первый такой могильник (рис. 26), скорее всего, будет построен к 2020 году в Олкилуото (Финляндия). Расходы на его



Рис. 26. Геологический могильник

постройку с 1970 года включаются в стоимость электроэнергии, производимой на финских АЭС. В США к 2017 году планировалось открытие хранилища в Юкка Маунтин (Невада), однако оно неоднократно откладывалось.

Поскольку бассейны выдержки действующих в мире АЭС переполнены, хранящиеся в них ТВЭЛы обычно перемещают в т. н. *сухие хранилища* [22]. Один из вариантов такого хранилища представлен на рис. 27. В этом сооружении из стали и бетона стоимостью

около 1 млн. долларов можно хранить 10 т отходов (примерно столько получается в реакторе мощностью 500 МВт за год).

Сторонники данного подхода утверждают, что излучение хранилища практически не увеличивает радиационный фон на площадке АЭС, а тепловая энергия мощностью 10 кВт свободно уносится конвекцией. Предполагается, что когда-либо складированные таким образом отходы будут вывезены в геологические могильники.



Рис. 27. Сухое хранилище

Описанный выше способ обращения с топливом, когда его отходы после выгрузки из реактора подлежат захоронению, получил название *открытого* (или одношагового) *топливного цикла* (рис. 28) [4].



Рис. 28. Схема открытого топливного цикла

В разгар гонки вооружений (шестидесятые годы прошлого столетия) представлялось целесообразным получать плутоний не только в реакторах военного назначения, но и извлекая его из отработанного топлива АЭС. Параллельно стала обсуждаться идея т. н. *замкнутого топливного цикла*, когда из отходов уранового топлива путем *переработки* извлекается плутоний, который используется для приготовления нового топлива.

Переработка ядерных отходов налажена в немногих странах мира. В их числе США, Англия, Франция, Япония, Россия.

Наибольший опыт использования плутония в ядерной энергетике накоплен во Франции, где выделенный плутоний в виде двуокиси смешивается с двуокисью природного или обедненного урана из отходов обогатительных производств, образуя т.н. **МОХ** (*Mixed Oxide*) топливо [22]. Оно может использоваться как для обычных (тепловых) реакторов, так и для реакторов на быстрых нейтронах. Отходы реакторов снова направляются на завод, но фактически не на переработку, а на хранение, поскольку содержащийся в них плутоний уже более трудно извлечь. Таким образом, переработка, кроме производства плутония, выступает и как способ обращения с отходами, заключающийся в их перемещении с площадок АЭС на завод по переработке.

В целом красивая идея замкнутого топливного цикла имеет три серьезных недостатка. Во-первых, стоимость заводов по извлечению плутония чрезвычайно велика, особенно с учетом требований по обеспечению безопасности для человека. Во-вторых, количество высокорadioактивных отходов после переработки уменьшается незначительно. Эти отходы все равно нуждаются в надежном захоронении, и цикл замкнут лишь частично. Третий недостаток стал особенно актуальным, когда в мире возобладала политика разоружения.

Речь идет о том, что получаемому после переработки плутонию необходимо обеспечить такую систему хранения и использования, чтобы полностью исключить возможность его попадания к террористам или в страны, руководство которых обладает нездоровыми амбициями. На самом деле это главный недостаток: в сравнении с возможной утечкой радиоактивных отходов из мест захоронения более значительную угрозу человечеству несет применение ядерного оружия. Эта угроза стала совершенно очевидной, когда после строительства с участием США перерабатывающего завода в Индии первый же наработанный там плутоний был использован для создания ядерной бомбы, испытанной в 1974 году.

Возможность попадания в недобрые руки урана с заводов по обогащению или изготовлению ТВЭЛов не так страшна, потому что для получения оружейного урана нужна высокая степень обогащения (порядка 90%), которой в состоянии добиться только страны с очень высоким научно-техническим потенциалом. Плутоний в составе отработанного топлива смешан с другими продуктами деления, гамма-излучение которых смертельно опасно.

Пятикилограммовый же слиток плутония, не обладающий большой радиоактивностью, в принципе, можно вынести с завода или хранилища, и это чрезвычайно лакомая добыча для злоумышленников. Поэтому стоимость мероприятий по обеспечению сохранности плутония чрезвычайно высока и почти соизмерима со стоимостью его получения.

В годы холодной войны американскими заводами по переработке топлива в штатах Вашингтон и Северная Каролина было произведено 100 т оружейного плутония, что было достаточно для изготовления более 12 000 бомб и вдвое превышало плановые потребности. Хранение избыточного плутония обходится более чем в 15 млрд. долларов, а вывод из эксплуатации заводов по переработке требует примерно 150 млрд. долларов.

К 2005 году в России и Англии накопилось примерно по 100 т плутония [22]. Некоторое время эти страны и Франция получали доходы от приема на переработку отработанного топлива из других стран, власти которых считали, что такой вариант будет удобным, хоть и дорогим способом избавиться от своих отходов. Однако после того как в контрактах было оговорено, что выделенный плутоний и высокорadioактивные остатки должны возвращаться отправителям, их интерес к этому варианту упал. Стало очевидным, что строить сухие хранилища на собственной территории примерно в 10 раз дешевле.

В России на сегодняшний день работает одно предприятие – ПО «Маяк» (Челябинская область), которое способно переработать отходы топлива с 15% используемых в стране реакторов. В 2006 году Япония построила завод по переработке ядерных отходов стоимостью 20 млрд. долларов. В то же время Англия планирует закрыть свои заводы по переработке топлива, на что требуется 98 млрд. долларов.

Ведущаяся в наши дни разработка реакторов четвертого поколения увязывается с возрождением идеи замкнутого топливного цикла. В так называемом *усовершенствованном замкнутом цикле* (рис. 29) предполагается многократно «дожигать» переработанные отходы, включая не только уран, плутоний, но и другие трансуранные элементы, в реакторах на быстрых нейтронах [22]. Предполагается, что в результате отходы будут содержать в основном легкие элементы, обладающие более коротким временем жизни. Это позволит уменьшить количество отходов, подлежащих окончательному захоронению в геологических хранилищах.

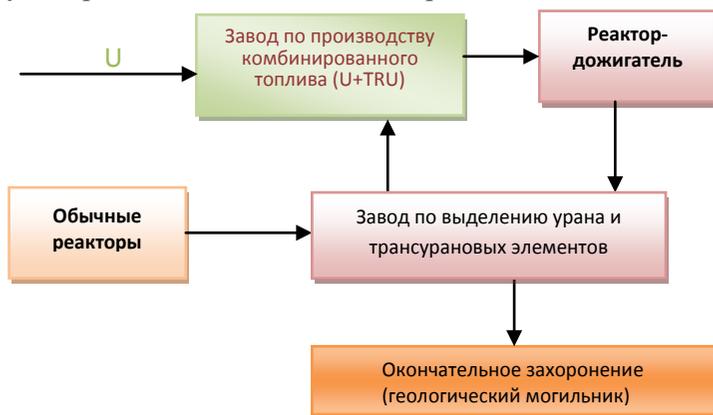


Рис. 29. Усовершенствованный замкнутый цикл

В США обсуждается проект строительства от 40 до 75 реакторов на быстрых нейтронах мощностью 1000 МВт, способных расщепить трансуранные элементы из отходов всех 103 (2013 год) работающих обычных реакторов, и соответствующего завода по переработке. Предполагается, что каждый новый реактор будет дороже своих предшественников на 1–2 млрд. долларов, а строительство инфраструктуры по переработке обойдется в 100–200 млрд. долларов.

Преимущества замкнутого топливного цикла очевидны. В их числе более эффективное использование топливного сырья – природного урана – и сокращение отходов, подлежащих вечному захоронению. В усовершенствованном топливном цикле снижается вероятность возможного использования плутония для создания ядерного оружия.

Однако в наши дни большинство специалистов отдает предпочтение открытому топливному циклу, который, по их мнению, больше отвечает интересам экономичности и экологической безопасности. При этом подчеркиваются основные недостатки замкнутого цикла.

Во-первых, стоимость получаемого в таком цикле топлива существенно выше, чем традиционного уранового. Согласно исследованию Массачусетского технологического института (MIT 2003), стоимость усовершенствованного замкнутого топливного цикла, включая хранение и захоронение радиоактивных отходов, будет в 4,5 раза больше стоимости открытого цикла.

Во-вторых, проблемы газообразных выбросов, утечек радиоактивных материалов, обеспечения безопасности станут куда серьезнее, чем на нынешних перерабатывающих предприятиях.

В указанном выше исследовании делается вывод, что нет однозначных аргументов в пользу того, что замкнутый топливный цикл упрощает проблему обращения с отходами, не говоря уже о новых затратах и рисках. Скептики же прямо утверждают, что сиюминутный риск для окружающей среды и человека превышает долгосрочные выгоды от сокращения радиоактивных отходов.

Обобщая сказанное, можно констатировать, что в наши дни основные недостатки ядерной энергетики не преодолены. Однако эта область техники продолжает развиваться. Ситуация может измениться, когда сформируется парк реакторов новых поколений и будут введены в эксплуатацию геологические хранилища радиоактивных отходов.

Следует отметить, что опасность, исходящая от атомной энергетики, подсознанием людей преувеличена. Определенные риски для человека существуют в результате внедрения в жизнь многих новых технологий, особенно связанных с производством и использованием значительного количества энергии. Тема приемлемости для человека тех или иных рисков заслуживает отдельного глубокого рассмотрения. Здесь же приведем несколько фактов, свидетельствующих об опасности традиционных электростанций.

Так, по данным Всемирной организации здравоохранения только в Китае на угольных электростанциях ежегодно погибает более 250 работников, а от болезней, напрямую вызванных вдыханием вредных выбросов, – более 500 тыс. человек.

Казалось бы, что может быть безопаснее гидроэнергетики? Однако в этой области происходили и происходят тяжелейшие аварии. Так, в результате прорыва плотины китайского водохранилища на реке Жухэ в провинции Хэнань (1975 год) погибло более 170 000 человек, пострадало 11 млн. человек. В результате аварии на Саяно-Шушенской ГЭС (2009 год) погибло 75 человек, серьезный ущерб был нанесен помещениям и оборудованию станции, региональной энергосистеме, окружающей среде.

2. ЧЕРНОБЫЛЬСКАЯ АВАРИЯ И ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

2.1. История реакторов РБМК-1000 и Чернобыльской АЭС

Чернобыльская АЭС расположена на севере Украины в Киевской области, около впадения реки Припять в Днепр (рис. 30). Для персонала станции в 70-е годы прошлого века был построен городок Припять с населением около 50 тыс. человек. Он лежит на расстоянии примерно 110 километров на север от Киева, 12 км от границы с Беларусью и 18 км от небольшого старинного города Чернобыль – районного центра.

В 1986 году ЧАЭС состояла из 4 энергоблоков, каждый из которых включал реактор РБМК-1000 и 2 паровые турбины [23].

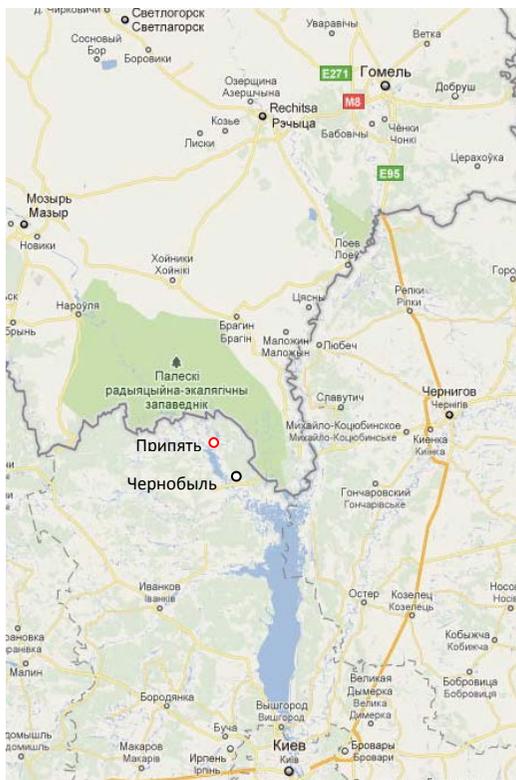


Рис. 30. Месторасположение ЧАЭС

Как уже отмечалось, прототипами реактора РБМК были промышленные реакторы-наработчики оружейного плутония. К середине 60-х годов в СССР плутоний вырабатывался 13 промышленными ядерными реакторами на трех комбинатах: Химический комбинат «Маяк» (Челябинск-65, ныне Озерск), Сибирский химический комбинат (Томск-7, Северск), Красноярский горно-химический комбинат (Красноярск-26, Железногорск). Большинство этих реакторов были уран-графитовыми, каналными [11].

В Северске и Железногорске такие реакторы (АДЭ-2, 3, 4, 5), кроме производства

плутония, вырабатывали тепловую и электрическую энергию. За один год три реактора АДЭ-2, АДЭ-4 и АДЭ-5 вместе нарабатывали около 1500 кг плутония. Они же по состоянию на 2000-е годы давали 30–35 % тепла, необходимого для отопления жилого массива Томска и более 50 % для города Северск и промплощадок Сибирского химкомбината.

С октября 1994 года нарабатываемый плутоний не используется для производства оружия. В соответствии с соглашением между Россией и США о прекращении производства оружейного плутония все ядерные реакторы Сибирской АЭС в 2008 году были остановлены. В 2010 году закрыт реактор АДЭ-2 в Железногорске.

Опыт разработки, строительства и эксплуатации *промышленных* уран-графитовых реакторов (рис. 31) [11, 24] позволил с середины 60-х годов приступить к разработке реактора РБМК, который изначально проектировался для производства электрической энергии (*энергетический реактор*). Научным руководителем проекта был определен Институт атомной энергии (ИАЭ) им. И.В. Курчатова, возглавляемый академиком А.П. Александровым; главным конструктором реакторной установки – Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ) Министерства среднего машиностроения СССР во главе с академиком Н.А. Доллежалем. Некоторые конструкторские решения отрабатывались на опытных энергетических реакторах: АМБ-1 (1964 год) и АМБ-2 (1967 год), входящих в состав Белоярской АЭС.

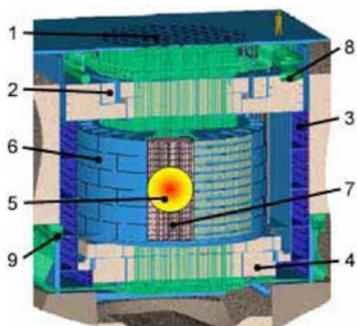


Рис. 31. Промышленный уран-графитовый каналный реактор типа АДЭ

- 1 - настил реактора, 2 - верхняя защита,
- 3 - боковая защита, 4 - нижняя защита,
- 5 - активная зона, 6 - корпус реактора,
- 7 - графитовая кладка,
- 8 - подводящие трубопроводы,
- 9 - отводящие трубопроводы

Александров Анатолий Петрович (1903–1994). Один из создателей ядерного оружия, основателей советской ядерной энергетики. С 1960 года возглавлял Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, Академию наук СССР (1975–86). Заслуги академика отмечены 9 орденами Ленина, орденами Трудового Красного Знамени и Октябрьской Револю-

ции, тремя Звездами Героя Социалистического Труда, Ленинской и Сталинскими премиями.

Доллежалъ Николай Антонович (1899–2000). Проектировал первые промышленные реакторы для производства оружейного плутония. После успешных испытаний атомной бомбы в 1949 году приступил к разработке ядерных реакторов для корабельных установок, атомных электростанций. Со времени создания в 1952 году возглавлял НИКИЭТ, ныне носящий его имя. Дважды Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской, трех Сталинских и двух Государственных премий.

В соответствии с Постановлением Совета Министров СССР от 29 июня 1966 года, утвердившим план ввода атомных станций в 1966–1977 годах, намечалось построить АЭС общей мощностью 11 900 *MВт*, в том числе с реакторами РБМК – 8 000 *MВт*. Строящиеся АЭС были призваны компенсировать дефицит электроэнергии, особенно в европейской части СССР.

Это был исторический период, характеризующийся бурным развитием ядерной физики, широким использованием ее достижений как в военных, так и мирных целях. Гордостью страны стали первые в мире АЭС, суда-атомоходы. Атомная энергетика на фоне трудностей освоения новых месторождений обычного топлива, проблем с выбросами тепловых станций, рыночной конъюнктуры на углеводороды привлекала своей экономичностью и экологичностью.

К тому моменту уже существовали советские корпусные реакторы – ВВЭРы, которые разрабатывались ОКБ «Гидропресс» под научным руководством И.В. Курчатова и А.П. Александрова с 1954 года. Первый из них – ВВЭР-210 – был введен в эксплуатацию в 1964 году на Нововоронежской АЭС. Впоследствии там же были введены ВВЭР-365 (1969 г.) и ВВЭР-440 (1975 г.).

Тем не менее, приоритет в строительстве был отдан реакторам РБМК. Сыграли роль как недостаток производственных мощностей для серийного изготовления высокопрочных корпусов для реакторов ВВЭР, так и значительно более высокая на то время блочная мощность РБМК.

В те времена считалось, что атомная станция является надежным источником энергии, а возможные отказы и аварии – чисто гипотетические события. О серьезных авариях тогда практически не задумывались даже специалисты: идею абсолютной безопасности атомной энергетике настойчиво и публично проповедовал сам А.П. Александров, глава Академии наук СССР. Правила безопасности на момент разработки реакторов либо отсутствовали, либо были несовершенны.

Первые энергоблоки сооружались в системе Министерства среднего машиностроения, работавшего на оборону. Предполагалось, что и их эксплуатация будет проводиться организациями этой системы. Поэтому, с одной стороны, системы безопасности первых серийных реакторов РБМК-1000 и ВВЭР-440 были недостаточно полны. С другой – после передачи реакторов в эксплуатацию Министерству энергетики сказывались более низкий уровень подготовки и дисциплины персонала, да и его нехватка. Это потребовало в дальнейшем серьезной модернизации реакторов.

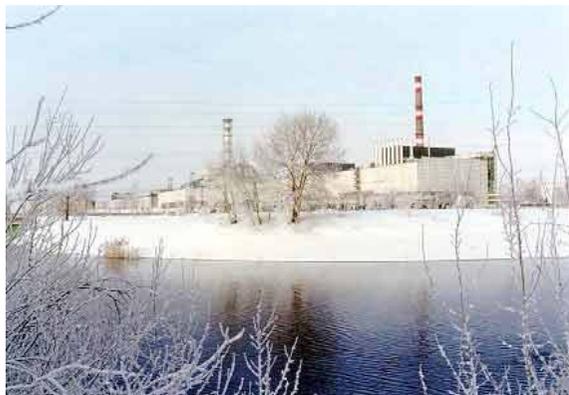


Рис. 32. 1-й и 2-й блоки ЧАЭС

в системе аварийного охлаждения (САОР). По измененному проекту были построены 1-й и 2-й энергоблоки Курской АЭС (1976 год) и Чернобыльской АЭС (1977 год, рис. 32). Эти 6 энергоблоков составили первое поколение РБМК.

Ленинградская АЭС находилась в ведении Минсредмаша, проектирование же следующего поколения реакторов велось исключительно для нужд Министерства энергетики. Доработки были направлены на дальнейшее повышение надежности и безопасности АЭС, увеличение ее экономической эффективности. Так, вместо баков-барботеров в системе локализации аварий были применены двухэтажные бассейны-локализаторы, расположенные под реактором. Отсутствие гермооболочки, по мнению разработчиков, компенсировалось применением системы *плотно-прочных боксов*, в которых располагались трубопроводы системы охлаждения.

Первый энергоблок с реактором типа РБМК-1000 был запущен в 1973 году на Ленинградской АЭС [25]. Накопленный в ходе эксплуатации опыт заставил внести в проект второго энергоблока ЛАЭС существенные изменения, в том числе применить гидроаккумулирующие емкости и дополнительные насосы

Стации начали строиться дубль-блоками, когда реакторы двух энергоблоков находятся по существу в одном здании (рис. 33). Так были исполнены 8 энергоблоков РБМК-1000 второго поколения: 3-й и 4-й Ленинградской АЭС, Курской АЭС и Чернобыльской АЭС, 1-й и 2-й – Смоленской.

3-й и 4-й блоки ЧАЭС были пущены в 1983 году (рис. 34). А еще до этого, в 1977 году, появилось предложение о развитии мощности Чернобыльской АЭС до 12 *ГВт* путем строительства на правом берегу Припяти пятого и шестого энергоблоков с РБМК-1000, а затем на левом берегу еще четырех энергоблоков с реакторами РБМК-1500. Сооружение пятого и шестого энергоблоков началось в 1981 году. Оно было остановлено после аварии на четвертом энергоблоке в стадии, близкой к завершению.



Рис. 33. Дубль-блок РБМК-1000



Рис. 34. Чернобыльская АЭС (вдали – город Припять)
Длинное (около 1 км) здание перед блоками – турбинный зал, общий для всей АЭС

В сравнении с другими станциями эксплуатация ЧАЭС происходила достаточно гладко. Случилась лишь одна достаточно серьезная авария – разрушение топливной сборки из-за ошибочных действий персонала (сентябрь 1982 года). Больших проблем она не вызвала, а последствия радиоактивного выброса в те времена не доводились до общественности.

В 1985 году объединением «Союзатомэнерго» Чернобыльская электростанция им. В.И. Ленина была признана самой лучшей по всем показателям – производственным, социальным и кадровым [10]. По итогам деятельности за 1985 год и за стабильно успешную работу на протяжении восьми лет эксплуатации в 1986 году к Первомайскому празднику был подготовлен Указ Президиума Верховного Совета СССР о награждении Чернобыльской АЭС орденом Ленина. Ряд работников станции был представлен к правительственным наградам, а директор избран делегатом XXVII съезда КПСС, который проходил в марте 1986 года.

2.2. Устройство реактора РБМК-1000 и его особенности

Активная зона реактора расположена в графитовой кладке диаметром около 12 и высотой 7 метров [26]. Кладка состоит из собранных в колонны блоков с вертикальными отверстиями для установки *технологических (топливных) каналов*.

Технологический канал – сварная трубная конструкция, часть которой, расположенная в активной зоне, имеет диаметр около 6 см и выполнена из цирконий-ниобиевого сплава. Каналы предназначены для установки кассет с ТВЭЛами и одновременно – подачи теплоносителя (воды). Всего в реакторе 1661 технологический канал.

Топливная кассета состоит из двух соединенных последовательно тепловыделяющих сборок. Каждая сборка содержит 18 тепловыделяющих элементов. ТВЭЛ представляет собой трубку из цирконий-ниобиевого сплава высотой 3,6 м, диаметром 13,5 мм и толщиной стенки 0,9 мм, заполненную 200 таблетками диоксида урана.

Управление реактором осуществляется равномерно распределенными по реактору поглощающими стержнями из боросодержащего вещества. Их другое название – **стержни системы управления и защиты (СУЗ)**. Всего их – 211, причем каждый стержень расположен в специальном канале и перемещается индивидуальным сервоприводом. Для каналов стержней СУЗ предусмотрена отдельная система водяного охлаждения.

Реактор работает следующим образом (рис. 35). При помощи **главных циркуляционных насосов** (ГЦН) вода под давлением около *70 атмосфер* подается в нижнюю часть реактора. В технологических каналах она омывает сборки с ТВЭЛами, нагревается до температуры около 280 градусов и вскипает. Пароводяная смесь поступает в **барaban-сепараторы**, где пар отделяется от воды и подается на турбину. Отработанный пар конденсируется, возвращается в барабан-сепараторы и смешивается с водой, поступившей из реактора. Эта вода по трубопроводу вновь поступает в насосы. При необходимости в барабан-сепараторы подается дополнительная вода с помощью **питательных электронасосов**.

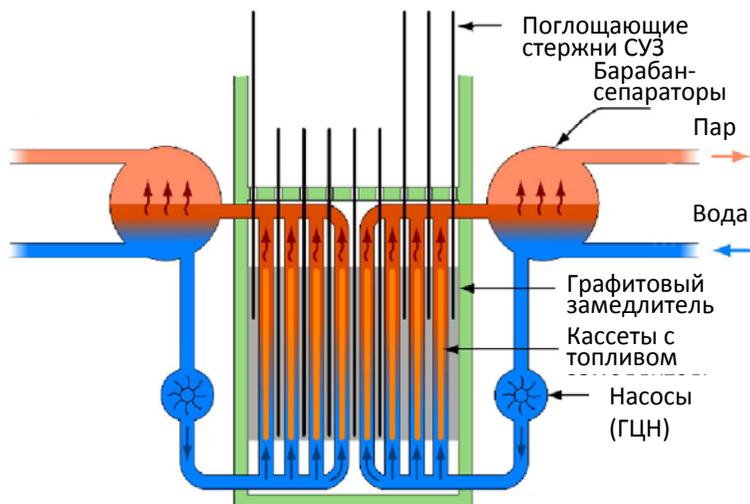


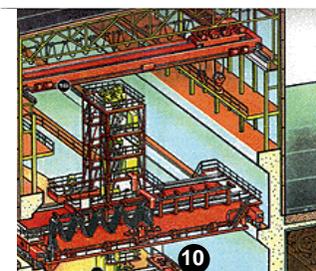
Рис. 35. Схема реактора РБМК

Замкнутая система труб, по которой циркулируют вода и пар, вместе с ГЦН и барабан-сепараторами образуют **контур многократной принудительной циркуляции**.

В системе используется шесть основных и два резервных ГЦН. Барабан-сепараторов – четыре, они имеют диаметр 2,6 м и длину 30 метров. Каждый реактор питает паром две турбины электрической мощностью по 500 *MВт* (тепловой – 1600 *MВт*), расположенные в отдельном здании. Турбинный (машинный) зал ЧАЭС – общий для всех энергоблоков, он имеет длину около километра.

Реактор размещается в железобетонной шахте размерами $21,6 \times 21,6 \times 25,5$ м (рис. 36). Графитовую кладку окружает стальной цилиндрический кожух толщиной 1,6 см. Вместе с блоками верхней и нижней биологической защиты, которые представляют собой массивные сложные металлоконструкции с отверстиями для каналов, кожух образует замкнутую полость. Эта полость (реакторное пространство) заполнена азотно-гелиевой смесью для предотвращения окисления графита и улучшения отвода тепла от него. Между кожухом и кладкой расположен боковой графитовый отражатель толщиной 100 см. За кожухом расположен кольцевой бак с водой, которая снижает поток излучения (боковая биологическая защита) и служит тепловым экраном. Пространство между баком и стенками шахты засыпано песком.

- 1 – активная зона
- 2 – пароводяные коммуникации
- 3 – барабан-сепаратор
- 4 – ГЦН
- 5 – раздаточно-групповые коллекторы
- 6 – подводящие трубопроводы



- 7 – верхняя биологическая защита
- 8 – разгрузочно-загрузочная машина
- 9 – нижняя биологическая защита
- 10 – бассейн выдержки

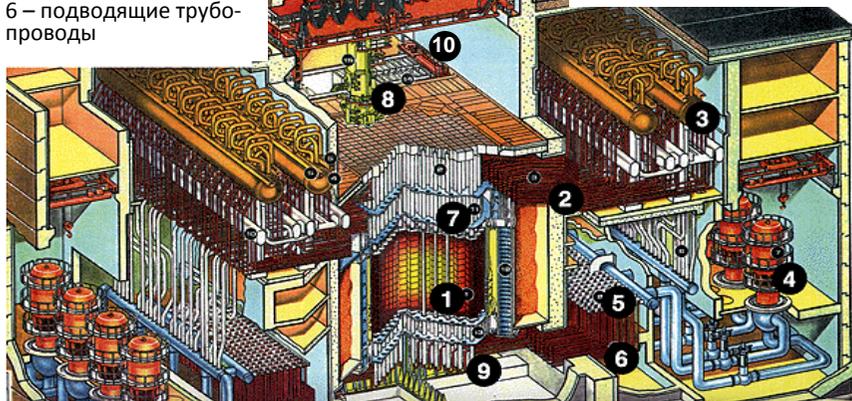


Рис. 36. Устройство РБМК-1000

Перегрузка топлива в реакторах РБМК осуществляется с помощью разгрузочно-загрузочной машины, обеспечивающей возможность замены топлива без остановки реактора (рис. 37).

Плитный настил состоит из съемных блоков, опирающихся на верхние фланцы технологических каналов. Блоки настила запол-



Рис.37. Центральный зал реактора. Вид на плитный настил и разгрузочно-загрузочную машину

нены серпентинитовым бетоном, их углы и верхние торцы облицованы сталью.

Серпентинит – плотная горная порода, используемая на АЭС для защиты от ионизирующих излучений.

Один из серьезных недостатков реактора РБМК – положительное значение парового коэффициента реактивности (см. 1.11). Возникновение пара в технологических каналах равносильно удалению части воды, поглощающей нейтроны. Это означает, что с ростом содержания пара в активной зоне (и одновременным обезвоживанием) растет мощность реактора, что, в свою очередь, увеличивает паровыделение [27–29]. Паровой коэффициент доминирует в полном мощностном коэффициенте реактивности. Поэтому между содержанием пара в технологических каналах и мощностью реактора при определенных условиях возникает *положительная обратная связь*. Ее нет в свежезагруженном реакторе, но она значительна в случае сильно выгоревшего топлива. Это явление, называемое **паровым эффектом реактивности**, послужило одной из причин чернобыльской аварии.

Как выяснилось, указанный недостаток возник на этапе проектирования, когда в силу несовершенства расчетных методик был выбран неоптимальный шаг решетки каналов [30]. Действующая методика свидетельствовала об отрицательном значении парового коэффициента реактивности, а на практике в некоторых режимах работы он оказывался положительным.

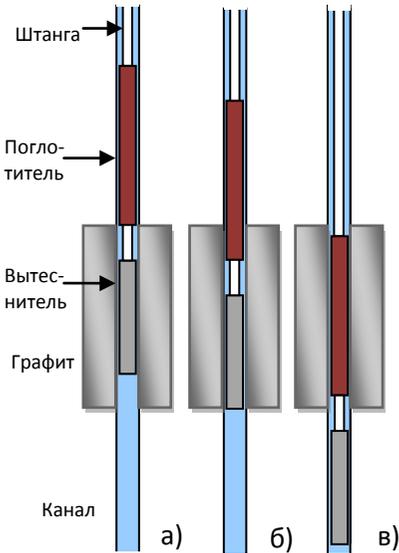


Рис. 38. Возникновение
концевого эффекта

поглощающего нейтроны (рис. 38 а).

Секция поглотителя имела длину около 7 м, почти равную высоте активной зоны. Вытеснитель же был сделан укороченным до 4,5 м. Дело в том, что на этапе проектирования было решено уменьшить глубину подреакторных помещений. В результате вытеснитель полной длины не помещался в них при полностью погруженном в активную зону поглотителе (рис. 38 в). В какой-то степени это решение было обоснованным: вытеснители были введены для экономии нейтронов, а в верхней и нижней части активной зоны нейтронный поток существенно ниже, чем в ее середине.

Однако это привело к тому, что при поднятых стержнях каналы СУЗ в нижней части активной зоны содержали столб воды

Другой недостаток реактора РБМК – т.н. **концевой эффект** [28, 29]. Стержни в каналах СУЗ энергетических реакторов должны омываться водой для охлаждения. Если не принимать специальных мер, под каждым управляющим стержнем, находящимся в верхнем положении, имеется столб воды. Вода же частично поглощает нейтроны. Поэтому с целью экономии нейтронного потока каждый стержень в РБМК был сделан двухсекционным: верхняя часть из карбида бора (поглотитель), а нижняя (вытеснитель), которая находится в активной зоне работающего на полную мощность реактора, – из графита, не погло-

высотой 1,2 м (рис. 38 а). Ситуация с поднятыми стержнями управления часто возникает в переходных режимах, особенно после кратковременных остановок или снижения мощности реактора (см. следующий параграф). При одновременном движении многих стержней вниз указанный столб воды вытесняется графитом (рис. 38 б), который практически не поглощает нейтроны. Это приводит к локальному вводу положительной реактивности в нижнюю часть активной зоны.

Существование концевго эффекта отчетливо проявилось в 1983 году в ходе пуска 1-го блока Игналинской АЭС и 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС. Неудачная конструкция стержней СУЗ впоследствии была признана ошибкой проекта и одной из причин аварии.

Следующая отрицательная особенность РБМК заключается в том, что из-за больших размеров реактора в различных его частях цепная реакция происходит практически независимо, как если бы в активной зоне работали несколько реакторов [30, 31]. В частности, это проявляется при большой выработке топлива. Сильнее всего оно выгорает в центре активной зоны, где максимален поток нейтронов. В результате распределение выделения энергии по высоте имеет «двугорбый» вид, а нижняя и верхняя часть активной зоны оказываются слабозависимыми. Такая ситуация снижает стабильность работы реактора, затрудняет управление им и способствует негативному проявлению концевго эффекта. Эта особенность РБМК-1000, как и наличие большого парового коэффициента реактивности, проявилась в ходе *аварии на Ленинградской АЭС* в 1975 году (см. следующий параграф).

Еще один недостаток РБМК – низкое быстродействие аварийной защиты [31]. В военных прототипах реактора стержни аварийной защиты полностью вводились в активную зону за время около 5–6 с, а «глушился» реактор уже к 3-й секунде. Это практически исключало возможность неуправляемого разгона реактора на мгновенных нейтронах. В ходе разработки РБМК оказалось, что осуществить столь быстрый ввод стержней в активную зону трудно из-за наличия охлаждающей воды в каналах СУЗ. При средней скорости перемещения управляющих стержней 0,4 м/с время их полного ввода в активную зону составляло около 18–20 секунд.

2.3. Ксеноновое отравление и оперативный запас реактивности. Авария на Ленинградской АЭС

Данный параграф предназначен для более глубокого понимания поведения реактора и действий персонала в ходе чернобыльской аварии.

Ксеноновое отравление – один из факторов, препятствующих развитию цепной реакции деления [28]. Оно заключается в накоплении продукта ядерной реакции – изотопа йода ^{135}I (период полураспада 6,6 часа) и последующем его превращении в ксенон-135 с периодом полураспада 9,1 часа. ^{135}Xe обладает свойством сильно поглощать нейтроны, поэтому его иногда называют «нейтронным ядом».

После пуска реактора, по мере выведения управляющих стержней и нарастания его мощности, количество ксенона-135 возрастает, что тормозит дальнейшее повышение нейтронного потока. Однако он все-таки растет, и в результате захвата нейтронов ксенон превращается в другие изотопы – происходит его «выгорание». В какой-то момент скорости образования ксенона и его выгорания сравниваются. Поэтому и количество ксенона, и мощность реактора сохраняются на одном уровне.

Рассмотрим *стационарный режим* реактора, когда его мощность постоянна. Поскольку часть нейтронов захватывается ксеноном, он вносит *отрицательную реактивность* в работу реактора (см. 1.11). Эта реактивность снижает эффективность использования ядерного горючего. Она компенсируется либо применением урана с более высоким обогащением, либо выдвиганием повышенного числа управляющих стержней из активной зоны реактора.

В ходе остановки реактора снижается нейтронный поток, а значит, прекращается выгорание ксенона. Накопленный ксенон исчезнуть сразу не может, так как имеет определенный период полураспада. В результате реактивность сначала падает, достигая минимума при максимальной концентрации ксенона, а затем увеличивается. Кривая изменения реактивности имеет вид ямы, поэтому действие отравления на реактивность реактора называют **йодной ямой**. Расчет показывает, что максимальное отравление наступает через 11 ч после остановки реактора. Реактор, находящийся в состоянии йодной ямы, повторно запустить сложно.

Ксеноновое отравление играет роль и при любом быстром изменении мощности реактора (*нестационарное ксеноновое отравление*). При снижении мощности также возникает йодная яма, но

в меньшем масштабе, чем при остановке реактора. Увеличение мощности сопровождается обратным эффектом: количество ксенона сначала уменьшается за счет ускорения его выгорания, а спустя некоторый промежуток времени возрастает за счет образования нового ксенона.

Для преодоления йодной ямы при любом режиме работы реактора должны существовать стержни, которые находятся в активной зоне, и их можно выдвинуть из нее. В связи с этим вводится понятие **оперативный запас реактивности (ОЗР)**.

По определению ОЗР – это реактивность, которую ядерный реактор имел бы при полностью извлеченных стержнях системы управления и защиты [28, 30]. Смысл этого определения на первый взгляд не совсем ясен. Однако в реакторе, работающем на постоянном уровне мощности, эта реактивность всегда скомпенсирована (до нуля) отрицательной реактивностью, которую вносит часть стержней СУЗ, находящаяся в активной зоне. Поэтому проще понимать этот параметр как запас реактивности для маневра мощности в сторону увеличения. Он обычно выражается в эффективном числе регулирующих стержней, полностью находящихся в активной зоне.

ОЗР не должен быть слишком велик: лишние стержни в активной зоне нормально работающего реактора фактически бесполезно поглощают нейтроны, снижая эффективность использования ядерного топлива. Кроме того, увеличенное значение ОЗР несет потенциальную опасность, поскольку в случае ошибки при выведении стержней СУЗ из активной зоны может быть внесено слишком высокое значение положительной реактивности.

Значение ОЗР в реакторах РБМК рассчитывается по программе «Призма» на ЭВМ информационно-управляющего вычислительного комплекса СКАЛА («Система комплексной автоматизации Ленинградской АЭС»). ЭВМ находится в отдельном помещении, в 50 м от щита управления блоком (БЩУ). Расчет ОЗР занимает определенное время, и его результат можно увидеть на распечатке, которую дежурный инженер по вычислительной технике должен специально сделать и принести к БЩУ.

Предписания Технологического регламента по эксплуатации 3 и 4 энергоблоков Чернобыльской АЭС с реакторами РБМК-1000 (далее – Регламент) относительно ОЗР выглядят следующим образом.

«На номинальной мощности в стационарном режиме величина оперативного запаса реактивности должна составлять не менее 26–30 стержней. Работа реактора при запасе менее 26 стержней допускается с разрешения главного инженера станции.»

При снижении оперативного запаса реактивности до 15 стержней реактор должен быть немедленно заглушен.

Научное руководство станции должно периодически (1 раз в год) рассматривать конкретные условия устойчивого поддержания полей энерговыделения на данном блоке и при необходимости пересматривать их в сторону ужесточения по согласованию с Научным руководителем и Главным конструктором».

Многими специалистами отмечается недосказанность пунктов Регламента, связанных с ОЗР. По причине отсутствия в реакторе оперативных датчиков и индикаторов оперативного запаса реактивности, напрашивается вывод, что допустимый ОЗР в Регламенте выбран не столько из соображений ядерной безопасности, сколько исходя из компромисса между экономичностью и маневренностью по мощности при работе в энергосистеме. Действительно, при большом ОЗР возможны потери в эффективности использования топлива, при малом – простои из-за попаданий в йодную яму. Отсутствие в Регламенте надлежащих акцентов и разъяснений приводило к тому, что на АЭС с реакторами РБМК требования к ОЗР иногда игнорировались.

Однако эти требования, которых в первых проектных документах не было, появились в Регламенте не случайно. 30 ноября 1975 г. произошла серьезная авария на Ленинградской АЭС [28, 30, 31, 32]. После остановки первого блока из-за отключения двух турбогенераторов, при подъеме мощности с нуля до 1700 МВт были повреждены около 30 топливных сборок и разрушен один канал активной зоны. Это произошло на станции, находящейся в ведении Минсредмаша, в эпоху, когда информация о состоянии дел в ядерной отрасли была закрытой. От общественности был скрыт факт значительного выброса радионуклидов в окружающую среду (порядка 1% от выброса на Чернобыльской АЭС). Доступных документов по этой аварии до сих пор нет, но сохранились воспоминания очевидцев. Стажер с Чернобыльской АЭС В.И. Борец, случайно оказавшийся в работавшей на тот момент смене, пишет [33]:

«При подъеме мощности после останова, без воздействия оператора на изменение реактивности (извлечения стержней), вдруг реактор самопроизвольно уменьшал период разгона, т. е. самопроизвольно разгонялся, другими словами, стремился взорваться. Дважды разгон реактора останавливала аварийная защита. Попытки оператора снизить скорость подъема мощности штатными средствами, погружая одновременно группу стержней ручного регулирования + 4 стержня автоматического регулятора,

эффекта не давали, разгон мощности увеличивался. И только срабатывание аварийной защиты останавливало реактор».

Из обрывков фактического материала вырисовались причины происшедшего. Это, во-первых, неустойчивость нейтронных полей, которая приводит к неоднородности энерговыделения в активной зоне и проявляется тем сильнее, чем меньше ОЗР. Во-вторых, проявил себя большой положительный паровой эффект реактивности. Главный конструктор в своих воспоминаниях пишет [34, 35]:

«Для исключения впредь аварий, приводящих к пережогу ТВЭЛов и канальной трубы вследствие локального повышения мощности, на реакторах РБМК были реализованы следующие мероприятия:

– внедрена 7–12-зонная система локального автоматического регулирования мощности и локальной аварийной защиты, работающая от внутризонных нейтронных датчиков;

– на реакторах второго поколения увеличено со 179 до 211 количество стержней СУЗ путем их размещения вместо топливных каналов в периферийной части активной зоны;

– введен минимально допустимый запас реактивности в количестве 15 стержней СУЗ, эксплуатация реактора с меньшим запасом реактивности была запрещена.

– введена автоматическая аварийная защита реактора по сигналу повышения давления в реакторном пространстве».

Также был осуществлен переход на топливо с более высоким обогащением (2,0 вместо 1,8%).

2.4. Что предшествовало аварии (испытание с выбегом турбины)

На 25 апреля 1986 года была намечена остановка 4-го блока ЧАЭС для планового ремонта. К этому моменту примерно три четверти ядерного топлива составляли ТВС первоначальной загрузки реактора. Это означает, что топливо было в значительной степени выработанным, а в ТВЭЛах находилось значительное количество радиоактивных продуктов деления.

Перед остановкой энергоблоков на АЭС обычно проводятся типовые работы и испытания, которые не могут быть выполнены на реакторе, работающем в штатном режиме. Для некоторых испытаний, таких как ввод новой или модернизированной системы, требуется составление и надлежащее согласование специальных рабочих программ.

25 апреля планировалось выполнить несколько таких работ и испытаний [10], в том числе:

- измерение вибраций турбины на холостом ходу;
- эксперимент с выбегом 8-го турбогенератора в режиме нагрузки собственных нужд 4-го энергоблока (разработчики: институт НИКИЭТ, институт Гидропроект, Донтехэнерго, завод «Электросила»; разработчики программы – Донтехэнерго и ЧАЭС).

Идея последнего испытания состояла в проверке способности турбогенератора (рис. 39) с вращающимся по инерции ротором вырабатывать электроэнергию для обеспечения жизненно важных систем реактора. Это необходимо для гарантированного охлаждения реактора в сложных аварийных условиях.



Рис. 39. Турбинный зал ЧАЭС

Такие условия могли сложиться в ходе максимальной проектной аварии (МПА), т. е. разрыва коллектора главного циркуляционного насоса с одновременным обесточиванием цепей собственных нужд энергоблока.

Напомним, что по сигналу МПА включаются и аварийная защита (АЗ), глушащая реактор, и система аварийного охлаждения реактора. САОР содержит две ступени. Вначале срабатывает *гидроаккумулирующий узел*, при этом из баллонов емкостью 120 м^3 под давлением газовой подушки в *60 атмосфер* заливается активная зона реактора. Одновременно с этим работают и штатные пита-

тельные насосы. После этого включается вторая ступень, называемая *подсистемой длительного расхолаживания*. Она содержит баки и насосы аварийной подпитки.

На случай аварии с обесточиванием станции предусмотрена дизель-генераторная станция, которая примерно через минуту способна подать электропитание на насосы штатного и аварийного охлаждения.

Таким образом, каждая из этих аварий по отдельности обеспечена необходимыми системами безопасности. Но если они произойдут одновременно, например, в результате террористического акта, то аварийные насосы САОР около минуты не смогут включиться в работу, пока не заработают дизель-генераторы.

Подобные ситуации начали прорабатываться после 7 июня 1981 года, когда группа израильских истребителей в ходе т.н. операции «Опера» серьезно повредила иракский реактор Осирак. Реактор был построен французами и предположительно мог использоваться Ираком для выработки оружейного плутония. Радиационных последствий не было, поскольку на момент атаки реактор не был заполнен топливом.

В случае такой двойной аварии особенно важна подача питания на питательные насосы (ПЭН), работа которых при обесточивании прекращается примерно через 0,5 с. Необходимости в подпитке главных циркуляционных насосов нет, поскольку за счет значительных маховых масс они могут работать по инерции около 2 минут. Однако ПЭН и ГЦН входят в один электрический контур, поэтому проще подпитывать и те, и другие.

Предложение использовать в аварийных ситуациях выбег генератора было выдвинуто Главным конструктором в 1976 году при создании РБМК второй очереди. Оно было поддержано Генеральным проектантом, отражено в проектной документации на новые АЭС и даже в учебных пособиях. **Режим выбега должен был быть штатным и в 3-4 блоках ЧАЭС**, но директор В.П. Брюханов принял эти блоки в эксплуатацию без него [24].

Первые испытания по «выбегу» турбины были проведены на 3-м блоке ЧАЭС в 1982 году с привлечением предприятия «Донтехэнерго». По результатам оказалось, что нуждается в доработке блок возбуждения турбогенератора. Испытания с модернизированным блоком выполнялись на ЧАЭС в 1984 и 1985 годах, но тоже не были завершены в полном объеме по второстепенным техническим причинам.

Новая «Рабочая программа испытаний турбогенератора № 8 Чернобыльской АЭС в режиме совместного выбега с нагрузкой

собственных нужд» разрабатывалась инженером «Донтехэнерго» Г. П. Метленко и была утверждена главным инженером ЧАЭС Н. М. Фоминым. Общее руководство испытаниями возлагалось на заместителя главного инженера по эксплуатации 2-й очереди ЧАЭС А. С. Дятлова.

Брюханов Виктор Петрович. С 1970 года – директор ЧАЭС. По специальности теплоэнергетик, после окончания Ташкентского политехнического института работал на Ангренской, Ташкентской, Славянской ГРЭС. Кавалер орденов Трудового Красного Знамени и Октябрьской Революции. В мае 1986 года планировалось его представление к званию Героя Социалистического Труда. После чернобыльской аварии В. П. Брюханов, главный инженер Н.М. Фомин, заместитель главного инженера А. С. Дятлов были приговорены к десяти годам заключения по ст. 220 УК СССР – неправильная эксплуатация взрывоопасных (!) предприятий.

Фомин Николай Максимович. Электрик по образованию, работал в Полтавских энергосетях и на Запорожской ГРЭС. С 1972 года – главный инженер ЧАЭС.

Дятлов Анатолий Степанович (1931–1995). После окончания МИФИ руководил физической лабораторией на заводе им. Ленинского Комсомола в Комсомольске-на-Амуре, где строили атомные подводные лодки. В 1973 году перевелся на строящуюся Чернобыльскую АЭС. В апреле 1986 года – заместитель главного инженера ЧАЭС. Награжден орденами Трудового Красного Знамени и Знак Почета. В начальной стадии ликвидации последствий аварии получил большую дозу облучения – порядка 5 Зв (лишь вдвое меньше смертельной) и попал в госпиталь.

Несмотря на диагностированную лучевую болезнь, отбывал наказание в тюрьме и колонии. В годы перестройки об освобождении Дятлова ходатайствовали многие известные люди, в том числе А.Д. Сахаров, а после смерти академика – его вдова Е. Г. Боннэр. В 1990 году был досрочно освобожден. Проходил лечение в ожоговом центре в Мюнхене. В 1995-м умер от сердечной недостаточности вследствие прогрессирующей лучевой болезни. Написал книгу воспоминаний, в которой отрицает свою вину в чернобыльской аварии и возлагает ее на разработчиков реактора.

Как отметила в 1991 году комиссия Госатомэнергонадзора [36], такие испытания должны квалифицироваться как комплексные испытания блока, и программу их проведения целесообразно было согласовать с Генеральным проектировщиком, Главным конструктором, Научным руководителем и органом государственного надзора. Однако действовавшие до аварии *Правила ядерной безопасности ПБЯ-04-74* [21] и *Общие положения по безопасности ОПБ-82* не требовали от руководства атомных станций проводить такое согласование.

Программа включала подготовительную часть (различные нештатные переключения в электрических цепях, подключение до-

полнительных насосов и др.), которая занимала почти все отведенное на эксперимент время. Собственно испытания (прекращение подачи пара на турбину и регистрация параметров выбега) должны были длиться примерно одну минуту.

Для проведения испытаний был собран специальный «блок выбега», выдающий сигнал МПА (максимальная проектная авария) в электрические схемы управления генератора и дизельных станций. Сам запуск выполнялся от кнопки «МПА», специально смонтированной на щите управления блоком.

Одновременно с нажатием этой кнопки старшим инженером управления турбиной должна была быть прекращена подача пара на турбину закрытием стопорно-регулирующих клапанов.

Хотя сигнал на запуск системы аварийного охлаждения (гидроремкостей и аварийных насосов) от кнопки МПА не подавался, во избежание случайного заброса холодной воды в контур охлаждения работающего реактора программой предусматривалось перекрытие ручными задвижками линий подачи воды из емкостей САОР на время эксперимента.

Согласно программе, реактор перед началом испытаний должен был иметь тепловую мощность 700...1000 *MВт*, т.е. примерно треть от номинальной. Имевшийся опыт проведения аналогичных испытаний в 1982, 1984 и 1985 годах, а также уровень подготовки персонала не вызывали сомнений в благополучном завершении эксперимента.

2.5. Хронология событий 25 апреля 1986 года

Благодаря публикациям специалистов, прежде всего сотрудников Курчатовского института и НИКИЭТ, в истории чернобыльской аварии многое известно до мельчайших деталей. Есть и развернутые публикации на эту тему.

В 1989 году появилось художественная повесть Г.У. Медведева «Чернобыльская тетрадь» [37], благодаря которой детали чернобыльской аварии стали известны широкой аудитории.

В 1995 году свои воспоминания («Чернобыль. Как это было?») опубликовал бывший заместитель главного инженера по эксплуатации второй очереди ЧАЭС А.С. Дятлов [38].

В 2004 году вышла научно-публицистическая монография А. А. Дьяченко «Опыт ликвидации последствий чернобыльской катастрофы» [39], построенная на огромном фактическом материале.

В 2006 году вышла книга «Чернобыль. Месть мирного атома» Н. В. Карпана [10], который в 1986 году был заместителем главного инженера Чернобыльской АЭС по науке и ядерной безопасности, но в момент аварии находился в командировке. В ней содержатся многочисленные подробности, в том числе о ходе судебного процесса по делу об аварии.

Строгая информация об аварии содержится во множестве официальных отчетов советских, российских, украинских и международных комиссий [36,40–42]. Все они основаны на анализе показаний многочисленных (несколько тысяч) датчиков внутриреакторного и технологического контроля. Эти показания были зарегистрированы показывающими и самопишущими приборами блочного щита управления (БЩУ), а также записаны на магнитной ленте специальной программой диагностической регистрации ДРЕГ комплекса СКАЛА. Большинство этих данных были рассекречены только в 1990 году.

В то же время до сих пор отсутствует доступ к некоторым материалам, в том числе показаниям приборов, вследствие чего по поводу некоторых событий, особенно в последние минуты перед аварией, можно строить лишь предположения.

25 апреля 1986 года события развивались следующим образом.

00 ч 00 мин – на дежурство к БЩУ-4 (рис. 40) приступила смена во главе с начальником смены блока (НСБ) А.Ф. Акимовым.

01 ч 00 мин – согласно графику остановки реактора, работающего на тепловой мощности около 3000 *MВт*, персонал приступил к ее снижению. В ходе этого началось отравление реактора продуктом деления топлива – ксеноном.

07 ч 10 мин – расчет по программе «Призма» дал значение ОЗР в 13,2 стержней регулирования. Согласно Регламенту, реактор было необходимо заглушить.

Согласно воспоминаниям А.С. Дятлова [38], было известно, что из-за сбоя в работе ЭВМ не учла реактивность, компенсируемую 12 стержнями автоматического регулирования, расположенными в промежуточных положениях по высоте активной зоны. Недостающие 1,8 стержня они перекрывали, поэтому работа была продолжена.

Вопрос о том, было ли решение продолжать работу нарушением, остается спорным. Есть косвенные данные, свидетельствующие о допустимости продолжения работы: так, два пункта Регламента разрешали работу без программы «Призма» на срок до 8 часов.

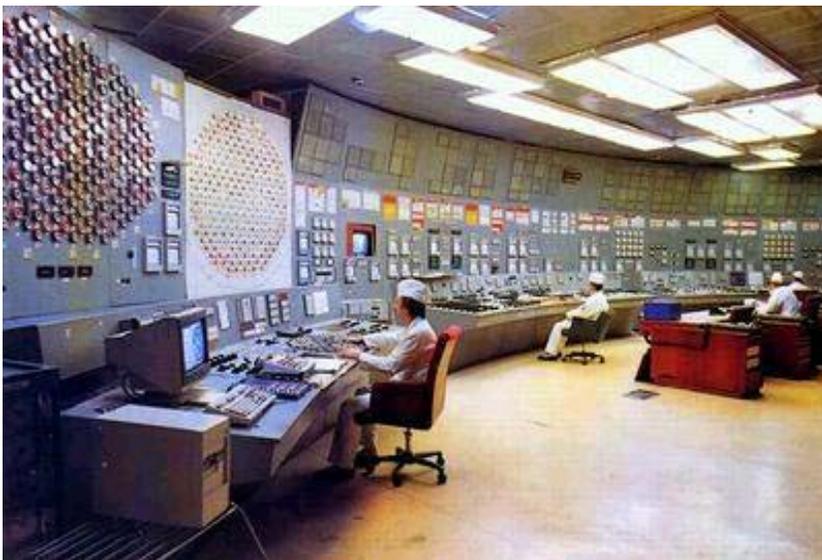


Рис. 40. Щит управления блоком с реактором РБМК

Далее реактор стал выходить из ксенонового отравления, и к 23 часам 25 апреля запас реактивности составлял 26 стержней, то есть был в норме.

08 ч 00 мин – на дежурство заступила смена НСБ И. И. Казачкова.

13 ч 05 мин – при тепловой мощности реактора 1600 МВт в соответствии с Программой отключен от сети турбогенератор № 7, электропитание собственных нужд осуществлялось с турбогенератора № 8.

14 ч 00 мин – также в соответствии с программой закрыты задвижки системы аварийного охлаждения, что блокировало быстроедействующую часть САОР, обеспечивающую охлаждение реактора при максимальной проектной аварии. Это предусматривалось программой во избежание попадания холодной воды системы аварийного охлаждения реактора в общий контур охлаждения.

Согласно Регламенту, система аварийного охлаждения реактора должна была находиться в состоянии готовности. В то же время отдельный документ – «Регламент переключения ключей и накладок технологических защит и блокировок» гласил, что с разрешения главного инженера станции разрешается выводить автома-

тику запуска САОР, что равносильно отключению быстродействующей части САОР.

В этот момент диспетчер Киевэнерго потребовал вывести реактор на номинальную мощность из-за дефицита энергии, возникшего в результате поломки на Трипольской ГРЭС. Его эксплуатация все дальнейшее время продолжалась с отключенной САОР. Однако следует отметить, что после отключения вплоть до самой аварии не было зарегистрировано ни одного сигнала на срабатывание этой системы.

16 ч 00 мин – на дежурство заступила смена НСБ Ю. Ю. Трегуба.

23 ч 10 мин – получено разрешение на остановку реактора. Его тепловая мощность была снижена до 750 МВт , как предусматривалось программой, ОЗР составлял 26 стержней регулирования.

2.6. 26 апреля 1986 года

00 ч 00 мин – вновь заступила смена Александра Акимова. Вместе с ним на смену заступили старший инженер управления реактором (СИУР) Леонид Топтунов, старший инженер управления блоком Борис Столярчук, старший инженер управления турбиной (СИУТ) Игорь Кершенбаум.

Кроме того, в помещении щита управления блоком БЩУ-4 находились операторы из предыдущей смены – начальник смены блока Юрий Трегуб и СИУТ Сергей Газин, стажеры СИУР из других смен – Виктор Проскуряков и Александр Кудрявцев, заместитель начальника турбинного цеха Разим Давлетбаев, начальник лаборатории Чернобыльского пусконаладочного предприятия Петр Паламарчук, а также представитель Донтехэнерго Геннадий Метленко (два его помощника находились в соседних помещениях).

Акимов Александр Федорович. Получил смертельную дозу радиации при попытке восстановить поступление питательной воды в реактор. Посмертно (в 2008 году) награжден орденом «За мужество» третьей степени.

Топтунов Леонид Федорович. В 1983 году закончил МИФИ. Получил смертельную дозу радиации при попытке восстановить поступление питательной воды в реактор. Посмертно награжден орденом «За мужество» третьей степени.

Проскуряков Виктор Васильевич. Получил смертельную дозу радиации, выполняя распоряжение опустить управляющие стержни вручную из центрального зала. Посмертно награжден орденом «За мужество» третьей степени.

Кудрявцев Александр Геннадиевич. Получил смертельную дозу радиации, выполняя распоряжение опустить управляющие стержни вруч-

ную из центрального зала. Посмертно награжден орденом «За мужество» третьей степени.

Согласно программе испытаний, далее было необходимо включить в работу два дополнительных ГЦН и приступить к переходу в режим выбега турбины.

00 ч 05 мин – произошло событие, которое серьезно нарушило ход испытаний. Мощность реактора продолжала снижаться. Причины, по которым это происходило, до сих пор не установлены, в том числе – из-за закрытого доступа к отдельным документам, описывающим работу реактора в ту ночь.

По одной из версий, сыграло роль то, что параллельно программе испытаний выбега турбогенератора планировалось измерение вибраций турбины на холостом ходу. Для поддержания турбогенератора на холостом ходу достигнутая к тому моменту и предусмотренная программой выбега мощность в 720 МВт была слишком велика. Поэтому ее и стали снижать дальше, до уровня собственных нужд. Показания некоторых свидетелей говорят, что это было сделано по распоряжению А.С. Дятлова.

Дятлов же и в показаниях на суде, и в книге воспоминаний [38] утверждает, что такой команды не отдавал, а сразу после приема смены ушел с БЩУ-4 для осмотра других помещений реактора и вернулся на щит управления в 00 часов 35 минут.

По другой версии, ночная смена А.Ф. Акимова приняла реактор на ходу, во время быстрого снижения мощности с уровня $1\ 600\text{ МВт}$, при наличии ксенонового отравления. Пришедший на смену старший инженер управления реактором Л. Ф. Топтунов не успел войти в сложную текущую обстановку и просто не сумел стабилизировать мощность на требуемом уровне.

00 ч 28 мин – так или иначе, мощность реактора снизилась до уровня около 500 МВт , когда по Регламенту движение стержней управления надо переводить с режима локального автоматического регулирования (ЛАР) на автоматическое регулирование мощности (АР). В локальном (обычном режиме) группы стержней можно перемещать независимо друг от друга – так эффективнее, а при низкой мощности все стержни должны двигаться одновременно.

Леонид Топтунов производит переключение, но при этом возникает дисбаланс в системе регулирования. СИУР не может быстро справиться с ним, и мощность реактора неожиданно падает до 30 МВт тепловых . При таком быстром снижении мощности

происходит стремительное ксеноновое отравление реактора, и он попадает в йодную яму.

Большинство специалистов считает, что молодой СИУР Леонид Топтунов совершил какую-то ошибку. По воспоминаниям Дятлова, причиной послужила неисправность регулятора АР.

Персонал принял решение о восстановлении мощности реактора и, извлекая поглощающие стержни из активной зоны, через несколько минут добился ее роста, а в дальнейшем – стабилизации на уровне 160–200 МВт (тепловых). При этом большинство стержней СУЗ оказалось в своих верхних положениях. Каков остался ОЗР и был ли он ниже регламентного, точно не известно. По показаниям умирающего Л. Топтунова, ОЗР составлял 18, по письму А. Дятлова Г. Медведеву – 12 [10], но в своей книге он указывает уже 24 стержня; согласно докладу СССР 1986 года в МАГАТЭ [40] в активной зоне оставалось 6–8 стержней.

Некоторые свидетели показывали, что распоряжение поднимать мощность реактора исходило от А. С. Дятлова. Дятлов же в своей книге пишет: *«Я согласился с предложением Саши Акимова поднять мощность до 200 МВт после провала по очень простой причине: до 700 МВт, согласно Регламенту, надо подниматься не менее получаса, а у нас и работы на полчаса, мощность такая не нужна ни для замера вибрации турбины, ни для эксперимента по Программе выбега ТГ – по последней реактор вообще глушился».* **Однако, возможно, все было иначе, о чем будет сказано в 2.16.**

00 ч 34 мин – 01 ч 05 мин – неустойчивость в работе реактора. Она проявлялась в многократных аварийных сигналах снижения уровня воды в барабан-сепараторах (БС) ниже порогового значения –600 мм; срабатываниях установки, отводящей пар от турбины в конденсатор, изменениях расхода питательной воды.

Стремясь сохранить реактор на мощности, персонал в **0 ч 36 мин** перевел уставку (порог) срабатывания аварийной защиты по давлению в БС с 55 на 50 кгс/см². «Регламент переключений ключей и накладок технологических защит и блокировок» допускал такое действие.

Режим срабатывания аварийной защиты по уровню воды в БС –600 мм, напротив, не был переведен с состояния АЗ-1 в состояние АЗ-5 (аварийная защита максимальной эффективности, которая приводит к опусканию всех поглощающих стержней). Это было нарушением «Регламента переключения ключей и накладок технологических защит и блокировок», предписывавшего такой перевод при снижении мощности до уровня ниже 60% от номинальной.

Нужно отметить, что режим был переведен из АЗ-1 в АЗ-5 25 апреля в 07:20, но когда снова был изменен – неизвестно. В то же время защита по уровню $-1\ 100\ \text{мм}$ оставалась включенной. Кроме того, неизвестны требования эксплуатационных документов, описывавших порядок перевода режима, а список аварийных защит в Регламенте защиту АЗ-5 по уровню в $-600\ \text{мм}$ не содержал.

Вспоминает Дятлов: *«Таким образом, аварийные защиты реактора были в полном объеме для такого режима, кроме защиты по уровню в барабан-сепараторах – она была $-1\ 100\ \text{мм}$ вместо $-600\ \text{мм}$ ».*

00 ч 41 мин – заблокирован сигнал аварийной защиты АЗ-5 по останову двух турбин. Согласно Регламенту, эта защита выводится при нагрузке мощности менее $100\ \text{МВт}$ (электрических), что и имело место.

Согласно Дятлову [38]: *«В тот раз А. Акимов меня не спрашивал, а если бы и спросил, то я бы разрешил. Это нужно было сделать. После провала мощности реактора в 00 часов 28 минут начало снижаться давление в первом контуре. Для предотвращения глубокой просадки давления, возможно, понадобилось бы закрыть пар на турбину, но тогда бы сработала аварийная защита реактора».*

00 ч 42 мин – турбогенератор ТГ-8 отключен от сети и проведено испытание по замеру вибрации турбины на холостом ходу.

01 ч 05 мин – тепловая мощность составляет $200\ \text{МВт}$, работа реактора стабилизирована. В отклонение от программы испытаний было решено проводить испытания на данном уровне мощности. Регламент при этом не нарушался: указанный уровень мощности являлся разрешенным и время работы на нем не ограничивалось.

01 ч 07 мин – в соответствии с Программой включены резервные седьмой и восьмой ГЦН. Это было предусмотрено для того, чтобы при завершении испытаний после остановки четырех «выбегающих» насосов реактор охлаждался другой четверкой, запитанной от резервной сети.

В этот момент имели место превышения расходов отдельных ГЦН, что нарушало Регламент, ограничивающий производительность каждого ГЦН величиной $6500\text{--}7000\ \text{м}^3/\text{ч}$.

01 ч 16 мин – закончились работы по замеру вибраций, и турбогенератор № 8 снова включен в сеть для выполнения программы выбега. Проверено прохождение сигналов с нештатной кнопки МПА.

01 ч 18 мин – начальник смены Акимов доложил о готовности к проведению последнего эксперимента. Вот как описывает заключительную подготовку к испытаниям А.С. Дятлов [38]:

«Собрал участников для инструктажа: кто за чем смотрит, и по действиям в случае неполадок, кроме оператора реактора – ему отлучаться при таком режиме не следует...»

Режим блока: мощность реактора – 200 МВт, от ТГ № 8 запитаны питательные насосы и четыре из восьми ГЦН. Все остальные механизмы по электричеству запитаны от резерва. Все параметры в норме. Система контроля объективно зарегистрировала отсутствие предупредительных сигналов по реактору и системам.

Для регистрации некоторых электрических параметров в помещении вне БЩУ был установлен шельфовый осциллограф, включался он по команде в телефон – «Осциллограф-пуск». На инструктаже было установлено, что по этой команде одновременно:

- закрывается пар на турбину;
- нажимается кнопка МПА – нештатная кнопка для включения блока выбега в системе возбуждения генератора;
- нажимается кнопка АЗ-5 для глушения реактора.

Команду Топтунову дает Акимов».

Забегая немного вперед, отметим, что стопорно-регулирующие клапаны турбины были закрыты через 1,3 с после включения осциллографа, кнопка МПА нажата еще через 6–7 с, а кнопка АЗ-5 – только через 36 с, уже в конце испытаний. Повлияло ли это на дальнейшее, будет обсуждено позже.

01 ч 22 мин – комплексом СКАЛА записаны параметры блока на магнитную ленту.

По данным Курчатовского института, полученным после аварии, ОЗР в этот момент составлял 6–8 стержней, и это объяснялось тем, что после включения всех восьми ГЦН увеличился расход питательной воды. В результате была введена отрицательная реактивность, которую пришлось компенсировать выдвиганием управляющих стержней. Однако, как уже отмечалось, средств индикации ОЗР на щите управления не было, ОЗР узнавался с помощью цифрового вызывного устройства или из доставляемых в БЩУ распечаток. По расчетам других специалистов, в частности Н.В. Карпана, ОЗР в этот момент составлял 15 стержней, то есть был допустимым.

01 ч 23 мин 04 с – начались испытания. Закрыты стопорно-регулирующие клапаны восьмой турбины, начался ее выбег. Все последующие события протекают в считанные секунды.

01 ч 23 мин 10 с – нажата кнопка МПА. Происходит запуск резервных дизель-генераторов. Эксперимент по выбегу турбины завершен.

01 ч 23 мин 40 с – нажатие кнопки глушения реактора АЗ-5. Все стержни СУЗ начали входить в активную зону с целью заглушить реактор, однако мощность реактора составила уже 530 МВт.

Дятлов [38]: *«Почему Акимов задержался с командой на глушение реактора, теперь не выяснишь. В первые дни после аварии мы еще общались, пока не разбросали по отдельным палатам, и можно было спросить, но я тогда, а тем более сейчас, не придавал этому никакого значения – взрыв бы произошел на 36 секунд ранее, только и разницы».*

01 ч 23 мин 43 с – аварийные сигналы по превышению мощности и по скорости повышения мощности.

01 ч 23 мин 47 с – резкое увеличение давления в барабанах-сепараторах; сигналы о неисправности измерительной регуляторов мощности.

01 ч 23 мин 49 с – сигнал аварийной защиты «повышение давления в реакторном пространстве», означающий разрыв топливных каналов; сигнал «нет напряжения 48 В» (питание муфт сервоприводов СУЗ – стержней управления и защиты). Старший инженер вытянул ключи питания муфт сервоприводов для их обесточивания, чтобы стержни опустились в активную зону под собственным весом.

01 ч 24 мин 00 с – согласно записи в журнале старшего инженера: *«Сильные удары, стержни СУЗ остановились, не дойдя до нижних концевиков. Выведен ключ питания муфт».*

Происходит аварийный разгон реактора, завершившийся двумя, по показаниям большинства очевидцев, взрывами.

Приведем слова начальника смены четвертого энергоблока А. Акимова, которые он повторял до самой смерти: *«Ничего не пойму. Мы все делали правильно...».*

2.7. Авария и первые часы после нее

Процесс аварийного разгона, приведшего к взрывам и разрушению реактора, изучен недостаточно. Большинство специалистов придерживается следующей картины.

По нажатию кнопки глушения реактора в результате парового и концевого эффектов в нем появилась значительная положительная реактивность. Поглощающая часть стержней СУЗ к этому

моменту вошла в активную зону всего на 1,5–2 метра и не препятствовала ее росту в нижней части активной зоны. В результате произошел разгон реактора на мгновенных нейтронах со стремительным ростом тепловыделения. По расчетам экспертов, первый пик в 100 раз превзошел номинальную мощность реактора за первые 4 секунды.

Как следствие, во множестве ТВЭЛов топливо разогрелось до температур, превышающих температуру плавления оболочек. В результате разрушились как ТВЭЛы, так и стенки технологических каналов, а пар получил выход в реакторное пространство. Напомним, что оно ограничено цилиндрическим кожухом реактора, верхним и нижним блоками биологической защиты, в которых жестко, на сварке, закреплены каналы.

Несмотря на срабатывание главных предохранительных клапанов реактора, ведущих к бассейнам-локализаторам, выброс пара привел к мощному взрыву, оторвавшему верхний блок биологической защиты. (Как позднее показали расчеты, для такого отрыва было достаточно разрушение всего нескольких ТК). В свою очередь, это привело к автоматическому разрушению всех остальных технологических каналов и выходу всего пара под давлением примерно 70 атм в окружающее пространство.

Второй взрыв (рис. 41) по одной из версий [37] произошел вследствие накопления значительного количества гремучего газа. Дело в том, что цирконий, из которого сделаны оболочки ТВЭЛов и части технологических каналов, при высоких температурах вступает во взаимодействие с водяным паром, разлагая его на водород и кислород (см. 1.7). Такая реакция начинается при 900°C , а бурно происходит уже при 1100°C . Расчеты показывают, что за счет пароциркониевой реакции в течение 3 с могло образоваться до 5000 м^3 водорода.

По другой версии [31] полное обезвоживание активной зоны внесло положительную реактивность, во много раз большую доли запаздывающих



Рис.41. Возможно, так выглядел второй взрыв

нейтронов β . К новому взрыву привел дальнейший разгон цепной реакции на мгновенных нейтронах.

Вспоминает начальник предыдущей смены Ю. Ю. Трегуб [43]:

«БЩУ дрожал. Но не как при землетрясении. Раздавался рокот, частота колебаний падала. А мощность их росла. Затем прозвучал удар. Я, из-за того что был ближе к турбине, посчитал, что вылетела лопатка (...) Удар этот был не очень. По сравнению с тем, что было потом. Хотя сильный удар. Сотрясло БЩУ (...)

И когда СИУТ крикнул, я заметил, что заработала сигнализация главных предохранительных клапанов. Мелькнуло в уме: «Восемь клапанов (...) открытое состояние!» Я отскочил, и в это время последовал второй удар. Вот это был очень сильный удар. Посыпалась штукатурка, все здание заходило, (...) свет потух, потом восстановилось аварийное питание».

Свидетельствует охранник Л. Бутрименко, который находился на расстоянии ста метров от 4-го блока:

«Во втором часу ночи услышал первый взрыв. Он был достаточно сильный, но глухой, как будто грохнул трамвай. Земля дрогнула под ногами, как при землетрясении. Я повернулся к 4-му блоку, и тут на моих глазах произошел еще более мощный взрыв. Разорванная крыша, как живая, приподнялась всей своей огромной массой, вниз полетели куски бетона и разные обломки. Бетонные плиты весом не менее одной тонны как игрушечные отбросило в сторону от реактора на несколько десятков метров, а некоторые улетели за ограждение 4-го блока ЧАЭС».

Из воспоминаний сотрудника ЧАЭС О. А. Романцева, рыбабившего в аварийную ночь вместе с коллегой А. М. Рудыком на берегу пруда-охладителя:

«Я увидел очень хорошо пламя над блоком №4, которое по форме было похоже на пламя свечи или факел. Оно было очень темным, темно-фиолетовым, со всеми цветами радуги. Пламя было на уровне среза трубы блока №4. Оно вроде как пошло назад, и раздался второй хлопок, похожий на лопнувший пузырь гейзера. Секунд через 15...20 появился другой факел, который был более узким, чем первый, но в 5...6 раз выше. Пламя также медленно выросло, а потом исчезло, как в первый раз. Звук был похож на выстрел из пушки. Гулкий и резкий».

По свидетельству других очевидцев, от четвертого блока пошел мощный грохочущий звук, потом последовательно раздалось два-три взрыва, и в облаке черной пыли над блоком взлетели какие-то светящиеся обломки и крупные искры, часть из которых упала

на крышу машинного зала. По докладным запискам сотрудников ЧАЭС были видны искры и раскаленные куски чего-то, напоминающие «горящие тряпки».

Взрывы в 4-м реакторе ЧАЭС сдвинули и повредили несущие конструкции реактора, разрушили все трубопроводы. Разрушились боксы барабанов-сепараторов, сами они были сдвинуты и оторваны от трубопроводов. Вторым взрывом подбросило блок верхней биологической защиты (схема Е) весом около 2000 т. По пути этот блок, называемый атомщиками «Елена», буквально снес плитный настил, пятидесятитонный кран и двухсотпятидесятитонную перегрузочную машину вместе с мостовым краном. Опустившись, «Елена» частично перегородила шахту реактора.

Увлекаемая паром, часть осколков активной зоны вместе обломками ТВЭЛов и раскаленным графитом была заброшена на трансформаторы подстанции, крышу третьего энергоблока, вентиляционную трубу АЭС, крышу турбинного зала, проломив ее (рис. 42). Расплавленное топливо начало стекать в подреакторные помещения.

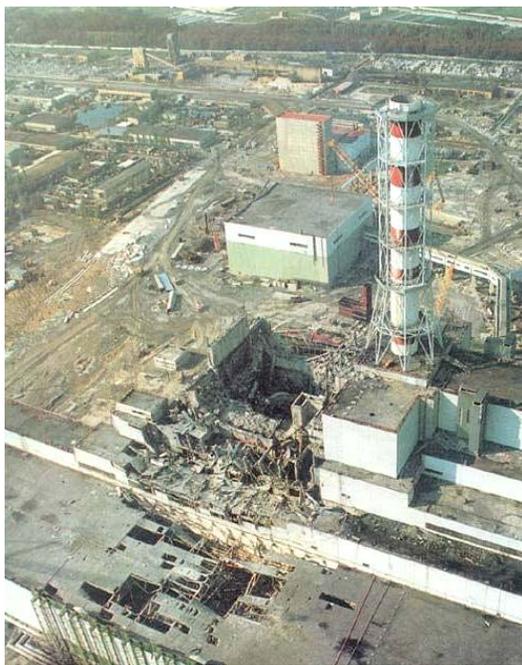


Рис.42. 3-й и 4-й блоки после взрыва

Часть топлива и продуктов его деления испарилась и вместе с более крупными частицами и водяным паром была выброшена в атмосферу.

Начались пожары в шахте самого блока, на крышах примыкающих зданий, в турбинном зале. Их очаги могли возникать от крупных фрагментов топлива и от графита, который при появившемся доступе воздуха начинал гореть. Температура горящего графита возрастала до 1500°C.

В первое время после взрывов персонал не осознавал, насколько сильно поврежден реак-

тор. Когда стало ясно, что стержни управления остановились на своем пути в активную зону, заместитель главного инженера А. С. Дятлов послал стажеров А. Кудрявцева и В. Проскуракова в центральный зал опускать стержни вручную. Распоряжение это было бесполезным, а стажеры получили смертельную дозу облучения, в чем позже Дятлов признал свою вину.

Наличие огромного уровня радиации было достоверно установлено только к 3:30, так как из двух имевшихся приборов, рассчитанных на измерение мощности дозы до 1000 P/ч (10 Зв/ч), один вышел из строя, а другой оказался недоступен из-за возникших завалов. В первые же часы после аварии не были известны ни реальные уровни радиации в помещениях блока, ни состояние реактора.

Рентген в час (P/ч) – устаревшая единица измерения мощности дозы, то есть уровня радиации. Здесь и далее используется современная единицы измерения дозы – *зиверт (Зв)*. В некоторых случаях корректнее использовать другую единицу – *грэй (Гр)*, тем не менее автор решил представлять все дозы в единообразных единицах измерения, что не сильно исказит суть информации. При уровне радиации 10 Зв/ч смертельная доза, равная примерно 10 Зв , достигается за 1 час. Подробнее о единицах измерения дозы см. 2.19.

Ошибочным оказалось и решение обеспечить подачу воды в активную зону реактора для ее охлаждения. Трубопроводы и активная зона были разрушены, поэтому вода шла в подреакторные помещения, куда попало много раскаленных высокорadioактивных продуктов. Образовавшийся пар приводил к дополнительному выносу радионуклидов за пределы блока. По пути вода затопливала помещения с электрическими кабелями и распределительными устройствами, приводя к многочисленным коротким замыканиям.

В момент аварии получил сильнейшие ожоги и был отправлен в медсанчасть оператор центрального зала Анатолий Кургуз. Затем выяснилось, что пропал оператор главных циркуляционных насосов Валерий Ходемчук. Начальник смены реакторного цеха № 2 Валерий Перевозченко с трудом добрался до помещения, где мог находиться оператор. Но Ходемчука там не было, его так и не нашли. Перевозченко же попал под струю радиоактивной воды, которая увеличила полученную дозу облучения до смертельной.

Начальник лаборатории Петр Паламарчук принес на руках инженера наладочного предприятия Володю Шашенка, который в момент взрыва вел наблюдение за приборами и был обдан горячей водой с паром. Его было приказано немедленно унести в медпункт, но ожоги оказались смертельными. Сам Паламарчук, разы-

скивая товарища, получил большую дозу облучения, в том числе от радиоактивной воды.

Самоотверженность проявил персонал электрического цеха во главе с заместителем начальника Александром Лелеченко и турбинного цеха под руководством заместителя начальника Разима Давлетбаева. Они участвовали в ликвидации очагов пожара, обеспечили замещение в генераторе водорода на азот, слили масло из маслобаков турбины в аварийные емкости снаружи энергоблока. Эти действия были необходимыми, они предотвратили еще более серьезные последствия, в том числе новые взрывы. Лелеченко после аварии нашел в себе силы еще несколько дней ходить на работу, в результате чего получил смертельную дозу облучения.

Смена третьего блока под руководством Юрия Эдуардовича Багдасарова, работая в условиях высокой радиации, вопреки распоряжениям начальства, заглушила свой реактор, предотвратив распространение аварии.

Особо следует отметить действия пожарных [43]. Сигнал о возгорании поступил на пульт дежурного военизированной пожарной части ВПЧ-2 по охране ЧАЭС в 1 ч 24 мин. К станции выехал дежурный караул в составе 14 человек во главе с лейтенантом Владимиром Павловичем Правиком. По прибытии на место в 1 ч 28 мин, верно оценив обстановку, молодой офицер направил подчиненных на тушение кровли машинного зала, чтобы отрезать пламя от остальных энергоблоков.

В 1 ч 35 мин к месту пожара прибыл дежурный караул сводной военизированной пожарной части СВПЧ-6 по охране города Припять в составе 10 человек, который возглавил начальник караула лейтенант Виктор Николаевич Кибенок. Он произвел разведку пожара в примыкающих к разрушенной активной зоне помещениях, без чего не были возможны дальнейшие действия.

В 1 ч 40 мин к месту аварии прибыл начальник ВПЧ-2 майор Леонид Петрович Телятников, находившийся тогда в очередном отпуске. Он взял на себя общее руководство тушением пожаров.

В 2 ч 10 мин удалось сбить огонь на кровле машинного зала, в 2 ч 30 мин – на крыше реакторного отделения. Водой, подаваемой с крыши, был ликвидирован пожар в помещениях ГЦН.

В 4 ч 00 мин на месте аварии было сосредоточено несколько отделений пожарной охраны из Киева и других мест. Всего в тушении пожара участвовало 69 человек личного состава и 14 единиц техники. К 6 часам утра пожар был затушен.

Работа пожарных велась в условиях огромной радиоактивности, на высоте до 71,5 м над землей. Из средств защиты у них были только брезентовые робы, рукавицы, каски. При выполнении этих работ многие получили большие дозы облучения, в том числе смертельные. Действия пожарных и персонала предотвратили распространение аварии на соседние энергоблоки, что могло многократно усугубить последствия.

В. Н. Шашенок умер в 6 часов утра от тяжелых ожогов в больнице города Припять. К этому времени были госпитализированы 108 человек, в оставшиеся часы 26 апреля еще 24 человека. Впоследствии у 134 сотрудников ЧАЭС и членов спасательных команд, находившихся на станции во время взрыва и непосредственно после него, развилась лучевая болезнь. Ниже представлен список погибших вскоре после аварии [44].

Акимов Александр Федорович, начальник смены блока (06.05.1953 – 11.05.1986)
Баранов Анатолий Иванович, старший дежурный электромонтер (13.06.1953 – 20.05.1986)
Бражник Вячеслав Степанович, машинист паровой турбины (03.03.1957 – 14.05.1986)
Ващук Николай Васильевич, командир отделения (05.06.1959 – 14.05.1986)
Вершинин Юрий Анатольевич, машинист-обходчик турбины (25.05.1959 – 21.07.1986)
Дегтяренко Виктор Михайлович, оператор ГЦН (10.08.1954 – 19.05.1986)
Иваненко Екатерина Александровна, охранник (11.09.1932 – 06.05.1986)
Игнатенко Василий Иванович, командир отделения (13.03.1961 – 13.05.1986)
Кибенко Виктор Николаевич, начальник караула (17.02.1963 – 11.05.1986)
Коновал Юрий Иванович, старший дежурный электромонтер (01.01.1942 – 28.05.1986)
Кудрявцев Александр Геннадьевич, старший инженер (11.12.1958 – 14.05.1986)
Кургуз Анатолий Харламович, старший оператор ЦЗ (12.06.1957 – 12.05.1986)
Лелеченко Александр Григорьевич, зам. начальника электроцеха (26.07.1938 – 07.05.1986)
Лопатюк Виктор Иванович, старший дежурный электромонтер (22.08.1960 – 17.05.1986)
Лузганова Клавдия Ивановна, охранник (09.05.1927 – 31.07.1986)
Новик Александр Васильевич, машинист-обходчик турбины (11.08.1961 – 26.07.1986)
Орлов Иван Лукич, изолировщик (10.01.1945 – 13.05.1986)
Перевозченко Валерий Иванович, начальник смены РЦ (06.05.1947 – 13.06.1986)
Перчук Константин Григорьевич, старший машинист (23.11.1952 – 20.05.1986)
Попов Георгий Илларионович, инженер ХТЗ (21.02.1940 – 03.06.1986)
Правик Владимир Павлович, начальник караула (13.06.1962 – 11.05.1986)
Проскураков Виктор Васильевич, старший инженер-механик (09.04.1955 – 17.05.1986)
Савенков Владимир Иванович, специалист по вибрациям ХТЗ (15.02.1958 – 21.05.1986)
Ситников Анатолий Андреевич, зам. главн. инженера 1-й очереди (21.01.1940 – 30.05.1986)
Тишунов Владимир Иванович, сержант (15.12.1959 – 10.05.1986)
Топтунов Леонид Федорович, старший инженер управления (16.08.1960 – 14.05.1986)
Тытенко Николай Иванович, старший пожарный (05.12.1962 – 16.05.1986)
Ходемчук Валерий Ильич, старший оператор ГЦН (24.03.1951 – 26.04.1986)
Шаповалов Анатолий Иванович, старший электромонтер (06.04.1941 – 19.05.1986)
Шашенок Владимир Николаевич, инженер (21.04.1951 – 26.04.1986)

Кроме персонала станции, в их числе 6 пожарных, 2 охранника, 4 прикомандированных. Причины смерти: В. И. Ходемчук – по-

гиб под завалами, В. Н. Шашенок – термические ожоги паром, у остальных острая лучевая болезнь.

В 1986 году были удостоены звания Герой Советского Союза пожарные В. П. Правик (посмертно), В. Н. Кибенок (посмертно) и Л. П. Телятников. Действия же других участников событий 26 апреля были оценены значительно позднее.

В 2008 году указом Президента Украины за мужество, самоотверженность, высокий профессионализм, проявленные во время ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы, орденом «За мужество» III степени посмертно награждены сотрудники ЧАЭС: А. Ф. Акимов, А. И. Баранов, В. С. Бражник, Ю. А. Вершинин, В. М. Дегтяренко, Ю. И. Коновал, А. Г. Кудрявцев, А. В. Новик, В. И. Перевозченко, К. Г. Перчук, В. В. Проскураков, Л. Ф. Топтунов, В. И. Ходемчук, А. И. Шаповалов.

Директор ЧАЭС В.П. Брюханов прибыл на станцию около 2 часов ночи [37]. По пути из служебного автобуса им было приказано дать оповещение об аварии и объявить общую готовность. Однако это распоряжение не было в полной мере реализовано. В ситуации на станции директор разобрался плохо, медлил с принятием решений. Работу по оценке радиационной обстановки пришлось взять на себя секретарю парткома ЧАЭС С.К. Парашину. У прибывшего вместе с ним начальника штаба гражданской обороны станции С.С. Воробьева был дозиметр ДП-5 с верхним пределом показаний 200 *рентген/час* (2 *ЗВ/час*). Прибор зашкаливал в разных местах блока и даже на значительном расстоянии от него.

Одно из первых сообщений Брюханова руководству:

«В Москву: ЦК КПСС Марьину, министру Майорцу, начальнику Союзатомэнерго Веретенникову. В Киев: министру энергетики Украины Склярову, секретарю обкома Ревенко (...)

Реактор цел. Подаем воду в аппарат. Взорвался бак аварийной воды СУЗ в центральном зале... Радиационная обстановка в пределах нормы. Погиб один человек – Валерий Ходемчук. У Владимира Шашенка – стопроцентный ожог. В тяжелом состоянии».

Около четырех утра Брюханов сообщил в Минэнерго СССР: *«Произошло два взрыва, реактор четвертого энергоблока заглушен и контролируется, третий энергоблок остановлен, отклонений в радиационной обстановке нет».*

Следствием неадекватного информирования о ситуации стали неверные действия вышестоящих руководителей. В 4:00 директору из Москвы приказали организовать непрерывное охлаждение реактора. Прибывший к месту аварии в 4:30 утра главный инженер Фо-

мин, которого долго не могли разыскать, проявил завидное рвение, выполняя этот приказ. Это было не только бесполезным, но и вредным. Вода из-за разрушенных трубопроводов не могла дойти до остатков реактора, зато в огромных количествах разносила радионуклиды по помещениям и территории станции.

После того как А. С. Дятлов был отправлен в медсанчасть, Фомин вызвал на станцию заместителя главного инженера по эксплуатации первой очереди Анатолия Андреевича Ситникова – опытного физика, и поручил ему оценить состояние реактора. А. А. Ситников обошел все доступные помещения блока, поднялся на крышу уцелевшей части здания. В десять утра, получив смертельную дозу облучения, он доложил Фомину и Брюханову, что реактор полностью разрушен. Его доклад вызвал раздражение руководства, а подача воды в реактор продолжалась...

2.8. Правительственная комиссия

В 11 часов утра 26 апреля распоряжением Совета Министров СССР № 830 была создана Правительственная комиссия (ПК). Ее председателем был назначен заместитель Председателя Совета Министров СССР Б. Е. Щербина.

В состав комиссии вошли [39]: А. И. Майорец (министр энергетики и электрификации СССР), А. Г. Мешков (первый заместитель министра среднего машиностроения), В. А. Сидоренко (первый заместитель Председателя Госатомнадзора СССР), В. И. Другов (заместитель министра внутренних дел СССР), Е. И. Воробьев (Первый заместитель министра здравоохранения СССР), Ф. А. Щербак (начальник Главного управления КГБ СССР), О. В. Сорока (заместитель Генерального прокурора СССР), Н. Ф. Николаев (заместитель Председателя СМ УССР), И. С. Плющ (председатель Киевского облисполкома), Н.П. Симочатов (председатель ЦК профсоюза рабочих электростанций и электротехнической промышленности), В. А. Легасов (академик АН СССР) и др.

Первые группы руководителей, специалистов, ученых вылетели на место аварии утренним и дневным рейсами 26 апреля. Перед комиссией были поставлены следующие задачи:

- анализ причин аварии и разработка на их основе рекомендаций по безопасной эксплуатации других АЭС;
- разработка оперативных мероприятий по локализации катастрофы и ликвидации ее последствий;
- защита населения от воздействия радиоактивных веществ, распространившихся в результате аварии.

Проблемы, с которыми столкнулась Правительственная комиссия, оказались чрезвычайно сложны. Стало ясно, что для их решения требуется мобилизация экономики всей страны. В ходе работы комиссии координировалась и контролировалась работа организаций и учреждений более 40 министерств и ведомств, воинских формирований.

При ПК были созданы оперативные группы по направлениям работы, каждая из которых возглавлялась одним из членов комиссии. Группа, руководимая А.Г. Мешковым, приступила к расследованию причин аварии. В первую же неделю после начала работы появился акт расследования, согласно которому наиболее вероятной причиной аварии называлось прекращение подачи воды в активную зону реактора из-за кавитационного режима работы ГЦН. Однако два члена группы (заместитель министра энергетики Г.А. Шашарин и директор ВНИИАЭС А.А. Абагян) подписать этот акт отказались.

В Минэнерго провели собственное расследование, в результате которого спустя примерно еще неделю появился документ под названием «Дополнение к акту расследования». Согласно этому документу кавитации на ГЦН не было, основной причиной аварии явились неверная конструкция стержней СУЗ и положительный паровой эффект реактивности, а решающим событием – нажатие кнопки остановки реактора АЗ-5 [10].

В числе задач, решаемых другими комиссиями, были:

- обеспечение безопасности 1, 2 и 3 блоков АЭС;
- аварийно-восстановительные работы;
- радиационный и дозиметрический контроль;
- охрана общественного порядка и организация эвакуации;
- дезактивация территории, сооружений АЭС;
- защита водных источников.

Для работ на площадке ЧАЭС были определены следующие этапы:

26.04.86 ÷ 1.06.86 – локализация аварии;

2.06.86 ÷ 1.07.87 – ликвидация последствий аварии в объеме, обеспечивающем возможность ввода в эксплуатацию 1 и 2 энергоблоков;

2.01.87 ÷ 1.04.88 – ликвидация последствий до уровня, гарантирующего локализацию радиоактивности в зоне ЧАЭС и обеспечивающего ввод в работу 3 энергоблока.

В связи со сложностью и многообразием проблем, а также отсутствием с самого начала единого мнения о причинах аварии

29 апреля 1986 г. была создана оперативная группа Политбюро ЦК КПСС под руководством председателя Совета Министров СССР Н. И. Рыжкова.

В ее состав вошли: В. И. Воротников (председатель Совета Министров РСФСР), Е. К. Лигачев (секретарь ЦК КПСС), В. М. Чебриков (председатель КГБ СССР), В. И. Долгих (секретарь ЦК КПСС), С. Л. Соколов (министр обороны СССР), А. В. Власов (министр внутренних дел СССР).

Из воспоминаний Н. И. Рыжкова [39]:

«Сейчас можно, вероятно, кинуть в нас очередной камень (...) Мол, не заседать надо, а действовать. Еще раз напомню, беда случилась в начале 86-го, когда авторитет Политбюро был непрекаемым. Только его именем можно было задействовать все и всех в стране, а события, понимали мы, шли к тому. Один пример. Довольно быстро комиссия Щербины (опять же Легасов предложил) нашла способ тушения реактора: забрасывать свинцом с воздуха. И один мой телефонный звонок заставил повернуть на Чернобыль все железнодорожные составы на дорогах страны, груженные свинцом. Сразу! И никто не посмел возражать».

Среди решаемых Правительственной комиссией проблем локализации аварии выделялись три основные.

Во-первых, в реакторе мог остаться неповрежденным крупный фрагмент уран-графитовой кладки, что представляло собой **ядерную опасность**. Первые расчеты показывали, что в отсутствие воды и стержней управления при температуре около 1000 градусов коэффициент размножения нейтронов k в таком фрагменте мог достигать 1,16. Это означало возможность самоподдерживающейся цепной реакции. Позже выяснилось, что температура достигала 2000 градусов, однако реальное значение k было все-таки меньше единицы.

Во-вторых, часть расплавленного ядерного топлива могла опускаться, прожигая все на своем пути, и это представляло собой **тепловую опасность**. Расчеты показывали, что возможно прожигание топливом нижнего блока биологической защиты и перекрытий бассейнов-локализаторов, заполненных водой. Это грозило новым тепловым взрывом и сверхмощным выбросом пара вместе с радионуклидами. Опасение вызывала и возможность опускания расплавленного топлива к уровню подземных вод («*китайский синдром*»).

Это жаргонное выражение возникло в середине 60-х среди американских ядерщиков. Оно произошло от шуточного сценария, в котором расплавившееся в результате аварии ядерное топливо способно прожечь Землю насквозь и дойти до Китая. Вышедший в году и имевший успех в США

фильм «Китайский синдром» содержал описание тяжелой аварии на АЭС. В нем были и правдоподобные фрагменты, однако изначально шуточный смысл словосочетания был многими воспринят на веру. По иронии судьбы, через 2 недели после выхода фильма на экраны в Три-Майл-Айленде случилась авария с частичным расплавлением активной зоны.

В-третьих, горение графита приводило к непрекращающемуся выбросу радионуклидов с высокой активностью. Высота подъема горячей радиоактивной струи достигала 2 км, что обусловило тропосферный перенос радионуклидов на значительные расстояния. Это представляло собой **радиационную опасность** для населения на огромных территориях.

2.9. Локализация аварии

Ночью 26 апреля Правительственная комиссия приняла решение о сбросе на реактор с вертолетов смеси из карбида бора, песка, доломитовых глин и свинца [39]. Уже утром 27 апреля вертолетчики начали забрасывать развал 4-го энергоблока песком и карбидом бора. В кратчайшие сроки была организована доставка всех остальных необходимых материалов. Состав смеси предложил член комиссии академик В. А. Легасов.

Валерий Алексеевич Легасов (1936–1988). В апреле 1986 года – первый заместитель директора Института атомной энергии имени Курчатова, разработавшего реактор. По специальности – химик-неорганик. После прибытия к месту аварии, выехав на бронетранспортере непосредственно к реактору, определил, что показания датчиков нейтронов о продолжающейся ядерной реакции недостоверны, так как реагируют не на нейтроны, а на мощнейшее гамма-излучение. Позже путем анализа соотношения изотопов йода доказал, что цепная реакция остановилась. Пробыв вблизи станции в общей сложности четыре месяца вместо положенных двух недель, получил значительную дозу облучения.

В августе 1986 года в качестве руководителя советской делегации на конференции МАГАТЭ в Вене представил официальный пятичасовой доклад [40] с анализом причин катастрофы и ее радиологических последствий. Доклад был одобрен Председателем Совмина Н. И. Рыжковым. По некоторым источникам, это было сделано вопреки мнению профильного ведомства – Минсредмаша, в результате чего позднее министр среднего машиностроения Ефим Славский отказался подписать представление на присвоение Легасову звания Герой Социалистического Труда.

Судя по всему, выступление в Вене стало поворотным пунктом в карьере академика. По одним предположениям, Легасов разгласил некоторые закрытые сведения, на что не был уполномочен. По другим – озвученная им официальная версия причин аварии вызвала неприятие у других ученых как не соответствующая истине. В 1987 году при тайном голосовании академика Легасова не избрали в научно-технический совет ИАЭ.

В том же году Легасов повторно представлялся к званию Героя Социалистического Труда, но снова не был награжден.

27 апреля 1988 года, на следующий день после второй годовщины чернобыльской аварии, академика Легасова обнаружили в своем кабинете повесившимся. Обстоятельства смерти до сих пор не выяснены. По официальной версии, произошло самоубийство вследствие болезни и угнетенного состояния психики.



Рис.43 Работа летчиков

Сомнения в этой версии вызывают некоторые факты. В частности, в ящике письменного стола лежал нетронутым наградной именной пистолет, а часть записанных на диктофон перед смертью размышлений была стерта. Тексты сохранившихся записей нетрудно найти в Интернете. В них, в частности, идет речь о несоответствии реактора РБМК требованиям безопасности, общем неблагоприятном положении дел в советской атомной энергетике [45].

В 1996 году В. А. Легасову было посмертно присвоено звание Героя России за «отвагу и героизм, проявленные во время ликвидации Чернобыльской аварии».

С 27 апреля в течение 10 суток к реактору непрерывно вылетали около 80 военных вертолетов (рис. 43) под руководством командующего штабом ВВС Киевского военного округа генерал-майора авиации Н. Т. Антошкина [46]. В первые

5 дней после аварии было сброшено среди прочих материалов 2400 тонн свинца и 1800 тонн песка. Летчикам требовалось с высоты не менее 150 м попасть в 5-метровую щель между верхним блоком биологической защиты (схема Е) и стенками шахты реактора.

Из воспоминаний Николая Тимофеевича Антошкина:

«Самые первые броски выполнили с Ми-8. Чтобы попасть в цель, вертолет в полете почти зависал над кратером. Борттехник, привязанный в грузовой кабине тросом, подтаскивал мешок к двери и кидал его в горящее жерло. Шесть-семь мешков кинет, весь «в мыле», жарко. На высоте сброса в 200 м температура

120–180 градусов. Радиация такая, что ДП-5 там просто зашкаливал. Мы тогда располагали только приборами, которые могли измерять уровни до 200 рентген...

После таких вылетов у борттехников наступали приступы рвоты. Сказывалась невыносимая жара и физическое перенапряжение. Это был адский труд».

Генерал Антошкин вместе с подчиненными таскал мешки на борт, сам вылетал к реактору. Покинул зону 6 мая по приказу командующего войсками округа, получив дозу облучения более 600 рентген (6 Зиверт) и потеряв 11 килограммов веса. В декабре 1986 года Н. Т. Антошкину было присвоено звание «Герой Советского Союза».

К 6 мая интенсивный выброс радионуклидов из реактора прекратился. Вероятнее всего, это произошло вследствие полного выгорания графитовой кладки. В пользу такого заключения свидетельствует тот факт, что нагруженная не попавшим в шахту песком и свинцом схема Е перевернулась и встала почти в вертикальное положение в практически пустой шахте (рис. 44). Переворот «Елены» сопровождался появлением выброса радиоактивной пыли и его вначале приняли за взрыв, однако проведенный анализ показал, что к счастью это не так [31]. Другой причиной прекращения выброса могло служить завершение процесса перетекания топливосодержащих масс в подреакторные помещения.

В 1987 году было окончательно выяснено, что в шахту реактора попала небольшая часть сброшенного с вертолетов, почти все

материалы оказались в бывшем центральном зале. Однако в мае 1986 года все это было неизвестно. Особенно опасались проникновения расплавленного топлива в почву.

В ночь со 2 на 3 мая по инициативе академика Е. Н. Велихова комиссией принято пред-

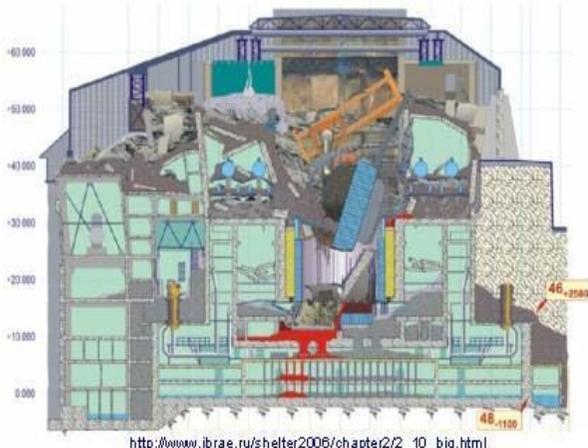


Рис.44. Состояние блока на момент сооружения защитного саркофага

ложение о создании под нижней железобетонной плитой реактора ледогрунтового основания. Для реализации этой задачи Минтрансстрою СССР было поручено [39]:

- отрыть в 140 м от четвертого блока котлован размером 30х20 м и глубиной до 6 м,
- прорубить из котлована под днище реактора 23–25 горизонтальных скважин для труб с необходимой арматурой,
- закачивая в трубы жидкий азот, обеспечить охлаждение грунта под днищем реактора до -191°C .

Следует отметить, что даже в зоне котлована уровень радиации достигал 0,1 Зв/час. 5 и 6 мая к месту работ была доставлена строительная техника, необходимые материалы и оборудование. Работа была начата, но не завершена: выяснилось, что возможно создание только разобщенных участков замороженного грунта.

В связи с этим, а также с начавшимся снижением температуры реактора, было решено отменить создание ледогрунтового массива и приступить к сооружению под фундаментом реактора «подушки» – охлаждаемой водой железобетонной плиты размерами 30,4×32,4×2,4 м. Внутри плиты должны были находиться трубы с водой для охлаждения и необходимая аппаратура контроля.

К 16 мая 1986 года транспортные строители свою работу закончили, а уже 12 мая в дело вступили шахтеры. Проходка штольни была поручена шахтопроходчикам из Донбасса и Тулы – предприятиям «Донецкшахтопроходка» и «Мосбассшахтострой». В работах также участвовали Минэнерго и Минсредмаш СССР. Вслед за шахтерами двигались бетонщики, прибывшие со строительства Рогунской ГРЭС.

Вспоминает управляющий трестом «Донецкшахтопроходка» Евгений Борисович Новик:

«Утром 4 мая 1986 года на заседании Правительственной комиссии присутствовали академики Велихов Е. П. и Легасов В. А., военные и члены комиссии. Силаев И. С. вел заседание (...)

Для выдачи исходных данных по геологическому заключению был вызван из Киева министр геологии Украины. Нужно подчеркнуть, что все вопросы решались мгновенно и оперативно. Связь со страной была исключительно надежной. Е. П. Велихов передавал прямо в Академию наук СССР исходные данные для расчетов на ЭВМ и тут же получал ответы. Любую техническую информацию можно было получить в считанные минуты из Академии наук. Мы разработали совместно с институтом схему проходки ствола и горизонтальной выработки, выполнили исполнительный график,

и с этим М. И. Щадов (министр угольной промышленности СССР) улетел в Москву».

Работы были начаты с углубления котлована (к началу работ его глубина была около 5 метров, а требовалось 6,5–7,0 м). В котловане был смонтирован проходческий щит, доставленный из Киева, и началась проходка штрека. За исключением установки железобетонных тубингов с помощью щита, все работы велись вручную, круглосуточно в восемь трехчасовых смен. Штрек под аварийный реактор длиной около 170 м был пройден и закреплен за 13 суток. Работы по созданию подушки были завершены к 28 июня.

...Чернобыльская авария потребовала небывалой для мирного времени мобилизации сил и средств огромной страны. В ходе локализации и ликвидации последствий решалось множество масштабных, сложнейших и уникальных задач.

Так, с целью предотвратить поступление загрязненных радионуклидами вод с площадки ЧАЭС в реку Припять была сооружена железобетонная «стена в грунте» [47] глубиной до 100 метров и протяженностью около трех километров...

С 11 мая 1986 года над зоной отчуждения и на дальних подступах к этим территориям велись работы по управлению выпадением осадков [48]. С этой целью использовались самолеты АН-12БП и дальние бомбардировщики ТУ-16, переоборудованные в начале 80-х годов в метеолаборатории по т. н. программе «Циклон». Метеорологам известны способы активных воздействий на облака, которые при определенных условиях могут как спровоцировать, так и предотвратить выпадение осадков. При этом с самолетов в облака внедряются («засеваются») специальные реагенты: йодистое серебро, цемент, сухая углекислота. Такие воздействия применялись над Москвой во время Олимпиады-1980, Международного фестиваля молодежи 1985 года и продолжают применяться при проведении массовых мероприятий, а также для борьбы с лесными пожарами.

Официальная информация о подразделении «Циклон» и его работах в связи с чернобыльской аварией до сих пор скупа, в связи с чем возникли разные предположения на этот счет.

По наиболее распространенной версии, применение авиации в период с 11 мая по 9 июня велось для разрушения кучево-дождевых и грозовых облаков на ближних подступах и в районе площадки Чернобыльской АЭС. Это позволило предотвратить смыв радиоактивных загрязнений дождями с территории АЭС

в реку Припять. В период с 15 сентября по 20 декабря 1986 года проводились работы по подавлению конвективных облаков, зарождающихся над Зоной и содержащих большое количество радиоактивной пыли.

Особые споры ведутся о роли в чернобыльских событиях самолетов Ту-16 «Циклон» (рис. 45). В 2007 году телеканалом «Би-Би-Си-2» был показан документальный фильм «Наука о суперштормах», в котором приведены свидетельства одного из командиров ТУ-16, майора Алексея Грушина. По его словам, он участвовал в операции по искусственному осаждению радиоактивных облаков над территорией Беларуси с целью не дать им распространиться в сторону крупных населенных пунктов, прежде всего Москвы.



Рис. 45. ТУ-16 «Циклон»

Согласно воспоминаниям А. Грушина, ТУ-16 воздействовал на облака со стратосферы; в его бомбоотсеке размещался т. н. комплекс кассетных держателей спецсредств. Дословно: *«Представлял этот комплекс собой 940 стволов калибра 50-мм. Снаряжался специальными патронами, начиненными йодистым серебром.*

Чтобы вам было легче представить эффективность этой системы, скажу, что одного патрона хватало для того, чтобы сделать «дырку» в облаках радиусом в полтора километра». И далее: «на балочных держателях под крылом Ту-16 подвешивались контейнеры для распыления цемента марки 600».

Версия об осаждении радиоактивных облаков не лишена противоречий. В фильме «Би-Би-Си» и более раннем интервью А. Грушина «Российской газете» [49] сообщается, что основной объем своей работы ТУ-16 выполняли осенью 1986 года и весной 1987. В то же время основные очаги радиоактивности сформировались в первые дни после аварии, о чем свидетельствуют официальные карты загрязнения.

2.10. Ликвидаторы

Ликвидация последствий чернобыльской аварии – значительный этап нашей истории. Он характеризуется не только поражающими воображение широкомасштабными и уникальными действиями – в нем переплелись судьбы миллионов людей, проявились как мужество, профессионализм и отвага одних, так и малодушие, некомпетентность и лицемерие других... Это тема серьезных исследований, публицистических и художественных произведений. Остановимся лишь на важнейших моментах.

На первых же заседаниях Правительственной комиссии выяснилось, что для ликвидации последствий аварии необходимо срочно привлечь значительное множество людей самых разных профессий и специальностей. В состав участников ликвидации последствий аварии («ликвидаторов») вошли:

- сотрудники ЧАЭС, продолжавшие выполнение своих обязанностей;
- кадровые военнослужащие и военнослужащие срочной службы Министерства обороны и Министерства внутренних дел;
- призванные на сборы военнослужащие запаса («партизаны»), в основном имеющие опыт службы в химических войсках;
- командированные из научных, проектных и других учреждений специалисты различного профиля, медики, а также строители, монтажники, водители, рабочие.

Всего в работах по ликвидации приняли участие по официальным данным [39] около 600 тыс. человек, из которых 380 тыс. военнослужащих. Основная часть работ была выполнена в 1986–1987 годах.

По воспоминаниям некоторых руководителей и ликвидаторов, в первые послеаварийные дни цена выполнения тех или иных заданий по изучению обстановки, локализации и ликвидации последствий измерялась в человеческих жизнях. Наибольшие дозы облучения получили сотрудники Чернобыльской АЭС, пожарные, медицинские и другие работники, которые находились в момент аварии на площадке и прилегающих участках. Эти дозы были соизмеримы со смертельной и составляли от нескольких единиц до 10 Зв и больше за счет внешнего облучения и примерно столько же или еще больше – за счет внутреннего облучения, в частности, щитовидной железы.

В последующем самыми сложными и опасными оказались работы на территории 3 и 4 блоков, особенно по расчистке крыш турбинного зала и третьего блока. Значения мощности дозы излучения в отдельных местах были чрезвычайно высоки. Так, на крыше 3 блока они достигали 30 Зв/час, а в некоторых местах у основания вентиляционной трубы – 100 Зв/час и выше. Следовательно, находиться там человеку было возможно не более десятков секунд.

Из воспоминаний одного из ликвидаторов [50]:

«Полагалось два выхода на крышу. На самой кровле работали всего 45 секунд. По секундомеру. Боец переодевался в защитный костюм, ему указывали: вон кусок графита лежит. Крыша, как футбольное поле. По двое-трое с лопатами должны были пробежать до графита за 15 секунд. Подхватить его на лопату и за следующие 15 секунд донести до края крыши, где стоял огромный контейнер радиоактивных отходов. Сбросить смертоносный груз в его пасть – и бегом обратно, еще 15 секунд».



Рис. 46. Специализированный транспортный робот СТР-1. Проработал в общей сложности около 10 часов и очистил около 20 кв. м крыши

Работы по очистке кровли первоначально планировалось осуществить робототехникой, однако и советские (рис. 46), и зарубежные роботы оказались неспособны выполнить все поставленные задачи. Они часто застревали на обломках, а из-за высоких уровней радиации происходили отказы электроники.

В дальнейшем практически все работы выполнялись ликвидаторами (рис. 47). Вот одна из официальных сводок того времени [39]:



Рис. 47. Работа на кровле. Фото Игоря Костина, корреспондента украинского АПН

«В работах по удалению высокорadioактивных веществ со второй трубной площадки Чернобыльской АЭС принял участие личный состав войсковых частей 44317, 51975, 73413, 42216 в количестве 1376 человек.

За время выполнения работ:

- собрано со 2-й трубной площадки главной вентиляционной трубы и сброшено в развал аварийного реактора 16,5 тонны радиоактивного зараженного графита;*
- собрано и удалено 11 полуразрушенных тепловыделяющих сборок с ядерным горючим общим весом 2,5 тонны;*
- собрано и сброшено в аварийный реактор более 100 кусков ТВЭЛов.*

Средняя продолжительность времени работ составляла 40-50 секунд.

Средняя доза облучения военнослужащих 10,6 рентгена» (примерно 100 мЗв).

В 1986 году предельный уровень дозы облучения для лиц, занятых на аварийных работах, составлял 250 мЗв и не превышал значений, рекомендованных Международной комиссией по радио-

логической защите и действующими в стране Нормами радиационной безопасности НРБ-76. Это требовало порядка, когда получившие максимально допустимую дозу облучения отстраняются от работы, а их место занимают другие. Однако такой порядок был установлен не сразу и не везде. Так, по воспоминаниям офицеров-ликвидаторов, первые группы резервистов находились на АЭС по 6 месяцев.

Суточные дозы обычно оценивались косвенно, из результатов предварительной дозиметрической разведки, и во многих случаях искажались. Индивидуальные дозиметры использовались относительно редко. В то же время уровни радиации были весьма неоднородными: фрагменты ТВЭЛов и графита создавали локальные очаги с чрезвычайно высокой мощностью дозы. Поэтому даже если не превышалась средняя по подразделению доза, часть личного состава сильно переоблучалась. Определить же дозы, полученные конкретными ликвидаторами, и ущерб их здоровью было практически невозможно.

По данным [51], среднее значение эффективной дозы внешнего облучения ликвидаторов в 1986 году составило 170 мЗв. Степень достоверности этих данных невелика хотя бы потому, что разными организациями, проводившими дозиметрический контроль, использовались различные типы дозиметров и методик измерения. Около 25% ликвидаторов вообще не имеют данных о полученных дозах.

После аварии российские ученые установили, что существенный рост раковых заболеваний среди облученных возможен при средней дозе 300 мЗв и более. Из 198 тысяч российских ликвидаторов такие дозы получила примерно пятая часть; прирост онкологических заболеваний среди них составил 3%.

Диагноз ОЛБ (острая лучевая болезнь) первоначально был поставлен в общей сложности 237 пострадавшим, включая персонал ЧАЭС и пожарных, и был окончательно установлен у 134 человек.

Очистка крыш от крупных обломков была завершена в сентябре 1986 года, в честь чего на вентиляционную трубу второй очереди было установлено красное знамя. Однако понадобились повторные очистки, которые производились в декабре 1986 года и в 1987 году. В результате дезактивации мощность дозы гамма-излучения в машинном зале третьего энергоблока к концу июля 1987 года не превышала 0,5 мЗв/ч.

Ликвидаторами был выполнен огромный объем работ по дезактивации населенных пунктов, территорий, дорог в 30-

километровой зоне АЭС и за ее пределами [39]. В ходе дезактивации проводились срезание и удаление загрязненного грунта, засыпка чистым грунтом загрязненных участков, асфальтирование дорог, улиц, тротуаров, замена кровель, заборов, снос загрязненных строений. Только летом и осенью 1986 года в этих работах было задействовано 44 тыс. человек и 10 257 единиц техники. Использовались бульдозеры, скреперы, грейдеры, бетоновозы, автокраны, панелевозы, специальная техника инженерных войск и подразделений гражданской обороны, авиация.

Всего было обработано 129 населенных пунктов, причем 57 из них потребовали повторной дезактивации, а 36 подвергались обработке 3 и более раз. Дело в том, что после однократной дезактивации мощность дозы излучения у поверхности земли снижалась всего в 3–5 раз.



Рис. 48. Кладбище военной техники

ника, вертолеты, автомобили, автобусы (рис. 48).

Массовая дезактивация населенных пунктов, пострадавших от аварии на ЧАЭС, продолжалась по 1989 год. Только в Беларуси за пределами 30-километровой зоны от Чернобыльской АЭС было дезактивировано около 500 населенных пунктов, а на отселенных территориях захоронено около 5 тыс. подворий и капитальных строений.

В ходе дезактивации снимался слой земли толщиной около 20 см. В результате возник огромный объем грунта, который нужно было перевезти и захоронить в специально создаваемых пунктах. Захоронению подлежали снесенные дома и подворья, поврежденная или не поддающаяся дезактивации тех-



Рис. 49. Рыжий лес

В результате радиоактивного выброса на площади около 10 км^2 вблизи реактора огромная доза облучения привела к гибели деревьев, преимущественно сосен, и окрашиванию их в бурокрасный цвет.

ни или здоровья, способны не все. Усилиями ликвидаторов создавались менее опасные условия для работы приходящих им на смену, безопасные условия для миллионов граждан, проживавших на значительных расстояниях от ЧАЭС.

2.11. Эвакуация. Защита населения. Информирование об аварии

Вопрос эвакуации города Припять обсуждался на первом заседании Правительственной комиссии вечером 26 апреля. В этот момент мощность дозы излучения в городе в среднем не превышала 1 мЗв/час . Она была значительно меньше, чем на площадке АЭС, поскольку в сложившихся метеоусловиях основная часть радиоактивного выброса перемещалась мимо города.

Согласно действующим в то время нормам радиационной безопасности эвакуация могла производиться в случае превышения прогнозируемой дозы облучения за первые дни после аварии зна-

Велось множество других работ: контрмеры по защите речных систем, захоронение «рыжего леса» (рис. 49) [47], постоянная дезактивация автотранспорта, подавление пылеобразования (особенно на грунтовых дорогах, обочинах шоссейных дорог, строительных площадках) специальными химическими составами, восстановление растительного покрова и залесение дезактивированных территорий.

Труд ликвидаторов заслуживает глубочайшего уважения и всенародной памяти. В наши дни даже просто представить себе ситуацию, когда нужно выполнить свою работу с риском для жизни

чения 250 мЗв и была обязательной при превышении значения 750 мЗв. При промежуточных значениях дозы право принимать решение принадлежало местным органам власти.

Однако в условиях недостатка информации о состоянии реактора нужно было учитывать и самые негативные сценарии развития событий, особенно возможности нового взрыва. В случае попадания расплавленного топлива в емкости с водой под реактором мог произойти паровой взрыв. При попадании в воду неразрушенного фрагмента активной зоны могла начаться неуправляемая цепная реакция. Расчеты показывали, что при этом в зоне с радиусом около 30 км возможны весьма серьезные последствия для населения, в том числе случаи острой лучевой болезни с летальными исходами.

По воспоминаниям В. А. Легасова [52]:

«Вот в этих условиях и шли дискуссии, но тут я должен сказать, что физики, особенно, Виктор Алексеевич Сидоренко (заместитель Председателя Госатомэнергонадзора), предчувствуя, что динамика будет меняться не в лучшую сторону, настаивали на обязательном принятии решения об эвакуации, но и, значит, медики здесь, что ли, уступили физикам и где-то в 10 или 11 часов вечера 26-го апреля Борис Евдокимович (Щербина), прослушав нашу дискуссию, принял решение об обязательной эвакуации».

Было решено вывозить основную часть населения автобусами, прямо от подъездов жилых домов (рис. 50). В ночь на 27 апреля сотрудники органов внутренних дел провели обход всех домов и определили количество жителей, проживающих в каж-



Рис. 50. Эвакуация Припяти

дом подъезде [53]. Утром в районе города было сосредоточено около 1200 автобусов (из них 100 – резервных) и примерно 200 бортовых грузовых автомобилей, а на железнодорожной станции Янов – два дизель-поезда.

После оповещения через радиосеть, начиная с 14:00 27 апреля, за три часа из города было вывезено около 45 тыс. человек, в том числе около 17 тыс. детей и 80 лежачих больных. В сопровождении машин ГАИ автобусы направлялись к пунктам дезобработки, а оттуда – к местам расселения в деревнях. Часть автобусов прошла через наведенный военными саперами дополнительный понтонный мост через реку Припять.

В городе остались лишь сотрудники ЧАЭС, члены Правительственной комиссии и ее аппарата, работники коммунальных и других служб. Последние покинули Припять после проведения неотложных работ по консервации городского хозяйства. 28 апреля из Припяти в Чернобыль передислоцировалась Правительственная комиссия, оперативные группы и штабы. Город Припять навсегда опустел (рис. 51).



Рис. 51. Город Припять. Вдали – ЧАЭС и сооружаемый саркофаг

В начале мая из-за продолжающегося выброса радиация обстановка продолжала ухудшаться. 2 мая в район аварии прибыло руководство государства во главе с Председателем Совета Министров СССР Н. И. Рыжковым и руководство Украинской ССР. В этот

день было принято решение о дальнейшей эвакуации: из 10- и 30-километровых зон вокруг ЧАЭС.

Из воспоминаний Н.И. Рыжкова [39]:

«Когда мы с Лигачевым прилетели в Киев, то оказалось, что ни первый секретарь ЦК Компартии Украины Щербицкий, ни его ближайшие соратники за эти уже долгие дни ни разу не удосужились побывать в зоне бедствия! (...)

Об обстановке коротко рассказали Щербина, Легасов, Майорец, Велихов, председатель Госкомгидромета Израэль. Потом медики выступили, химики о своих проблемах, а вернее, об общих (...)

Но был вопрос, который предстояло решить именно нам. Мне. На стол легла крупномасштабная карта, на которой нанесена была неровная, уродливая клякса – Зона опасного радиоактивного поражения, откуда следовало эвакуировать жителей. Если ткнуть иглой циркуля в точку с надписью "Чернобыль" и провести окружность радиусом 30 километров, то самые длинные и тонкие "языки" Зоны уперлись бы в нее...

Все ждали решения. Ошибиться было нельзя.

– Эвакуировать людей будем из 30-ти километровой Зоны!

– Из всей? – переспросил кто-то.

– Из всей! – решительно подвел я черту. – И начинать немедленно.

Когда спустя несколько часов мы возвращались в Киев, на встречу нам шли в Зону сотни пустых автобусов; казалось, что вся дорога от Чернобыля до Киева была ими занята. В Зоне должны были обезлюдеть 186 населенных пунктов».



Рис.52 Эвакуация

Эвакуация населения из 10-километровой зоны началась 2 мая в 18 часов. 30-километровая зона, эвакуация которой началась 4 мая, охватывала и часть территории Белоруссии. В числе других 4–5 мая было эвакуировано 50 населенных пунктов Гомельской области (рис. 52). Запрещалось брать с собой вещи, предметы обихода, домашних животных; мно-

гие были эвакуированы в домашней одежде. На вопросы людей, когда они вернутся домой, обычно сообщалось, что это произойдет через несколько дней.

В целом весной-летом 1986 года было эвакуировано 188 населенных пунктов (включая города Припять и Чернобыль), где проживало 116 000 человек. Эвакуировать пришлось также отдельные населенные пункты Могилевской области и Брянской области России. Из зон радиоактивного загрязнения было вывезено около 60 тысяч голов крупного рогатого скота и других сельскохозяйственных животных. В последующие годы по мере уточнения радиационной обстановки было отселено еще 220 000 человек [39].

Так в нашей жизни наряду с «ликвидаторами» возникло понятие «переселенцы». Эвакуация коренным образом изменила жизнь этих людей, но предотвратила накопление доз облучения до критических значений.

7 мая было принято постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР о трудовом и бытовом устройстве эвакуированного населения. В нем были определены меры по расселению людей, строительству нового жилья, трудоустройству и условиям оплаты труда эвакуированных. Все эвакуированное население получило денежную компенсацию: 4 тыс. руб. – главе семьи, 3 тыс. руб. – супруге, матери, по 1,5 тыс. руб. – каждому из остальных членов семьи. Владельцам покинутых домов была выплачена страховая сумма. За 1986–1987 годы для эвакуированных было построено 23 тыс. индивидуальных жилых домов, около 800 объектов социально-бытового и культурного назначения, выделено 15 тыс. квартир в таких городах, как Киев, Чернигов, Минск [39].

Дополнительные меры принимались и республиканскими органами. Так, правительством Украины была организована отправка учащихся 1–7 классов Киева и Киевской области в не пострадавшие области республики на трехмесячный летний отдых. Из трех южных районов Гомельской области на летний период были вывезены десятки тысяч детей и беременных женщин.

В 1987 году для персонала ЧАЭС было начато строительство нового города – Славутича (см. карту на рис. 30). В его строительстве принимали участие 8 союзных республик: Украина, РСФСР, Литва, Латвия, Эстония, Грузия, Армения и Азербайджан. К концу 1988 года в Славутиче уже проживала большая часть персонала станции. Сейчас в городе проживает около 26 тыс. человек.

Не все из предпринимаемых действий были верными, допускались и серьезные ошибки. Одна из непоправимых ошибок в том, что не была проведена своевременно и в требуемом объеме *йодная профилактика населения*.

Было хорошо известно, что в первые часы и дни после радиационной аварии наиболее опасно воздействие на человека радионуклидов йода, составляющих примерно четверть общей активности выброса. Самый долгоживущий из них – йод-131, имеющий период полураспада около 8 суток. Изотопы йода, химически тождественные обычному йоду, интенсивно накапливаются щитовидной железой, что обуславливает высокие дозы облучения самой железы и организма в целом.

В организм человека радиоактивный йод поступает двумя путями: ингаляционным (с воздухом) и пероральным (с пищей или жидкостью). В начальный момент преобладает ингаляционное поступление, затем нарастает пероральное – с молоком от животных, которые пасутся на загрязненных радионуклидами пастбищах, с овощами и фруктами.

Для значительного снижения аварийного поступления радиоактивного йода в щитовидную железу предусмотрена **йодная профилактика**. Она заключается в приеме йодсодержащих препаратов (обычно – йодистого калия) до или в первые часы после радиационной аварии. При этом содержащийся в препаратах стабильный йод «насыщает» щитовидную железу, что препятствует поступлению в нее радиоактивного йода. Рекомендуемая медиками доза составляет 0,125 г для взрослых и детей старше 2 лет; 0,04 г для детей до 2 лет. При отсутствии таблеток йодистого калия допустимо использовать другие йодсодержащие препараты: спиртовую настойку йода или раствор Люголя. Однако их применение рассматривается медиками как исключительная мера в связи с более высокой токсичностью атомарного йода, входящего в состав данных растворов.

Наибольший защитный эффект достигается, когда йодная профилактика проводится за 6-8 часов до начала поступления радиоактивного йода. Через 2 часа после радиоактивного выброса степень защиты составляет 80% и далее резко снижается. В начальный период аварии, когда основную опасность представляет ингаляционное поступление, достаточно однократного приема йодистого калия. При сохранении угрозы поступления в организм радиоизотопов йода для отдельных групп населения допустимы повторные приемы таблеток йодида калия наряду с применением других мер защиты.

Йодная профилактика достаточно своевременно была проведена лишь в г. Припять. Она позволила снизить дозы облучения жителей примерно в 2,5 раза. Для 30-километровой зоны профилактика была проведена с задержкой в несколько дней и не в полной мере, что позволило предотвратить не более 30% ожидаемой дозы. За пределами 30-км зоны профилактика проводилась лишь в отдельных местах с двухнедельной задержкой и была уже неэффективной.

Несмотря на существовавшие до аварии методические рекомендации и специальную шифровку по этому вопросу, направленную Правительственной комиссией М.С. Горбачеву, не были приняты необходимые для миллионов жителей европейской части СССР решения о запрете потребления молока и листовых овощей [10].

Серьезной ошибкой была принятая руководством страны линия на сокрытие информации об аварии. Объяснить такую линию можно стремлением предотвратить панику среди населения. Однако факты эвакуации двух городов и множества сел скрыть невозможно. Реальный эффект оказался обратным: передаваемая от человека к человеку информация, быстро распространяясь в обществе, сильно искажалась и приводила к настоящей панике у множества людей. Люди говорили о страшных последствиях облучения, предстоящей эвакуации Киева, Гомеля и других крупных городов.

Апофеозом этой ошибочной линии стало решение о проведении в стране первомайских демонстраций, в то время как за рубежом власти через СМИ настойчиво призывали своих граждан ограничить пребывание вне помещений и к другим профилактическим мерам.

Настроения руководства страны по вопросам информирования общественности о чернобыльской аварии красноречиво отражены в приведенных ниже отрывках протокола заседания Политбюро ЦК КПСС от 29 апреля 1986. Этот бывший совершенно секретным протокол приводится в публикациях А.А. Ярошинской – кандидата философских наук, бывшего народного депутата СССР, члена Президентского Совета во времена правления Б.Н. Ельцина [54].

«Горбачев М. С. (...) Чем честнее мы будем вести себя, тем лучше (...)

Когда будем давать информацию, надо сказать, что станция была поставлена на плановый ремонт, чтобы не падала тень на наше оборудование (...)

Громыко А. А. Необходимо (...) дать братским странам больше информации, а определенную информацию дать Вашингтону и Лондону. Соответствующие разъяснения нужно было бы дать и советским послам.

Алиев Г. А. Может быть, дать информацию нашему народу?

Лигачев Е. К. Возможно, не следует делать пресс-конференцию.

Горбачев М. С. Наверное, целесообразно сделать одну информацию о ходе работ по ликвидации аварии.

Яковлев А. Н. Иностранцы корреспонденты будут искать слухи (...)

Рыжков Н. И. Целесообразно дать три сообщения: для наших людей, для соцстран, а также для Европы, США и Канады.

Зимянин М. В. Важно, чтобы в информации отметить, что ядерного взрыва не было, а была лишь утечка радиации в результате аварии.

Воротников В. И. Можно сказать, что было нарушение герметичности при аварии.

Добрынин А. Ф. Правильно. Ведь у Рейгана наверняка уже на столе лежат фотоснимки (...)».

Центральные органы массовой информации хранили молчание до тех пор, пока об аварии не стало известно за рубежом. Вечером 27 апреля в Швеции был зарегистрирован резкий рост уровня радиации. В конце рабочего дня 28 апреля министр энергетики Швеции созывает срочную пресс-конференцию, на которой объявляется, что источник радиоактивного загрязнения находится восточнее Швеции, предположительно в СССР. А в 21:00 28 апреля по программе «Время» зачитывается сообщение ТАСС:

«На Чернобыльской атомной электростанции произошла авария, поврежден один из атомных реакторов. Принимаются меры по ликвидации последствий аварии. Пострадавшим оказывается помощь. Создана Правительственная комиссия».

Еще несколько дней СМИ передают из Припяти лишь сухую информацию: 4 мая сообщили о том, что место аварии осмотрели Рыжков и Лигачев, 5 мая – о факте гибели двух человек. Только шестого мая по украинскому телевидению к населению обратился министр здравоохранения УССР А.Е. Романенко. Он сообщил о повышенном уровне радиоактивного фона в Киеве и посоветовал меньше времени проводить на улице, реже проветривать помещения. Лишь 14 мая, через полмесяца после аварии, по центральному телевидению выступил Генеральный секретарь ЦК КПСС М. С. Горбачев.

Журналисты были допущены к месту событий в начале мая, после чего стали публиковаться достаточно подробные репортажи. В них шла речь о самоотверженных действиях специалистов и добровольцев, рекордной скорости ликвидации последствий, всенародной помощи пострадавшим.

Огромные же массы людей волновали другие вопросы: каковы масштабы загрязнения, насколько опасны повышенные уровни ра-

диации, как правильно питаться и, в особенности, как уберечь детей. Советские СМИ ответов на эти жизненно важные вопросы не давали. Немногочисленные публикации специалистов противоречили друг другу. Информация же западных радиоголосов также была не всегда правдивой. Некоторые западные СМИ писали о тысячах погибших, гибели малых городов и деревень Украины и Белоруссии, вымирании Киева. Все это вызвало распространение самых невероятных слухов и, в конечном итоге, значительное социально-психологическое напряжение среди огромных масс населения.

Решение о представлении детального доклада для специальной сессии Генеральной конференции МАГАТЭ было принято только после угрозы политической изоляции СССР. В последующем доклад, карты радиоактивного загрязнения и многие другие материалы получили гриф секретности или «для служебного пользования». Такой информационный вакуум длился до конца 80-х годов, когда часть материалов была рассекречена.

2.12. Чернобыльский саркофаг

После первоочередных действий по локализации последствий аварии с особой остротой встал вопрос о предотвращении дальнейшего радиоактивного загрязнения местности, водных бассейнов и атмосферы. Для этого требовалось строительство вокруг разрушенного 4-го блока специального сооружения – саркофага, способного перекрыть распространение радионуклидов и обеспечить надежную радиационную защиту населения. Этому же требовала поставленная Правительственной комиссией задача (см. 2.8) – обеспечить ввод в эксплуатацию неповрежденных блоков ЧАЭС [39].

Уже 27 апреля 1986 года Б.Е. Щербина назначил председателя строительной подкомиссии. Им стал заместитель министра энергетики СССР по строительству А.Н. Семенов. В первую очередь требовалась детальная схема консервации 4-го блока. Как вспоминает Александр Николаевич Семенов, только для разработки этой схемы *«согласно почасовому графику с утра 11 мая до вечера 12 мая необходимо было выполнить такой объем работ, на который в обычных условиях потребовалось бы более полугода»*.

В целях ускорения работ 5 июня 1986 года было принято Постановление ЦК КПСС и СМ СССР № 663-194, которым предписывалось Министерству среднего машиностроения (МСМ) в качестве Генподрядчика завершить основные работы по консервации не позднее сентября 1986 года. Генеральным проектировщиком был

определен ленинградский научно-исследовательский и проектный институт комплексной энергетической технологии, (ВНИПИЭТ), входящий в структуру МСМ, а научное руководство работами было возложено на Институт атомной энергетики им. И.В. Курчатова. Еще до этого приказом Министра МСМ № 211 от 20 мая было создано Управление строительством № 605 (УС-605).

Для разработки проекта консервации в предельно сжатые сроки было проанализировано 18 конструктивных решений. В их числе перекрытия арочного и купольного типа, консольная надвижная кровля, сооружение холма из щебня и бетона, заполнение шахты реактора металлическими полыми шарами и другие. Был выбран проект, предусматривающий возведение внешних и разделительных стен с максимальным использованием сохранившихся элементов энергоблока в качестве опор. Он обеспечивал меньшие по сравнению с другими материалоемкость и трудоемкость, приемлемые сроки. Проект объекта, получившего название «Укрытие», был выполнен с 20 мая по 20 августа 1986 года, но в ходе строительства он неоднократно дорабатывался.

Для снижения радиоактивных выбросов в атмосферу вначале планировалась установка временной защитной крыши, т.н. «Зонта». Однако в ходе испытаний «Зонта» на вертолетной площадке произошел обрыв троса между ним и вертолетом [39]. Пострадавших не было, однако «Зонт» пришел в негодность. Как вспоминают очевидцы, присутствовавший на испытаниях министр МСМ Е. П. Славский перекрестился, сказал: «Слава Богу», а работы с «Зонтом» были прекращены.

Для создания «Укрытия» было необходимо смонтировать около 6 тыс. тонн металлоконструкций и уложить 360 тыс. кубометров бетона. 100 тыс. кубометров требовалось только для площадки АЭС, на ней было решено уложить полуметровый слой бетона.

В первых числах июня в трех километрах от Чернобыля было начато строительство бетонного завода и причала для доставки щебня и песка [39]. Цемент доставлялся железной дорогой на станцию Тетерев и оттуда к бетонному заводу цементовозами. Параллельно создавались строительные базы и поселки для строителей. Места их расположения диктовались радиационной обстановкой. Чтобы исключить доступ «чистых» машин в «грязную» зону, в пяти километрах от АЭС был построен специальный узел перегрузки. Всего на строительстве было задействовано около 1000 единиц автотранспорта. Для доставки рабочих и ИТР до узла



Рис.53 Дистанционная подача бетона

перегрузки использовалось 160 автобусов, еще 80 автобусов с освинцованными салонами перевозили людей на площадку АЭС и обратно.

За 15 дней была запущена первая установка по изготовлению бетона, а 10 июля работали все три необходимые установки производительностью 6000 кубических метров в сутки. На вывозке бетона было задействовано 108 автобетоносмесителей и 80 самосвалов МАЗ. Вывозка щебня осуществлялась самосвалами КРАЗ с защищенными от излучения освинцованными кабинами.

Проект предусматривал минимальное присутствие людей в зоне с высокими уровнями радиации. Для этого использовались максимально возможная механизация работ, дистанционные методы укладки бетона и монтажа металлоконструкций. Конструкции проектировались предельно

укрупненными, с опорными узлами и соединениями, не требующими сварочных работ в зоне монтажа.

Для подачи бетона (рис. 53) использовались производительные автобетононасосы западногерманских фирм «Путцмайстер» и «Швинг», которые имели стрелы для подачи бетона длиной около 50 м и были оборудованы телекамерами и выносными пультами управления. На монтаже металлоконструкций работали уникальные краны фирмы «Демаг» с вылетом стрелы до 78 м и максимальной на то время грузоподъемностью – до 600 тонн.

Строительство, в котором в общей сложности приняло участие около 90 тысяч человек, началось в конце июня с бетонирования площадок [39]. Работы велись без выходных дней, круглосуточно, вахтами, численность которых достигала 10 000 человек. Ночью место работы освещалось мощными прожекторами, установленными на дирижабле (рис. 54).



Рис. 54. Строительство саркофага

По периметру разрушенного блока были возведены «пионерные» защитные стены из железобетона высотой от 6 до 8 метров. Это позволило несколько обезопасить последующую работу строителей. В августе было проведено рассечение коммуникаций, общих для 3-го и 4-го блоков. Затем были созданы перегородки, отделившие 4-й энергоблок от 3-го: внизу монолитный бетон толщиной 1,4–2,3 м, выше – полнотелые блоки; в некоторых местах производилось освинцовывание.

Разделение машинного зала и 4-го энергоблока было произведено поэтажным бетонированием расположенных между ними помещений. С севера (слева на рис. 54) стена выполнялась каскадом в виде выступов, последовательно приближающихся к разрушенному блоку. Выступы располагались в несъемной металлической опалубке и имели высоту около 12 метров. Внутри выступов захоранивались поврежденные конструкции, контейнеры с высокоактивными отходами. С южной стороны была уложена балка длиной 40 м и весом 160 т, которую из-за гигантских размеров окрестили «Мамонт».

Частично сохранившаяся западная часть была закрыта стеной с контрфорсами высотой до 50 метров (в центре на рис. 54). Для организации верхнего покрытия поперек металлических балок над

центральным залом было уложено 27 металлических труб диаметром 1,2 м и длиной 34,5 м. На них впоследствии была смонтирована крыша из профилированного настила.

Работа строителей велась в очень сложных условиях. Были установлены пределы облучения – не более 20 мЗв в сутки и не более 250 мЗв за все время работ; каждые два месяца планировалась замена работающих. Серьезному облучению подвергались даже водители: по их воспоминаниям, за день в опасную зону делалось 3–4 рейса, затем происходила смена. На рабочих местах были организованы санпропускники, регулярно менялась спецодежда.

Выполненные к осени работы позволили запустить в эксплуатацию реакторные блоки первой очереди ЧАЭС: пуск 1-го энергоблока состоялся 1 октября, 2-го – 5 ноября 1986 года. 3-й энергоблок ЧАЭС был принят в эксплуатацию 31 декабря 1987 года.

Кратко о дальнейшей судьбе ЧАЭС. В 1991 году на 2-м энергоблоке вспыхнул пожар, и в октябре этого же года реактор был полностью выведен из эксплуатации. В 1995 году был подписан меморандум о взаимопонимании между Правительством Украины, правительствами стран «Большой семерки» и Комиссией Европейского Союза, согласно которому предполагалось полное закрытие ЧАЭС. Запад увязывал возможность финансовых кредитов для решения проблем объекта «Укрытие» с закрытием станции. Несмотря на то, что проектный срок службы энергоблоков ЧАЭС был определен в 30 лет, 15 декабря 2000 года на ЧАЭС был остановлен реактор последнего, 3-го энергоблока.

В ходе сооружения саркофага не обошлось без человеческих жертв. 2 октября 1986 года потерпел аварию вертолет Ми-8 с экипажем из 4 человек. Вот имена погибших летчиков, до этого прошедших Афганистан [44]:

Воробьев Владимир Константинович (21.03.1956 – 02.10.1986),
Юнгкинд Александр Евгеньевич (15.04.1958 – 02.10.1986),
Христюк Леонид Иванович (28.02.1953 – 02.10.1986),
Ганжур Николай Александрович (26.06.1960 – 02.10.1986).

В тот день рядом с «Укрытием» был митинг, поэтому сохранился долгое время бывший засекреченным киноролик о случившемся... «Рука» бетононасоса подняла красный флаг, музыканты, сняв респираторы, заиграли марш. Звучали речи, вручались грамоты. А под конец появились вертолеты, которые по очереди подлетали к саркофагу и поливали его дезактивирующим раствором. Один из них, зацепившись за трос подъемного крана, рухнул на землю...

На завершающей стадии строительства монтировались система приточной и вытяжной вентиляции, датчики состояния реактора и выходящих из него газов, системы пылеподавления, аварийного орошения и фильтрации.

В ноябре 1986 года строительство саркофага завершилось и объект «Укрытие» был принят в эксплуатацию. Акт специально созданной Государственной комиссии был подписан 30 ноября 1986 года. 24 декабря Указом Президиума Верховного Совета СССР за мужество и самоотверженный труд начальнику управления строительством УС-605 Лыкову Геннадию Дмитриевичу было присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и золотой медали «Серп и Молот». Еще 21 работник управления был награжден орденами и медалями. После сооружения саркофага радиационная обстановка на площадке радикально улучшилась, а радиоактивные выбросы практически свелись к нулю.

2.13. Состояние разрушенного блока и объекта «Укрытие»

Параллельно с созданием «Укрытия» решалась другая важная задача – определить состояние топлива в разрушенном энергоблоке и обеспечить контроль над ним. На заседаниях Правительственной комиссии постоянно звучал обращенный к ученым вопрос: где находится основная часть топлива и представляет ли его состояние ядерную опасность [55].

Для ответа на этот вопрос специалистами, прежде всего ИАЭ им. Курчатова, был проведен ряд разнообразных исследований и разведывательных работ. С целью разведки широко использовались вертолеты. В июне 1986 года с их помощью было установлено, что мощность дозы гамма-излучения над реакторным блоком, кровлей машинного зала и развалом находится в пределах 6–9,5 Зв/час.

Предпринимались попытки разместить измерительные приборы как можно ближе к источникам радиации. В июле непосредственно в развал реактора был установлен специальный зонд «Игла». В августе–ноябре с помощью вертолетов и кранов «Де-маг» было установлено 15 специальных буев с разнообразной измерительной аппаратурой.



Рис. 55. Внутри саркофага. Фото
В.М. Ивлевой

В отсутствие подходящих роботов велась и разведка людьми (рис. 55). Летом 1986 года «сталкерам» удалось убедиться в отсутствии «китайского синдрома», установить в некоторые из помещений блока постоянные контрольные приборы. Были обнаружены растекшиеся лавообразные массы с остатками ядерного топлива. Языки лавы достигали 4 м толщины, один из них получил название «слоновья нога». Были измерены мощности дозы вблизи топливосодержащих масс на нижних отметках здания. Они лежали в пределах 1–100 *Зв/час*.

В конце 1987 года с целью обеспечения безопасности объекта «Укрытие» была организована комплексная экспедиция ИАЭ им. Курчатова. Один из выполненных ею проектов состоял в бурении наклонных скважин через бетонные стены и другие конструкции реактора. В скважины устанавливались перископы, телевизионные камеры, различные датчики; через них же осуществлялся и отбор проб. Скважины диаметром от 6 до 15 см и длиной до 25 м делались с помощью обычных бурильных станков. К середине 1989 года было пробурено 70 скважин, а к концу 1990 года их число превышало 100.

Экспедиция функционировала до мая 1992 года, когда все полученные обширнейшие материалы были переданы организованному в Чернобыле Межведомственному научно-техническому центру (МНТЦ) Академии наук Украины. Много информации о состоянии объекта «Укрытие» представлено на сайте www.ibrae.ac.ru Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Основные выводы ученых таковы [55].

- Топливо внутри объекта «Укрытие» находится в виде фрагментов разрушенных тепловыделяющих сборок, дисперсной

пыли, осевшей во всех помещениях блока, а также в составе образовавшихся лавообразных масс (см. рис. 44).

- Все топливо находится в глубоко подкритичном состоянии (коэффициент размножения нейтронов много меньше 1).

- В «Укрытии» находится от 90 до 95% всего топлива. Точное распределение массы топлива по отдельным помещениям блока неизвестно.

К основным недостаткам «Укрытия» относится следующее.

- Неизвестна прочность опор, которые поддерживают основные балки саркофага. В связи с этим проектировщики и строители оценивали срок службы объекта примерно в 30 лет.

- «Укрытие» не герметично. В 1990 году специалисты оценили суммарную площадь всех щелей и трещин в корпусе в 1000 квадратных метров. С этим связана угроза возможных выбросов из саркофага радиоактивной пыли. Кроме того, в «Укрытие» проникает дождевая вода, что вносит дополнительную неопределенность в состояние топливных масс и ускоряет процессы деградации материалов.

За время существования объекта «Укрытие» несколько раз велись серьезные работы по его укреплению. По терминологии ученых, на данный момент «Укрытие» представляет собой открытый источник ионизирующего излучения, который содержит ядерные материалы в неупорядоченном и неконтролируемом состоянии.

Возникали предложения о разборке саркофага с захоронением отходов и организацией на его месте «зеленой лужайки», т.е. экологически безопасной зоны. Однако выяснилось, что даже для частичной разборки «Укрытия» наука и техника наших дней не располагают приемлемыми решениями и техническими средствами.

В конце прошлого века был создан международный Чернобыльский фонд «Укрытие», в который входят США, Великобритания, Франция, Германия, Россия – всего 29 стран мира. При финансовой поддержке этого фонда разработан План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие», а в соответствии с указанным планом решено возвести новый саркофаг, который надежно накроет собой старый и все поврежденные блоки станции [56].

В итоге проведенного конкурса победителем был объявлен международный проект, который разработали ведущие европейские фирмы при участии украинских ученых. Подрядчиком строительных работ стал специально созданный концерн Novarka, в состав которого входят французские компании. Герметичное сооружение, создаваемое в виде арки из высокопрочной стали, получило

название *конфайнмент* (от англ. Confinement – «изоляция»). Его высота – 108 метров (больше 30-этажного дома), ширина – 257 метров, длина – 150 м (рис. 56).



Рис. 56. Строительство конфайнмента

150-метровая вентиляционная труба, присутствовавшая на всех фото ЧАЭС, не «вписывалась» в новый саркофаг. Кроме того, она была повреждена при аварии и в любой момент могла обрушиться. Трубу разобрали с помощью доставленного из Италии сверхтяжелого крана «Демаг» и захоронили в здании 3-го энергоблока.

Для обеспечения радиационной безопасности строительство ведется примерно в 200 м от старого саркофага, после чего арка будет надвинута на него. Плановая стоимость всех работ – 2,15 млрд. евро, их завершение предполагалось в 2015 году.

Проектный срок эксплуатации Укрытия-2 – 100 лет. Предполагается, что за это время будут найдены решения и средства для захоронения старого саркофага и его содержимого.

2.14. Наказание виновных

Вопреки идеалистическим представлениям о правде, жизнь учит нас, что бывает и полуправда, и даже несколько «правд». Пример – действия советского руководства по информированию общественности и населения о чернобыльской аварии (2.11). Похожим образом были выявлены и наказаны виновники чернобыльской аварии.

Уже отмечалось, что в выводах Правительственной комиссии о причинах аварии шла речь как об ошибках в действии персонала, так и о серьезных недостатках конструкции реактора. Ясность

в вопросе о причинах аварии и ее виновниках была уже 3 июля 1986 года, во время заседания Политбюро ЦК КПСС. Протокол этого заседания представлен в книге А.А. Ярошинской «Философия ядерной безопасности» [57] и других ее работах, в отрывках воспроизведен в книге Н. В. Карпана «Чернобыль. Месть мирного атома» [10] и других источниках. Ниже представлены фрагменты этого протокола.

Доклад Правительственной комиссии по расследованию причин аварии на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года.

Горбачев. (...) Слово предоставляется т. Щербине.

Щербина. (...) Оценивая эксплуатационную надежность реактора РБМК, группа специалистов, работавшая по поручению Комиссии, сделала вывод о несоответствии его характеристик современным требованиям безопасности. В их заключении сказано, что при проведении экспертизы на международном уровне реактор будет подвергнут «остракизму». Реакторы РБМК являются потенциально опасными. Видимо, на всех действовала настойчиво рекламируемая якобы высокая безопасность атомных станций. (...) Следует принять нелегкое решение о прекращении строительства новых атомных станций с реакторами РБМК. (...) В одиннадцатой пятилетке на станциях допущены 1042 аварийные остановки энергоблоков, в том числе 381 на АЭС с реакторами РБМК. (...)

После доклада состоялось обсуждение.

Горбачев. Комиссия разобралась, почему недоработанный реактор был передан в промышленность? В США от такого типа реакторов отказались. Так, тов. Легасов?

Легасов. В США не разрабатывались и не использовались такие реакторы в энергетике.

Горбачев. Реактор был передан в промышленность, а теоретические исследования не были продолжены. (...) Почему же все-таки не были продолжены теоретические исследования? Не получится ли так, что волюнтаризм отдельных лиц вовлекает страну в авантюру? (...) Кто вносил предложение о дислокации АЭС около городов? Чьи это были рекомендации? (...) Кстати, американцы, после имевшей место у них аварии в 1979 году не начинали строительства новых АЭС.

Мешков. Реактор испытанный. Только купола нет. Если строго выполнять регламент, то он безопасен.

Горбачев. Тогда почему же вы подписали документ, в котором говорится, что его производство нужно прекратить? (...) Вы

меня удивляет. Все говорят, что этот реактор не доведен, его эксплуатация может вызвать опасность, а вы здесь защищаете честь мундира.

Шашарин. Физика реактора определила масштаб аварии. Люди не знали, что реактор может разогнаться в такой ситуации. Нет убежденности, что доработка его сделает его вполне безопасным. Можно набрать десяток ситуаций, при которых произойдет то же самое, что и в Чернобыле. Особенно это касается первых блоков Ленинградской, Курской и Чернобыльской АЭС. Не может эксплуатироваться на имеющейся мощности Игналинская АЭС. Они не имеют системы аварийного охлаждения. Их в первую очередь следует остановить. (...) Строить дальше РБМК нельзя, я в этом уверен. Что касается их усовершенствования, то затраты на это не оправдаются. Философия продления ресурса АЭС далеко не всегда оправдана.

Горбачев. Что нужно сделать институту физики Курчатова?

Александров. Считаю, что это свойство (разгон) реактора может быть уничтожено. У нас есть соображения о вариантах решения этой проблемы. Это можно было бы сделать за один-два года.

Горбачев. Это касается ныне действующих реакторов?

Александров. Ныне действующие реакторы можно обезопасить. Даю голову на отсечение, хоть она и старая, что их можно привести в порядок. Прошу освободить меня от обязанностей президента Академии наук и дать мне возможность исправить свою ошибку, связанную с недостатком этого реактора. (...)

Рыжков. Мы к аварии шли. Если бы не произошла авария сейчас, она при сложившемся положении могла бы произойти в любое время. Ведь и эту станцию пытались взорвать дважды, а сделали только на третий год. Как стало сейчас известно, не было ни одного года на АЭС без ЧП. (...) Были также известны и недостатки конструкции реактора РБМК, но соответствующие выводы ни министерствами, ни АН СССР не сделаны. (...)

Содержание этих фрагментов лишает смысла подробные комментарии. Подытожим главное: реактор был небезопасен, разработчики скрывали недостатки реактора, не информируя о них даже эксплуатационников. Об этом же говорится и в части протокола, содержащей выводы.

Участники заседания рассмотрели причины аварии на ЧАЭС:

1. Авария явилась следствием досрочного прекращения теоретических исследований по безопасности реактора, что сделало

РБМК «потенциально опасным реактором». Виновность за это, в первую очередь, лежит на Руководстве государства, Руководстве Академии наук и Министерства среднего машиностроения.

2. Физикой и конструкцией реактора, в том числе системой его управления и защиты, не была исключена возможность «разгона» мощности реактора при некоторых рабочих ситуациях его промышленной эксплуатации. В этом виновны Научный руководитель и Главный конструктор реактора.

3. Разработчик Программы испытаний и персонал ЧАЭС, которых Главный конструктор не предупредил о способности РБМК к «саморазгону» в определенных ситуациях, ввели реактор в потенциально опасный режим. Виновность за это лежит на Главном конструкторе, руководстве эксплуатирующей организации и руководстве ЧАЭС.

Следует подчеркнуть, что о недостатках РБМК-1000 было известно до аварии. В самом Институте атомной энергии имени Курчатова, начиная с 1965 года, сотрудники И. Ф. Жежерун, В. П. Волков, В. Л. Иванов обращали внимание на ядерную опасность РБМК-1000 [30]. В докладных записках В. П. Волкова на имя директора института академика А. П. Александрова указывались конструктивные недостатки реактора. Как правило, эти докладные оставались без внимания. Однажды Александров все-таки распорядился провести совещание по поднятым вопросам, однако оно так и не состоялось.

Через год после аварии на Ленинградской АЭС (см. 2.3), в 1976 году, сотрудники ИАЭ Кунегин Е. П., Егиазаров М.Б., Кузьмин А. Н., Осипов А. А., Романенко В. С., Кватор В. М., Лавренов Ю. И., участвовавшие в расследовании, выдали рекомендации по повышению ядерной безопасности реактора [29]. В их числе снижение парового коэффициента реактивности, изменение конструкции стержней управления, повышение быстродействия аварийной защиты. Эти рекомендации были проигнорированы проектировщиками.

В 1983 году в ходе пуска 1-го блока Игналинской АЭС и 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС выявилось существование «концевого эффекта». По команде Главного конструктора в 1984 году разрабатывается техническое задание на совершенствование стержней управления, но до чертежей дело так и не дошло. В этом же году был создан Межведомственный научно-технический совет по атомной энергетике, принявший удивительное решение – временно «узаконить» отступления в проекте РБМК от норм и правил,

а переделку реакторов отложить на несколько лет, до наступления периода их плановой реконструкции. Все предложенные к этому моменту мероприятия легли в основу модернизации РБМК уже после чернобыльской аварии.

В своей книге [10] Н.В. Карпан пишет, что в адрес разработчиков реактора и Госатомэнергонадзор шли десятки писем с замечаниями к реактору. У инспектора по ядерной безопасности А. А. Ядрихинского перед пуском 4 блока на Курской АЭС возникли серьезные сомнения в ядерной безопасности РБМК-1000. В связи с этим в 1985 году были запрошены от Научного руководителя и Генерального конструктора дополнительные материалы и расчеты. Ответа не последовало. Позже А. А. Ядрихинский направил в Госатомэнергонадзор результаты анализа ядерной безопасности РБМК, которые выявили в конструкции реактора и системах его безопасности тридцать два грубейших нарушения ПБЯ-04-74 [29] и ОПБ-82. В ответ последовали отписки.

О недостатках реакторов РБМК сигнализировали и сотрудники КГБ. Так, еще в 1984 году начальник 6-го отдела УКГБ УССР по г. Киеву и Киевской области полковник Турко неоднократно сообщал своему начальству о недостатках энергоблоков ЧАЭС. Вот выдержка из одного документа [58]:

«Секретно

Начальнику 3 отдела 6 Управления КГБ УССР

Об обстановке на Чернобыльской АЭС

В процессе проведения контрразведывательных мероприятий (...) нами был проведен анализ надежности работы энергоблоков ЧАЭС. В результате изучения установлено, что первый и второй энергоблоки ЧАЭС менее надежны в плане безопасности окружающей среды, т.к. при возможных разрывах трубопроводов контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) диаметром более 300 мм системы аварийного отключения и безопасности не обеспечат локализации утечки теплоносителя, что приведет к радиоактивному заражению местности. Третий, четвертый и последующие блоки ЧАЭС конструктивно выполнены более надежно, поскольку на них имеется блок локализации аварий, практически предотвращающий утечку теплоносителя при разрывах трубопровода КМПЦ любого диаметра. Вместе с тем, по данным специалистов, эти блоки не гарантируют надежной и безопасной работы, т.к. испытания их в экстремальных условиях не проводились. Анализ аварийных ситуаций и отказов в работе оборудования, установленного на станции, свидетельствует о низкой

надежности автоматики управления реактором. Около 50% отказов происходит по вине заводов-поставщиков (...)».

В других докладных полковник пишет о недопустимости снижения мощности реактора по командам диспетчеров энергосистемы. Кроме недовыработки электроэнергии атомной станцией и соответствующего перерасхода органического топлива на тепловых станциях, «каждое снижение мощности реакторов отрицательно сказывается на их надежности и долговечности в работе. Кроме того, как следует из «Технического проекта реактора РБМК-1000», он должен работать в базовом режиме. При изменениях мощности реактора в процессе его эксплуатации наблюдается увеличение выбросов радиоактивных аэрозолей в окружающую среду, происходит неполное выгорание ядерного топлива и его преждевременная выгрузка, создаются температурные перенапряжения в конструкционных материалах аппарата, тем самым увеличивается вероятность предпосылок к аварийным остановкам (...)».

Удивительно, но против идеи о продвижении АЭС в европейскую часть СССР выступал генеральный конструктор реактора РБМК академик Доллежал. Кроме служебных записок, которые были проигнорированы, в 1979 году Доллежал написал на эту тему статью «Ядерная энергетика: достижения и проблемы» в журнале «Коммунист». В ней он предлагал строить станции вместе со всем перерабатывающим циклом далеко от населенных мест. Через некоторое время в журнале «Проблемы мира и социализма» появилась статья научного руководителя проекта, президента АН СССР академика Александрова, дезавуирующая выступление Доллежала [37].

После заседания Политбюро 3 июля 1986 года последовали организационные выводы. Научный руководитель проекта РБМК, глава ИАЭ им. Курчатова академик Александров покинул пост президента Академии наук. Главный конструктор академик Доллежал был вынужден покинуть все занимаемые посты и уйти на пенсию. Министр Минсредмаша Славский и его первый заместитель Мешков, а также замминистра энергетики и электрификации Шашарин и начальник Союзатомэнерго Г.А.Веретенников ушли с руководящих должностей.

Широким массам в газете «Правда» 20 июля 1986 года была дана такая информация:

«Политбюро ЦК КПСС на специальном заседании обсудило доклад Правительственной комиссии о результатах расследования причин происшедшей 26 апреля 1986 года аварии на Чернобыльской

АЭС, мерах по ликвидации ее последствий и обеспечению безопасности атомной энергетики.

Установлено, что авария произошла из-за целого ряда допущенных работниками этой электростанции грубых нарушений правил эксплуатации реакторных установок. На четвертом энергоблоке при выводе его на плановый ремонт в ночное время проводились эксперименты, связанные с исследованием режимов работы турбогенераторов. При этом руководители и специалисты АЭС и сами не подготовились к этому эксперименту, и не согласовали его с соответствующими организациями, хотя обязаны были это сделать. Наконец, при самом проведении работ не обеспечивался должный контроль и не были приняты надлежащие меры безопасности.

Министерство энергетики и электрификации СССР и Госатомэнергонадзор допустили бесконтрольность за положением дел на Чернобыльской станции, не приняли эффективных мер по обеспечению требований безопасности, недопущению нарушений дисциплины и правил эксплуатации этой станции...»

Так в широких кругах начало формироваться мнение о том, что авария на ЧАЭС – результат несанкционированного эксперимента, проведенного недостаточно квалифицированными работниками станции в нарушение всех регламентов и правил безопасности.

По факту аварии уже 26 апреля 1986 года прокурором Киевской области было возбуждено уголовное дело № 19-73 по признакам преступления, предусмотренного ч. 2 ст. 220 Уголовного кодекса УССР «Нарушение правил безопасности на взрывоопасных предприятиях или во взрывоопасных цехах». Показательно, что атомные электростанции ни по одной инструкции не относились к взрывоопасным объектам [10].

Для расследования дела на следующий день в УССР была создана следственная группа, в которую, помимо следователей прокуратуры, были включены также следователи органов госбезопасности и органов внутренних дел, а с учетом сложности обстоятельств в Москве дополнительно создана следственная бригада.

До 5 мая 1986 г. следственную бригаду возглавлял представитель прокуратуры УССР Иванов П. Н., затем представитель Прокуратуры СССР Восковцев Н.П. С 14 июля 1986 года по указанию бывшего Генерального прокурора СССР А. Рекункова бригаду возглавил его старший помощник Ю. А. Потемкин. Под его руководством было завершено расследование и 18 января 1987 года составлено обвинительное заключение.

В работе директора ЧАЭС Виктора Петровича Брюханова, который за месяц до аварии был делегатом очередного съезда КПСС и готовился к вручению ордена, обнаружились «крупные ошибки и недостатки в работе». Его вызвали в Москву, сняли с должности и исключили из партии. Когда о случившемся узнала его старая мать, у нее остановилось сердце. 13 августа В. П. Брюханова взяли под стражу.

Были арестованы и другие сотрудники станции: главный инженер Н. М. Фомин, заместитель главного инженера А. С. Дятлов, начальник реакторного цеха А. П. Коваленко, начальник смены Б. В. Рогожкин, а также Государственный инспектор Госатомтехнадзора СССР Ю. А. Лаушкин.



Рис. 57. Брюханов, Дятлов и Фомин на суде в июле 1987

Начальника смены блока Александра Акимова, оператора реактора Леонида Топтунова и начальника смены реакторного цеха Валерия Перевозченко от ареста, суда и позора «спасла» смерть: они умерли в мае–июне 1986-го.

Местом суда выбрали Чернобыль. Процесс объявили открытым, но въезд в город, население которого было эвакуировано еще в мае 1986, осуществлялся только по пропускам [10]. Суд проходил в Доме культуры Чернобыля с 7 по 29 июля 1987 года (планировалось провести его с 24 марта 1987-го, но этому воспрепятствовала попытка самоубийства, предпринятая Фоминым).

Судебная коллегия по уголовным делам Верховного Суда СССР под председательством члена Верховного Суда СССР Р.К. Бризе рассмотрела дело по обвинению шестерых бывших сотрудников Чернобыльской атомной электростанции: В. П. Брюханова, Н. М. Фомина, А. С. Дятлова, А. П. Коваленко, Б. В. Рогожкина и Государственного инспектора Ю. А. Лаушкина (рис. 57).

Государственное обвинение по делу поддерживал старший помощник Генерального прокурора СССР Ю. Н. Шадрин. В ходе заседаний выступило 40 свидетелей, 9 потерпевших и 2 пострадавших. Журналисты были допущены только на первое и послед-

нее заседания, то есть они услышали только обвинительное заключение и приговор.

Несмотря на то, что в докладе Правительственной комиссии была выявлена роль конструктивных недостатков в возникновении и развитии аварии, все внимание следователей, прокуратуры и суда было сконцентрировано на ошибках персонала станции. Было полностью проигнорировано, что персонал, пусть и совершая нарушения, не имел информации о негативных особенностях реактора и возможных последствиях своих действий [10].

В канун 20-летия Чернобыля общенациональная российская газета «Единая Россия» опубликовала статью В. И. Комарова «Свидетель обвинения» [59]. Владимир Иванович Комаров, академик Российской академии естественных наук, кандидат технических наук, до чернобыльской аварии работал заместителем директора по науке на Смоленской АЭС, возглавлял экспертную комиссию при Генпрокуратуре СССР, определявшую причины и виновников катастрофы. В Чернобыле два с половиной года был главным инженером «Комбината» – организации, созданной для ликвидации последствий аварии.

По свидетельству В. И. Комарова, *«обвинение было составлено заранее, и эксперты должны были лишь подобрать компрометирующие факты – якобы Чернобыльская АЭС самая худшая в атомной энергетике, на ней постоянно происходили мелкие аварии, которые и привели к крупной катастрофе. Все это было абсолютной ложью – Чернобыльская АЭС была самой лучшей в отрасли, и все 4 блока 13 месяцев до катастрофы проработали без ремонта и остановки. Я попросил освободить меня от участия в этой подтасовке»*.

Одним из основных виновников аварии был признан бывший директор ЧАЭС В. П. Брюханов. Кроме расплывчатых «не обеспечил надежной и безопасной эксплуатации реактора», ему ставились в вину нерешительные действия по ограничению масштабов аварии, занижение данных об уровнях радиации [10].

Н. М. Фомина и его заместителя А. С. Дятлова обвинили в недостаточной организации подготовки кадров, несоблюдении персоналом электростанции технологической дисциплины, нарушении должностных инструкций.

Суд определил, что, приняв решение о проведении испытаний на 4-м энергоблоке ЧАЭС, В. Брюханов, Н. Фомин, А. Дятлов, а также бывший начальник реакторного цеха А. Коваленко не согласовали его в установленном порядке, не проанализировали всех особенностей намеченного эксперимента, не приняли необходимых дополнительных мер безопасности.

В вину бывшему начальнику смены Б. Рогожкину ставилось самоустранение от руководства испытаниями и контроля работы реакторной установки. Бывшего государственного инспектора Госатомэнергонадзора СССР Ю. Лаушкина обвинили в преступно халатном отношении к исполнению служебного долга.

Судебная коллегия приговорила В. Брюханова, Н. Фомина, А. Дятлова к максимальной мере наказания, предусмотренной указанной выше статьей уголовного кодекса, – десяти годам лишения свободы, Б. Рогожкина – пяти, А. Коваленко – трем, Ю. Лаушкина – к двум годам лишения свободы. Приговор обжалованию не подлежал. Материалы дела и сведения об аварии засекретили.

Вкратце о судьбе подсудимых.

В. П. Брюханов, находясь в заключении, изучал английский язык и вскоре читал классиков в подлиннике. Из колонии освобожден досрочно, в сентябре 1991-го, и вернулся на ЧАЭС. Его встретили тепло, назначили начальником техотдела. Позже он был приглашен на должность заместителя начальника объединения «Укринтерэнерго». Работал до 72 лет, после чего вышел на пенсию.

А. С. Дятлов после аварии с открытыми незаживающими ранами полгода пролежал в 6-й московской больнице. Потерявшему 15 килограммов веса и заново учившемуся ходить человеку требовалось дальнейшее лечение, однако в декабре его переселили в камеру. О дальнейшей судьбе А.С. Дятлова уже шла речь в 2.4.

Психическое состояние 50-летнего главного инженера станции Николая Фомина было подорвано еще до трагедии на ЧАЭС, когда в результате автомобильной аварии он сломал позвоночник. После длительного паралича, вопреки врачебным рекомендациям, он вышел на работу за месяц до взрыва на четвертом энергоблоке. По заключению врачей он в 1990 году был досрочно освобожден и переведен в гражданскую психиатрическую больницу. После выздоровления работал на Калининской АЭС.

Начальник смены Б. В. Рогожкин после досрочного освобождения уехал в Нижний Новгород. А. П. Коваленко умер от рака. Та же болезнь сразила и Ю. А. Лаушкина, на свободе он не прожил и года.

В 2.7 уже отмечалось, что А. Ф. Акимов, В. И. Перевозченко, Л. Ф. Топтунов в 2008 году посмертно были награждены орденом «За мужество» III степени.

На судьбе осужденных не могло не сказаться предпринятое в ходе перестройки и расширения гласности переосмысление причин аварии и действий по преодолению ее последствий.

2.15. Что усугубило последствия аварии

В июле 1990 года на последнем в истории, XXVIII съезде КПСС была дана новая политическая оценка случившемуся [60]. В специальной резолюции отмечалось следующее.

«В условиях административно-командной системы бывшим руководством страны допущены крупные просчеты в выработке научно-технической политики в области атомной энергетики и защиты населения в экстремальных условиях. Минэнерго, Минсредмаши, Минздрав, Госкомгидромет, Госатомэнергонадзор, Академия наук, Гражданская оборона СССР проявили неспособность обезопасить жизнь и здоровье населения, оказались неподготовленными к принятию необходимых первоочередных мер.

(...) Политбюро ЦК КПСС, Совет Министров СССР, ЦК компартий Украины и Белоруссии, Советы Министров УССР и БССР своевременно не оценили масштабы катастрофы, ее возможные последствия и не приняли решительных действий по разработке и реализации государственной концепции безопасного проживания населения на радиоактивно загрязненных территориях. Все это подрывает доверие людей к партии и государству, к ЦК КПСС и правительству, снижает их авторитет».

Эта резолюция отражала и растущее несогласие общественности, прежде всего депутатов, журналистов и ряда ученых, с выводами Верховного Суда СССР. Укрепилось мнение, что к уголовной ответственности были привлечены «козлы отпущения», а истинные причины чернобыльской аварии – в конструктивных недостатках реактора РБМК-1000, отсутствии у него контейнмента, неверно выбранных путях развития атомной энергетики. Особо острыми были дебаты, связанные с тем, как информировалось об аварии и ее последствиях население страны. Вот лишь несколько из ставших достоянием общественности многочисленных документов [54,57].

Распоряжение Третьего главного управления Министерства здравоохранения СССР от 27 июня 1986 г. «Об усилении режима секретности при выполнении работ по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС»

(...)

- 4. Засекретить сведения об аварии (...).*
- 8. Засекретить сведения о результатах лечения.*
- 9. Засекретить сведения о степени радиоактивного поражения персонала, участвовавшего в ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.*

*Начальник третьего главного управления МЗ СССР
Шульженко».*

Из протоколов заседания оперативной группы Политбюро

«Секретно. Протокол № 5. 4 мая 1986 г.

Сообщение т. Щепина (первый замминистра здравоохранения СССР). Принять к сведению, что по состоянию на 4 мая всего госпитализировано 1882 человека. Общее число обследованных достигло 38 тысяч человек».

«Секретно. Протокол № 12. 12 мая 1986 г.

На стационарном обследовании и лечении находятся 10 198 человек, из которых 345 человек имеют признаки лучевого заболевания».

«Секретно. Протокол № 9. 8 мая 1986 г.

Минздрав СССР утвердил новые нормы допустимых уровней облучения населения радиоактивными излучениями, превышающие прежние в 10 раз. В особых случаях возможно увеличение этих норм до уровней, превышающих прежние в 50 раз».

«Секретно. Приложение к п. 10 протокола № 32. 22 августа 1986 г.

При переработке скота из зоны, расположенной на следе выброса Чернобыльской АЭС, часть вырабатываемого мяса содержит радиоактивные вещества (РВ) в количествах, превышающих допустимые нормы. В настоящее время на холодильниках мясной промышленности ряда областей Белорусской ССР, Украинской ССР и Российской Федерации находится на хранении около 10 тысяч тонн мяса с уровнем загрязнения РВ от $1,1 \cdot 10^7$ Ки/кг до $1,0 \cdot 10^6$ Ки/кг, в августе–декабре текущего года ожидается поступление из производства еще 30 тыс. тонн такого мяса.

Для того чтобы не допустить большого суммарного накопления РВ в организме людей от употребления грязных продуктов питания, Министерство здравоохранения СССР рекомендует максимально рассредоточить загрязненное РВ мясо по стране и использовать его для выработки колбасных изделий, консервов и мясных полуфабрикатов в соотношении один к десяти с нормальным мясом... Для использования указанного мяса на пищевые цели и обеспечение выпуска продукции в соответствии с требованиями Минздрава СССР с учетом его десятикратного разбавления незагрязненным мясом необходимо организовать его переработку на мясокомбинатах большинства областей Российской Федерации».

Из записки собственного корреспондента «Известий» в Белоруссии Николая Матуковского, приложенной к одному из протоколов

«Секретно. Телетайписткам. Эту телеграмму не показывать никому, кроме главного редактора. Копию уничтожить.

Сообщаю для Вашего сведения, что радиационная обстановка в Белоруссии значительно осложнилась. Во многих районах Могилевской области обнаружено радиоактивное заражение, уровень которого значительно выше уровня тех районов, о которых мы писали. По всем медицинским канонам проживание людей в этих районах связано с огромным риском для жизни. У меня сложилось такое впечатление, что наши товарищи растерялись и не знают, что предпринять, тем более, что соответствующие московские инстанции не хотят верить в случившееся. Сообщаю Вам это по телексу, потому что все телефонные разговоры на эту тему у нас категорически запрещены.

8 июля 1986 г.»

Из ответа на депутатский запрос А.А. Ярошинской заместителя Генерального прокурора СССР В.И. Андреева

*«(...) за период с 1986 года по 1989 год в указанных зонах произведено выше допустимых уровней загрязнения 47,5 тысячи тонн мяса и 2 миллиона тонн молока. (...) Указанные обстоятельства ставили в опасные для проживания условия **около 75 миллионов человек** (...) и создавали условия для повышенной смертности, увеличения числа злокачественных новообразований, увеличения количества уродств, наследственных и соматических заболеваний, изменения трудоспособности населения».*

Из «Перечня сведений по вопросам аварии, которые не подлежат опубликованию в открытой печати...», утвержденного 29.2.1988 г. за № 514 Правительственной комиссией

«Засекретить сведения об уровнях радиационной загрязненности по отдельным населенным пунктам, превышающих допустимый уровень, и сведения о показателях ухудшения физической работоспособности, потери профессиональных навыков эксплуатационного персонала, работающего в особых условиях на ЧАЭС, или лиц, привлеченных к работам по ликвидации последствий аварии».

Все новые и новые вскрывающиеся факты повлекли создание в 1990 году Верховным Советом СССР Комиссии по рассмотрению причин аварии на ЧАЭС и оценке действий должностных лиц в послеаварийный период.

Выводы комиссии привели к тому, что на XXVIII съезде КПСС Прокуратуре СССР было поручено провести проверку обоснованности и своевременности мер по ликвидации последствий аварии. 6 августа 1990 года для этого была образована рабочая группа из прокуроров СССР, РСФСР, УССР и БССР. 25 января 1991 года было возбуждено уголовное дело по фактам засекречивания информации от населения, реализации населению «грязной» продукции и другим нарушениям.

В декабре 1991 года в связи с распадом СССР распалась и следственная группа. Дело было передано в Прокуратуру Российской Федерации, а часть томов осталась в прокуратурах Украины и Белоруссии.

В Белоруссии депутаты Верховного Совета БССР 12 созыва создали комиссию по расследованию ответственности должностных лиц в связи с чернобыльской аварией. Расследование прекратилось за недоказанностью вины.

В Украине 11 февраля 1992 года было возбуждено уголовное дело в отношении руководителей: первого секретаря ЦК Компартии Украины Владимира Щербицкого, председателя Совмина Александра Ляшко, председателя Президиума Верховного Совета Валентины Шевченко и министра здравоохранения Украины Анатолия Романенко.

Общественность страны будоражили следующие вопросы. Почему в Киеве не провели йодную профилактику? Почему Минздрав Украины обязал в больничных листах указывать фальшивые диагнозы? Почему скрывались дозы облучения детей?

Особенно волновал людей вопрос, почему не была запрещена первомайская демонстрация. Во время марша на Крещатике уровень радиации достиг своей максимальной для Киева величины – 0,13 мЗв/ч и в 1000 раз превысил норму.

Высокое украинское руководство стояло на трибуне, одетое в плащи и шляпы, а мимо с приветствиями шли колонны легко одетых людей с детьми (рис. 58). Приказ провести на улицах Киева первомайскую демонстрацию с участием детей был отдан В. В. Щербицким.

Сторонники Щербицкого утверждают, что он был заложником обстоятельств, так как руководствовался приказами из ЦК КПСС – не создавать панику. Справедливости ради следует сказать, что на демонстрацию он рискнул прийти вместе со своими внуками. В то же время, по свидетельству А. А. Ярошинской, дети других высокопоставленных чиновников спешно отправлялись в аэро-



Рис. 58. Первомайская демонстрация 1986 года в Киеве

ния легких, хотя близкие к политику люди говорили о самоубийстве. 17 февраля он должен был давать свидетельские показания в Верховном Совете СССР о событиях, связанных с чернобыльской аварией [61].

порт Борисполь улететь подальше от беды. В железнодорожных кассах Киева распродали все билеты на ближайший месяц. Билетов не было никуда. Взвинченные и напуганные неизвестностью простые люди штурмом брали вокзалы и поезда.

16 февраля 1990 года, через пять месяцев после отставки и за день до своего 72-летия, Владимир Щербицкий умер. Официальная версия случившегося – от воспаления

Из материалов уголовного дела № 49-441

«Таким образом, вина Щербицкого, Шевченко, Ляшко, Романенко в злоупотреблении властью и служебным положением, что повлекло тяжкие последствия, доказана.

Их ссылки на то, что они не могли исполнять свои служебные обязанности по обеспечению гарантированных Конституцией СССР прав граждан на охрану здоровья в связи с тем, что Чернобыльская АЭС была экстерриториальной, что созданием правительственной Комиссии СССР и Опергруппы Политбюро ЦК КПСС они были фактически отстранены от принятия решений и контроля над ситуацией, что они выполняли положение статьи Конституции СССР о руководящей роли партии и требования законодательства о соблюдении секретности, что они подчинялись указаниям союзных государственно-партийных структур и ведомств, не могут быть приняты во внимание, поскольку во время глобальной Чернобыльской катастрофы под угрозой были жизнь и здоровье народа, сохранение его генофонда, а поэтому в условиях крайней необходимости они должны были сделать все от них зависящее и возможное для сохранения людей, а не беспокоиться

о собственном благополучии и служебной карьере, но самостоятельно они даже не пытались оповестить население об опасности и защитить людей (...)».

Учитывая, что в соответствии с законодательством Украины срок давности по привлечению Шевченко, Ляшко и Романенко к уголовной ответственности закончился, а Щербицкий умер, 24 апреля 1993 года было вынесено постановление: уголовное дело о действиях должностных лиц Украины во время аварии на ЧАЭС и ликвидации ее последствий закрыть.

2.16. Эволюция представлений о причинах чернобыльской аварии

Существует множество версий по поводу причин чернобыльской аварии. Они представлены как в выводах официальных комиссий, так и огромном числе публикаций отдельных авторов. Будем придерживаться официальных версий. Их тоже много: они появлялись по мере обнародования засекреченных ранее сведений. Возникающая ясность по поводу конкретных событий и фактов отмечает многие из неофициальных версий, на которые так падки СМИ.

Во всех официальных версиях фигурирует три комплекса причин. **Во-первых**, это ошибочные действия персонала станции. **Во-вторых** – несоответствующая требованиям безопасности конструкция реактора. **Третий** комплекс причин непросто сформулировать; с легкой руки западных специалистов он получил название «отсутствия культуры безопасности». Акценты в этой триаде причин испытывали заметную эволюцию с течением времени.

Первая версия причин аварии была представлена Правительственной комиссией в скрытых от общественности **Акте расследования причин аварии и Дополнении к нему** (см. 2.8). В выводах Правительственной комиссии отмечалось, что на возникновении и развитии аварии сказались не только действия операторов, но и недостатки конструкции реактора. Однако официальной становится версия виновности в аварии исключительно персонала станции, все противоречившие ей исследования засекречиваются даже для специалистов.

В ходе открытого судебного процесса по делу об аварии главными причинами аварии назывались ошибки операторов, в том числе:

– эксплуатация реактора с оперативным запасом реактивности 15 стержней и менее в период с 07 ч 00 мин до 13 ч 30 мин

25.04.86 года и, ориентировочно, с 01 ч 00 мин 26.04.86 года до момента аварии, чем нарушались требования Регламента;

- отключение системы аварийного охлаждения реактора (САОР);
- загробление уставки (порога) защиты реактора по снижению уровня в барабан-сепараторах со значения - 600 до - 1 100 мм;
- увеличение расходов по отдельным главным циркуляционным насосам до 7500 м³/ч;
- провал мощности ниже предусмотренного программой испытаний значения и предпринятая попытка выхода из него;
- подключение к реактору всех главных циркуляционных насосов;
- блокировка защиты реактора по сигналу остановки двух турбогенераторов.

Некоторые комментарии по поводу того, являлись ли эти действия действительно нарушениями, были представлены при изложении хронологии аварии в 2.5 и в 2.6.

Специалистов мирового сообщества такая односторонняя трактовка причин аварии не смогла бы ввести в заблуждение. На основе выводов Правительственной комиссии под руководством академика Легасова была подготовлена «Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях...». Она была представлена академиком в 5-часовом докладе на совещании экспертов МАГАТЭ, состоявшемся в Вене 25–29 августа 1986 г.

В докладе СССР для МАГАТЭ [40] констатировалось следующее.

«(...) Разработчики реакторной установки не предусмотрели создание защитных систем безопасности, способных предотвратить аварию при имевшем место наборе преднамеренных отключений технических средств защиты и нарушений регламента эксплуатации, так как считали такое сочетание событий невозможным. Таким образом, первопричиной аварии явилось крайне маловероятное сочетание нарушений порядка и режима эксплуатации, допущенных персоналом энергоблока. Катастрофические размеры авария приобрела в связи с тем, что реактор был приведен персоналом в такое состояние, в котором существенно усилилось влияние положительного коэффициента реактивности на рост мощности (...).»

Доклад Легасова произвел благоприятное впечатление на многих экспертов. Позже МАГАТЭ для исследования причин аварии на ЧАЭС создало Консультативный комитет по вопросам ядерной безопасности – INSAG (*International Nuclear Safety Advisory Group*). В докладе INSAG-1, подготовленном в 1986 году на основе

советских данных, первопричиной аварии назывались нарушения правил эксплуатации персоналом, однако указывались и недостатки конструкции реактора.

В INSAG-1 [41] отмечалось, что основным мотивом в поведении персонала было стремление быстрее закончить испытания. По мнению комиссии, нарушение программы испытаний и небрежность в управлении реактором свидетельствуют как о недостаточном понимании персоналом особенностей поведения реактора, так и о потере чувства опасности. Вместе с тем, разработчики реакторной установки не предусмотрели создание защитных систем безопасности, способных предотвратить аварию при имевших место нарушениях регламента эксплуатации.

Несмотря на официальную точку зрения, многие советские специалисты утверждали, что обвинения персонала станции в нарушениях необоснованны и незаконны, а основной причиной аварии послужили недостатки конструкции реактора. В числе таких специалистов был профессор Б. Г. Дубовский, дважды лауреат Сталинской премии. Этот заслуженный человек с 1958 по 1977 год возглавлял созданную еще И.В. Курчатовым «Лабораторию ядерной безопасности», после чего перешел на работу в Минсредмаш. Дубовский считал аварии на ЛАЭС 1975 года и ЧАЭС 1982 года репетициями аварии 1986 года. Вот некоторые из его опубликованных высказываний [38].

«Уму непостижимо, как могли руководители проектантов СУЗ, а также Госатомэнергонадзора СССР, (...) допустить такие крупные, а в некоторых случаях лишённые элементарной логики просчеты».

«Ведь по существу реакторы РБМК не имели нормальной защиты. Не имели никакой АЗ! Ни снизу активной зоны, ни сверху».

«Полное отсутствие аварийной защиты. Плюс малограмотная документация. К тому же руководили Чернобыльской неспециалисты».

Более глубокая мысль высказана в письме М. С. Горбачеву 27 ноября 1989 года:

«Продолжающееся несправедливое взваливание на чернобыльский персонал ответственности исключает дальнейшее развитие энергетики – невозможно в будущем исключить ошибки персонала. Допущенные персоналом нарушения, при минимальном соответствии защиты реактора своему назначению, свелись бы только к недельному простоя».

В 2.13 уже упоминалось, что инспектор по ядерной безопасности Госатомэнергонадзора на Курской АЭС А. А. Ядрихинский

выявил ряд грубых несоответствий реактора РБМК требованиям ядерной безопасности [29]. Вот одно из его высказываний:

«Мог ли оперативный персонал предотвратить аварию? Да, мог, если бы знал, что она возможна».

Упомянутый в 2.14 сотрудник Института атомной энергии им. Курчатова В.П. Волков, убежденный в том, что взрыв реактора на ЧАЭС произошел вследствие его недостатков, а не халатности обслуживающего персонала, сразу после аварии направил собранные им документы в прокуратуру. Волков писал, что причиной аварии стали эффект вытеснителей в стержнях СУЗ, большой паровой эффект реактивности, а также большая неравномерность выделения энергии в активной зоне реактора. По мнению Волкова, разработчиками были сформированы неверные представления о надежности атомных реакторов типа РБМК, ложная уверенность в эффективности систем аварийной защиты, что, в свою очередь, привело к составлению неверного Регламента эксплуатации.

Распоряжением директора ИАЭ академика Александрова вход в институт для строптивного сотрудника был закрыт, однако В. П. Волков не успокоился и написал письмо М. С. Горбачеву...

Результатом действий ученых, несогласных с официальной версией, стало создание в феврале 1990 года **комиссии Госатом-энергонадзора** под руководством В.А. Сидоренко, которая вернулась к определению причин чернобыльской аварии. В 1991 году эта комиссия пришла к следующим выводам [36].

Из-за ошибок разработчиков реактор обладал положительными паровым и мощностным коэффициентами реактивности. Тем самым реактор представлял собой систему, неустойчивую по отношению к возмущениям по мощности и паросодержанию, которые, в свою очередь, зависели от многих параметров его состояния. При этом не была обеспечена и убедительно доказана ядерная безопасность ни для работы на номинальной мощности, ни для промежуточных мощностей.

Ошибочная конструкция стержней системы управления и защиты («концевой эффект») привели к тому, что аварийная защита не смогла справиться с аварией на ЧАЭС, как не могла справиться и с предыдущими авариями. Развитие аварии началось после нажатия кнопки ручной аварийной остановки реактора АЗ-5. Не было выявлено никаких событий или процессов, например, незаметно начавшегося разгона реактора, которые могли бы стать другим исходным событием аварии.

Персонал не знал об опасных свойствах реактора и, следовательно, не осознавал возможных последствий своих действий. Комиссия отметила, что оператор никогда не должен оказываться в ситуации, которую предварительно не проанализировали инженеры.

Минэнерго бывшего СССР длительное время эксплуатировало реакторы РБМК, не придавая должного значения неоднократным выпадениям сигналов аварийной защиты по мощности, что требовало тщательного разбора аварийных ситуаций. Составленный регламент эксплуатации реактора оказался не только неверным, но и роковым.

Программа проведения испытаний турбогенератора не вполне удовлетворяла требованиям безопасности, однако при четком соблюдении эксплуатационных требований (регламента, инструкций) давала достаточно оснований для безопасного проведения эксперимента. Комиссия установила, что в ходе его проведения не требовалось какого-либо вмешательства персонала или предохранительных устройств. Причины аварии скрыты не в программе как таковой, а в незнании разработчиками программы особенностей поведения реактора РБМК в предстоящем режиме работы.

Комиссией было отмечено, что в ходе эксплуатации реакторов РБМК часто возникали ситуации с дилеммой – соблюсти требования безопасности и остановить энергоблок или с учетом экономических факторов продолжить работу реактора, нарушая правила. Регламентом фактически навязывалось решение в пользу экономии, а функции аварийной защиты перекладывались на оператора, подразумевая его безусловную надежность как элемента системы безопасности.

Именно такая ситуация возникла в 0 ч 28 мин 26 апреля 1986 года, когда произошло непредусмотренное снижение мощности реактора до 30 *MВт*. Этот «провал» и последующий подъем мощности во многом определили трагический исход эксперимента. Однако сделать заключение о правомерности или ошибочности действий персонала в этой ситуации не представляется возможным из-за противоречивости требований регламента, а также недостаточности и несогласованности зарегистрированных данных.

Проанализировав действовавшие на момент аварии нормативные документы, комиссия не подтвердила большинство из выдвигавшихся в адрес персонала станции обвинений в их нарушении, за исключением работы с низким оперативным запасом реактивности (ОЗР). Однако и в этом, по мнению комиссии, есть вина разработчиков, поскольку в Регламенте выбор ОЗР объясняется скорее экономическими соображениями, чем соображениями безо-

пасности (см. 2.3). Комиссия пишет: *«Осознав всю опасность снижения ОЗР именно с точки зрения способности аварийной защиты к выполнению своих функций, разработчики надлежащим образом не проинформировали об этом эксплуатационный персонал, который, осознав проблему, мог бы и не принять на себя отведенную ему разработчиками функцию по защите реактора от разгона».*

На основании проведенного анализа комиссия Госпроматомнадзора сделала вывод о том, что *«авария, подобная Чернобыльской, была неизбежной».* Уместно вспомнить мысль Н. С. Рыжкова, высказанную на заседании Политбюро ЦК КПСС 3 июля 1986 года: *«Мы к аварии шли...»* (см. 2.14).

В целом выводы комиссии перекликаются с рассуждениями А. С. Дятлова, который в своей книге утверждал, что оперативный персонал ЧАЭС не может быть виновен в аварии, эксплуатируя заведомо взрывоопасный реактор РБМК. Вина за чернобыльскую катастрофу, по мнению Дятлова, полностью лежит на научном руководителе проекта и конструкторе реактора РБМК-1000, которые знали о недостатках своего детища, но ничего не сделали для их устранения и, более того, скрывали эту информацию от эксплуатационного персонала АЭС.

В 1993 году появился новый доклад МАГАТЭ – **INSAG-7** [42]. В этом документе многие выводы, сделанные в INSAG-1 (1986 г.), признаны неверными и пересмотрены. Доклад был основан на новых данных, полученных в результате моделирования аварии, а также на докладе Госпроматомнадзора СССР и докладе «рабочей группы экспертов СССР», которые приведены в качестве приложений.

Один из главных выводов доклада звучит так: *«установка фактически не соответствовала действующим нормам безопасности во время проектирования и даже имела небезопасные конструктивные особенности (...)».*

В целом INSAG-7 очень осторожно формулирует свои выводы о непосредственных причинах аварии. Так, в частности, говорится: *«Достоверно неизвестно, с чего начался скачок мощности, приведший к разрушению реактора Чернобыльской АЭС. Определенная положительная реактивность, по-видимому, была внесена в результате роста паросодержания при падении расхода теплоносителя. Внесение дополнительной положительной реактивности в результате погружения полностью выведенных стержней СУЗ в ходе испытаний явилось, вероятно, решающим приведшим к аварии фактором».*

В докладе отмечено, что большинство ранее звучавших обвинений персонала в нарушении требований регламента, в том числе в от-

ключении трех компонент защиты (САОР, блокировка сигнала аварийной остановки по уровню воды и давлению пара в барабан сепараторах, а также по остановке двух турбогенераторов), не соответствуют действительности. Однако персонал ЧАЭС все-таки проявил *«довольно легкомысленное отношение к блокировке защиты реактора (...)»*. Такое же легкомысленное отношение наблюдается и в пунктах регламента по эксплуатации, фактически допускающих такие действия.

Ошибкой персонала признается длительная эксплуатация реактора при слишком низком ОЗР. INSAG отмечает, что это нарушение оказалось важным по причинам, отличным от тех, которые назывались ранее. Такое состояние реактора *«привело к повышенным значениям парового коэффициента, а также к такому положению стержней СУЗ, в котором они не только потеряли эффективность, но и стали оказывать разрушительное воздействие»*. При этом оговаривается, что операторы не были проинформированы об опасности низкого ОЗР, а конструкция реактора не предусматривала оперативного контроля этого параметра и не имела системы защиты по недопущению работы с малым ОЗР.

Другой ошибкой персонала называется отступление от рабочей программы испытаний. Указывается, что намеченная программа *«(...) должна строго выполняться. Если в процессе испытаний оказалось, что исходная программа неудовлетворительна или не может осуществляться, как запланировано, то испытания должны быть прекращены (...)»*.

По мнению авторов, наиболее существенное отклонение от программы испытаний – работа на малой мощности реактора. При этом могла сказаться еще одна особенность реактора РБМК-1000. Его система управления и защиты при мощности выше 10% от номинальной получает сигналы от датчиков, которые находятся в активной зоне. При малом же уровне мощности управление осуществляется от датчиков, расположенных вне активной зоны. Естественно, показания этих датчиков неадекватны истинному распределению нейтронного потока. Поэтому в таком режиме работы *«(...) оператор должен был полагаться главным образом на опыт и интуицию, а не на показания приборов системы регулирования. В таких условиях от оператора могло потребоваться выполнение до 1000 управляющих действий в час»*.

А. Дятлов в своей книге [38] по поводу обвинений в работе с малым ОЗР пишет: *«Более тысячи манипуляций в час оператор совершает при управлении реактором и более 4 000 параметров имеет на контроле. И его обвинять в просмотре параметра, не имеющего ни*

прибора измерительного, ни сигнализации?». Далее, авторы INSAG-7 пишут: «У операторов по существу не было опыта регулирования мощности в таких условиях», что представляется небесспорным.

По мнению авторов, поведение персонала отражает общий **недостаточный уровень культуры безопасности** в атомной энергетике СССР. В докладе указывается, что «авария явилась следствием низкой культуры безопасности не только на ЧАЭС, но и во всех советских проектных, эксплуатирующих и регулирующих организациях атомной энергетике, существовавших в то время. Культура безопасности, детально рассмотренная в INSAG-4, требует полной приверженности делу обеспечения безопасности, которая на атомных электростанциях формируется главным образом отношением к этому руководителей организаций, участвующих в их проектировании и эксплуатации. В этой связи оценка чернобыльской аварии показывает, что недостаточная культура безопасности была присуща не только этапу эксплуатации, но также, и в не меньшей степени, деятельности на других этапах жизненного цикла атомных электростанций (включая проектирование, инженерно-технические разработки, сооружение, изготовление и регулирование)».

В этой связи экспертов особенно удивило то обстоятельство, что о серьезных недостатках реактора было известно заранее, но фактически ничего не было предпринято для их устранения. «Конструктивные дефекты и нестабильность физических и теплогидравлических характеристик реактора РБМК-1000 были теоретически и экспериментально определены до аварии 26 апреля 1986 г., однако не было предпринято адекватных мер, во-первых, для устранения этих недостатков, во-вторых, для предупреждения персонала о последствиях этих опасных характеристик и соответствующей подготовки его к работе на реакторной установке, характеристики которой не отвечали требованиям НТД по безопасности».

Отмеченная выше осторожность авторов доклада проистекает, по всей вероятности, из подозрений, что ставшие достоянием гласности новые факты могут быть не на 100% адекватными, и нельзя исключить, что будут появляться новые, неизвестные ранее факты. Видимо, так нужно понимать абзац доклада: «Следует отметить, что новая информация надежно обоснована в той степени, насколько это возможно в настоящее время. Однако нельзя исключить изменения этой информации в будущем, равно как и восприятия ее значимости».

То, что могут появиться новые факты, проливающие свет на обстоятельства и причины чернобыльской аварии, подтверждается сле-

ланным в 2003 году украинской газете «Зеркало недели» признанием бывшего следователя Генеральной Прокуратуры С. Янковского [10]:

«Мне довелось быть участником этого расследования с первых часов после аварии до направления уголовного дела в суд. Это уникальное по своему документальному содержанию уголовное дело, состоящее из 57 томов следственных документов и многих приложений, доселе лежит мертвым грузом в архиве Верховного Суда России. Многие из приложений до сих пор сильно «фонят», но зато заключают в себе убийственную по доказательственной силе информацию. (...) Дело-то было совершенно секретным, а первичные документы мы изъяли на станции незамедлительно, и к вечеру 28 апреля 1986 года они были уже в Москве. То, что потом изучали многочисленные специалисты, было в основном какими-то урезанными копиями или вообще фальсификатом».

С течением времени открываются новые обстоятельства аварии. В (2.14) уже цитировалось свидетельство академика РАЕН Владимира Ивановича Комарова, возглавлявшего экспертную комиссию при Генпрокуратуре СССР. Вот что пишет В. И. Комаров в газете «Единая Россия» [59] по поводу обстоятельств принятия рокового решения о подъеме мощности 4-го блока после его попадания в «йодную яму»:

«Вскоре я возглавил группу экспертов, которая готовила обвинение руководства Чернобыльской АЭС в преступной деятельности. Я прослушал записи всех телефонных переговоров и просмотрел все телексы, полученные на Щите управления 4-м блоком Чернобыльской АЭС. Однако подобной тщательности от нас не требовалось. (...)

В начале 80-х годов при ЦК КПСС был создан сектор по надзору за АЭС, который занимался не безопасностью, а исключительно управлением АЭС. В сектор входили В. Марьин и Г. Копчинский, подчинявшиеся секретарю ЦК КПСС В. Долгих. (...)

Случилось так, что перед проведением 6-й проверки аварийно «отвалился» блок на Трипольской ГРЭС. Чтобы восполнить дефицит энергии, «Киевэнерго» прислал телекс с требованием вывести 4-й блок Чернобыльской АЭС на 50 % мощность. Этого в тот момент категорически нельзя было делать! Но телекс от «Киевэнерго» был продублирован телефонным звонком из ЦК КПСС. Прямо на Щит управления 4-м блоком Чернобыльской АЭС позвонил лично Копчинский. И его указание было выполнено.

Здесь надо учесть еще вот что. Вклад атомных электростанций в общий баланс выработки электроэнергии страны составляет примерно 16%. И для Минэнерго атомная энергетика всегда была чем-то вроде неродного дитяти. Чиновники получали

премии за экономию углеводородного топлива и были не заинтересованы в снижении мощности тепловых электростанций, поскольку тогда терялся КПД. Поэтому в ночные часы, когда потребление электроэнергии снижалось, по их приказу уменьшали мощности на АЭС, что в принципе недопустимо. Атомные блоки должны работать только в базовом режиме (колебания мощностей приводят к образованию йодного отравления реакторов). (...)

Но А. Дятлову на Щит управления опять позвонил Г. Копчинский, работник Всесильного ЦК КПСС, и приказал выводить 4-й реактор на мощность, с тем чтобы закончить проверку защиты. – Дятлов, находясь за Щитом управления, ясно видел, что реактор находится в йодной яме, что реактор неуправляем. Но Дятлов, видимо, все же надеялся, что «проскочит», и поэтому выполнил приказ Копчинского. А тот сказал буквально следующее: «Проводи проверку! Или ты уйдешь на пенсию, или будешь главным инженером новой Чернобыльской АЭС-2». (...)

Я лично слышал эту запись, когда возглавлял экспертную комиссию по подготовке обвинительного заключения. Все разговоры и звонки на Щите управления АЭС записывались. (...)

Копчинский – видимо, в целях экономии – не хотел, чтобы эта последняя проверка проводилась уже после замены топлива. Но главное, мне кажется, в другом. Копчинский, до отъезда в Москву работавший заместителем главного инженера по науке именно на Чернобыльской АЭС, телефонными звонками демонстрировал свои аппаратные возможности. (...)

Дятлов, видимо, все же надеялся, что в крайнем случае он нажмет на красную кнопку Аварийной Защиты и реактор в самый последний момент заглушится».

Чернобыльская авария в полной мере отразила в себе особенности существовавшей системы: как ее мощь, проявившуюся на ранних этапах ликвидации последствий, так и недостатки, совокупность которых привела к аварии. Многие специалисты считают, что авария на ЧАЭС была одним из решающих звеньев в цепи событий, приведших к краху СССР.

2.17. Экологические последствия аварии

Значительные выбросы радионуклидов из разрушенного 4-го энергоблока ЧАЭС продолжались 10 дней, до 6 мая 1986 г. Кроме топлива, активная зона на момент аварии содержала радиоактивные

продукты деления и трансураниевые элементы – всего около 200 радиоизотопов с разными периодами полураспада: от нескольких часов и менее до сотен тысяч лет. [23,64].

Уточненный состав основных радионуклидов в выбросе по данным Доклада НКДАР (Научный комитет ООН по действию атомной радиации) Генеральной Ассамблее ООН 2008 года [65] представлен в табл. 4.

Таблица 4. Основные радионуклиды в аварийном выбросе

Радионуклид	Период полураспада	Активность в выбросе, ПБк
<i>Инертные газы</i>		
криптон-85	10,72 лет	33
ксенон-133	5,25 сут.	6 500
<i>Летучие элементы</i>		
теллур-129	33,6 сут.	240
теллур-132	3,26 сут.	~1 150
йод-131	8,04 сут.	~1 760
йод-133	20,8 ч	910
цезий-134	2,06 года	47
цезий-136	13,1 сут.	36
цезий-137	30,0 лет	~85
<i>Элементы с промежуточной летучестью</i>		
стронций-89	50,5 сут.	~115
стронций-90	29,12 лет	~10
рубидий-103	39,3 сут.	>168
рубидий-106	368 сут.	>73
барий-140	12,7 сут.	240
<i>Тугоплавкие элементы (включая частицы топлива)</i>		
цирконий-95	64,0 сут.	84
молибден-99	2,75 сут.	>72
церий-141	32,5 сут.	84
церий-144	284 сут.	~50
нептуний-239	2,35 сут.	400
плутоний-238	87,74 лет	0,015
плутоний-239	24 065 лет	0,013
плутоний-249	6537 лет	0,018
плутоний-241	14,4 лет	~2,6
плутоний-242	376 000 лет	0,00004
кюрий-242	163 сут.	~0,4

Суммарная активность этих радионуклидов превысила $10 \cdot 10^{19}$ Бк, или 10 000 *нетабеккерелей* ($1 \text{ ПБк} = 10^{15} \text{ Бк}$). На инертные газы пришлось около половины этой величины, однако они рассеялись в атмосфере и не причинили ощутимого вреда. Согласно табл. 4 в плане облучения населения наиболее значимыми радионуклидами оказались йод-131, цезий-137, стронций-90 и изотопы плутония (Pu-238, Pu-239, Pu-240 и Pu-241).

Радиологическая значимость выброса *короткоживущего* радионуклида йод-131 обусловлена его высокой активностью и тем, что он избирательно накапливается в щитовидной железе, обладающей небольшими размерами. В результате эффекты его воздействия оказались значительно выше, чем для других короткоживущих радионуклидов, более или менее равномерно облучающих организм.

Из *долгоживущих* радионуклидов наибольшей значимостью обладают цезий-137 и стронций-90, негативное воздействие которых на население продолжается по сей день. В первые годы после аварии значимым было также облучение цезием-134, который к настоящему времени практически распался. Особо следует отметить трансурановые элементы (Pu-238, Pu-239, Pu-240 и Pu-241). Будучи альфа-излучающими радионуклидами, они наиболее токсичны при попадании в организм.

Выброшенные радионуклиды находились в трех основных формах: газы, конденсированные частицы, топливные частицы.

После охлаждения первоначального облака не только благородные газы, но и наиболее летучие радионуклиды оставались в газовой фазе. Менее летучие конденсировались, образуя частицы с размерами до 10 *микрон*. Топливные частицы представляли собой мелкие фрагменты таблеток ядерного топлива с накопившимися продуктами деления и трансурановыми элементами; их размеры превышают 10 *микрон*.

Крупные топливные частицы были перенесены на расстояние в несколько километров от реактора, мелкие – в десятки километров. По последним данным доля ядерного топлива, выпавшая за пределами площадки ЧАЭС, составляет около 1,5% всего объема выброса. Выпадения же конденсированных частиц происходили и в тысячах километров от Чернобыля. Это означает, что чернобыльская авария носила глобальный характер.

Из наиболее значимых радионуклидов дальше всех от ЧАЭС распространился йод-131, который является источником бета- и гамма-излучения. Значительное его количество выпало даже на территории Северной Америки и Азии, в акваториях Тихого и Ат-

лантического океана. Период полураспада ^{131}I составляет 8,04 суток, поэтому за 10 периодов полураспада (примерно за 2,5 месяца) количество этого радионуклида снизилось в $2^{10} \approx 1000$ раз.

На больших расстояниях от Чернобыля произошли выпадения еще одного значимого радионуклида – цезия-137. Он также является источником бета- и гамма-излучения, но имеет период полураспада около 30 лет. Распространение этого радионуклида наиболее хорошо изучено.

В конце апреля 1986 года практически во всей Европе господствовал антициклон. Распространение выброса шло в основном на высотах 700–1500 м, где воздушные потоки двигались к северо-западу со скоростью 5–10 м/с. В последующем присутствие радионуклидов обнаружилось на высотах до 7000 м. 27–29 апреля радиоактивный выброс достиг Польши и скандинавских стран (рис. 59).

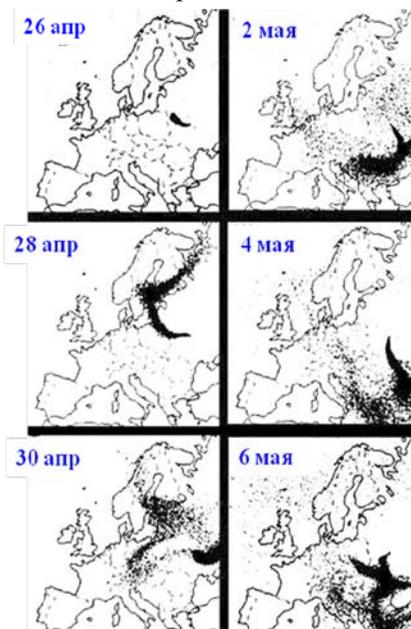


Рис. 59. Упрощенная схема распространения цезия-137

Это привело к сильной неоднородности (мозаичности, пятнистости) выпадений радионуклидов. Карты радиоактивного загрязнения были получены специалистами Госкомгидромета, Минобороны, Минздрава, Академий наук СССР, УССР и БССР к июлю–августу 1986 года. Долгое время эти карты использовались только правитель-

В это время на западе от Чернобыля находилась область низкого давления, которая медленно перемещалась на юго-восток. 27 апреля небольшой приповерхностный циклон находился к югу от Гомеля. 29 апреля 1986 года ветры дули на юг, и радиоактивное облако двинулось на Киев, при этом мощность выбросов из реактора снизилась по сравнению с 26 апреля примерно в пять раз. После 2 мая, когда мощность выбросов из реактора снова возросла, направление ветра изменилось на юго-западное, а затем на северо-западное и северное.

На участках местности, где шли дожди, интенсивность осадения радионуклидов оказалась значительно выше, чем при обычном сухом (гравитационном) выпадении.

ственными органами для принятия решений. Рассекречены они были лишь в мае 1989 года. В последующие годы периодически происходит уточнение карт. На рис. 60 представлена обзорная карта из «Атласа загрязнения Европы цезием-137 после чернобыльской аварии» [66].

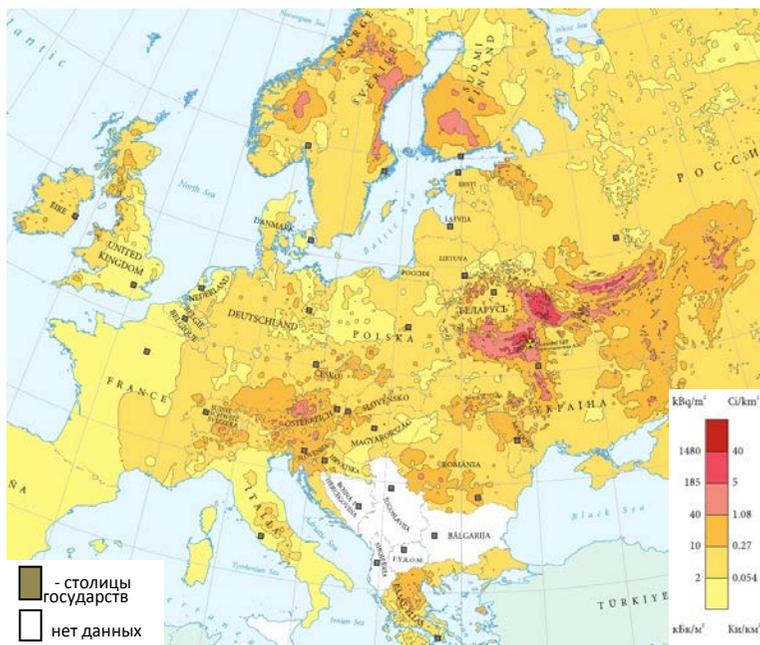


Рис. 60. Загрязнение Европы цезием-137

Законодательство многих стран в качестве пороговой величины плотности **загрязнения цезием-137**, начиная с которой территория относится к *зоне радиоактивного загрязнения*, устанавливает значение 37 kBк/м^2 (1 Ки/км^2). При таком загрязнении доза облучения человека в течение первого года после аварии на ЧАЭС составляла около 1 мЗв , а превышение данного уровня годовой дозы принято считать небезопасным для населения. Значение плотности загрязнения 37 kBк/км^2 примерно в десять раз выше уровня загрязнения цезием в результате глобального выпадения радиоактивных осадков, происходившего до чернобыльской аварии.

Площади загрязнения стран Европы с превышением указанного порогового уровня представлены в таблице 5 (Доклад экспертной группы «Экология» Чернобыльского форума [67]). Из таб-

лицы видно, что более других стран пострадали Россия, Беларусь и Украина (см. также рис. 61).

Таблица 5. Наиболее загрязненные цезием страны Европы

Страна	Площадь, км ²
Россия	57 900
Беларусь	46 500
Украина	41 900
Швеция	12 000
Финляндия	11 500
Австрия	8 600
Норвегия	5 200
Болгария	4 800
Швейцария	1 300
Греция	1 200
Словения	300
Италия	300
Молдова	60

Из 64 ТБк (1 *терабеккерель* = 10^{12} Бк) суммарной активности цезия-137, выпавшего в Европе, на Россию пришлось 30%, Беларусь – 23%, Украину – 18%.

Доли загрязненных территорий в общей площади этих стран составили для Беларуси около 23%, Украины – 7%, России – 2% (от площади ее европейской части). Сказанное позволяет говорить о наиболее высокой тяжести последствий чернобыльской аварии для Республики Беларусь.

Для более точной картины радиоактивных выпадений выделяют несколько диапазонов с различными значениями плотности загрязнения. Исторически сложились 4 таких диапазона: 1–5, 5–15, 15–40 и свыше 40 $Ku/км^2$. Выраженные в современных единицах, они имеют менее запоминающийся вид: 37–185, 185–555, 555–

1480 и свыше 1480 $кБк/м^2$.

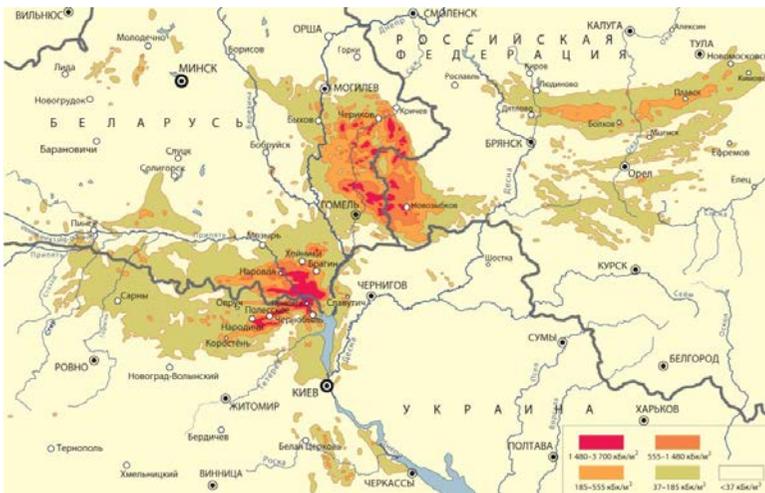


Рис. 61. Наиболее загрязненные цезием территории

В табл. 6 представлены площади территорий наиболее пострадавших стран для различных диапазонов плотности загрязнения цезием.

Таблица 6. Площади территорий с различными диапазонами плотности загрязнения, км²

Страна	37-185 кБк/м ² (1-5 Ки/км ²)	185-555 кБк/м ² (5-15 Ки/км ²)	555-1480 кБк/м ² (15-40 Ки/км ²)	> 1480 кБк/м ² (> 40 Ки/км ²)
Россия	49 800	5 700	2 100	300
Беларусь	29 900	10 200	4 200	2 200
Украина	37 200	3 200	900	600

Из представленных данных видно, что территории с наиболее высокими значениями плотности загрязнения сосредоточены преимущественно в Беларуси.

Второй по значимости среди долгоживущих радионуклидов — **стронций-90**, являющийся источником бета-излучения. Этот радионуклид обладал меньшей летучестью, да и выброшено из реактора его было меньше, чем цезия. Фрагмент карты загрязнения стронцием из «Атласа современных и прогнозных аспектов последствий аварии на ЧАЭС на пострадавших территориях России и Беларуси» [68] по состоянию на 2006 год представлен на рис. 62.

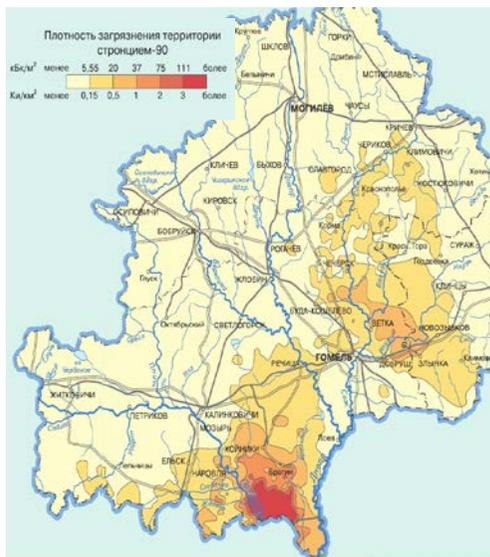


Рис. 62. Карта районов Беларуси и России, наиболее загрязненных стронцием-90

По данным украинских ученых, основные выпадения этого радионуклида на территории Украины сосредоточены в 30-км зоне и вблизи нее. Менее сильные выпадения стронция были обнаружены и в некоторых других, более отдаленных районах России и Украины.

Для стронция критерием отнесения территории к зоне радиоактивного загрязнения служит превышение плотности загрязнения величины $5,55 \text{ кБк/м}^2$.

В случае альфа-излучающих **трансурановых радионуклидов** таким критерием служит превышение плотности загрязнения величины $3,7 \text{ кБк/м}^2$. Почти все такие территории находятся в 30-км зоне вокруг ЧАЭС (рис. 63). Периоды полураспада радионуклидов плутония Pu-238, Pu-239, Pu-240 составляют 89, 24360, 6540 лет.

Плутоний-241 испытывает бета-распад. С периодом полураспада 14 лет он превращается в америций-241, который альфа-активен и имеет период полураспада 460 лет. В результате на загрязненных территориях происходит накопление ^{241}Am . В настоящее время его вклад в общую альфа-активность составляет 50%, к 2060 году он вырастет до 67%. За счет америция в 2086 году альфа-активность почвы на загрязненных трансурановыми элементами территориях Беларуси будет в 2,4 раза выше, чем в начальный период после аварии (*проблема америция*).

Радиоактивный выброс в первую очередь привел к загрязнению **воздушной среды**. В первые дни после аварии концентрация радионуклидов в воздухе на территориях вблизи ЧАЭС превышала нормальные уровни в сотни тысяч раз. Даже в Березинском заповеднике, расположенном в 400 км севернее Чернобыля, активность йода-131 достигала 200 Бк/м^3 , в десятки раз превышая предельно допустимое значение. Таким образом,

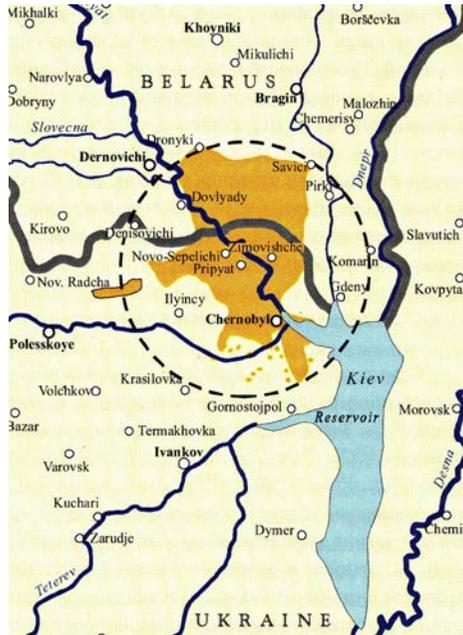


Рис 63. Территории с плотностью загрязнения трансурановыми радионуклидами свыше $3,7 \text{ кБк/м}^2$

внешнее облучение населения сопровождалось *внутренним* в результате попадания радионуклидов в легкие.

По мере выпадения радионуклидов воздушная среда быстро очищалась. В настоящее время загрязнение воздуха может представлять определенную опасность вблизи зон отселения при проведении сельскохозяйственных работ, когда техника поднимает клубы пыли, содержащей радионуклиды, с поверхности земли. К повышению загрязненности воздуха приводят пылевые бури, лесные и торфяные пожары.

В сельской местности радионуклиды выпадали на листья растений и траву, при этом загрязнению неминуемо подвергались травоядные животные. В результате дождей, обработки земли радионуклиды попали в почву и начали поступать в растения через корневую систему. Поверхностное загрязнение растений и **загрязнение почв** привели к серьезным проблемам в сельском хозяйстве, а также к множественности путей облучения населения.

Особо тяжелые последствия вызвало попадание йода-131 в молоко. Это привело к значительным дозам облучения щитовидной железой населения Беларуси, Украины, России, особенно у детей и подростков. Повышенное содержание йода-131 в молоке наблюдалось и в других странах Европы [69].

Выпадения цезия-137 также привели к серьезным последствиям на значительных территориях. Проблемы возникли даже в овцеводстве Великобритании. Повышенное содержание цезия-137 в лишайнике и мясе оленей отмечалось в арктических областях России, Норвегии, Финляндии и Швеции [67].

В наши дни уровень загрязнения почв в пострадавших районах значительно снизился, однако для некоторых регионов количество цезия в молоке все еще может превышать допустимые значения, особенно в частном секторе производства. Это относится к Гомельской и Могилевской областям Беларуси, Брянской области России, Житомирской и Ровненской областям Украины.

Значительному загрязнению подверглись **водные системы**. Если в начальный период основную роль играло прямое выпадение радионуклидов в воду, то в последующем – вторичное загрязнение, вызванное смывом радионуклидов с территорий водосбора. В наши дни поверхностные воды рек практически не загрязнены радионуклидами. Замкнутые же водные системы (озера, пруды, водохранилища) аккумулируют радионуклиды, смываемые с территорий водосбора. Как следствие, значительное содержание цезия-137 в рыбе

характерно не только для озер наиболее пострадавших районов, но и некоторых озер Скандинавии и Германии [67]. И в реках, и в замкнутых водоемах радионуклиды в основном содержатся в донных отложениях. Практически не пострадали подземные водные системы: содержание в них радионуклидов остается в пределах установленных норм.

Наиболее высокие уровни загрязнения цезием-137 регистрируются в **лесных системах**. Это относится и к растительности, и к обитающим в лесах животным. Сильнее всего загрязнены грибы, ягоды и дичь. Их высокий уровень загрязнения лишь незначительно снижается с течением времени. В результате имеет место рост вклада в облучение значительных групп населения от лесной среды и лесной продукции.

В городах основная часть радионуклидов накапливалась на горизонтальных поверхностях: площадях, лужайках, дорогах, крышах. Самые высокие концентрации радионуклидов обнаруживались вблизи домов в местах, куда стекает вода с крыш, а также в вентиляционных и канализационных системах. Под воздействием ветра, дождей, а также в результате дезактивационных работ, уборки улиц и зданий загрязнение значительно снизилось, и в настоящее время уровни радиации в большинстве мест вернулись к фоновым значениям.

18 июля 1988 года в белорусском секторе зоны отчуждения на территории Брагинского, Наровлянского и Хойникского районов Гомельской области был образован **Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (ПГРЭЗ)**. Его территория, составляющая 2,16 тыс. км², охватывает 96 покинутых населенных пунктов, где до аварии проживало более 22 тысяч жителей. Здесь сосредоточено 30% выпавшего на Беларусь цезия-137, 73% стронция-90, 97% трансурановых радионуклидов. В заповеднике действует особый правовой режим, въезд на его территорию населению запрещен [70].

Сотрудники заповедника занимаются как практическими вопросами, например, защиты от пожаров, так и разнообразными научными исследованиями. В их числе изучение воздействия радиации на живую природу, особенностей развития экосистем в условиях прекращения антропогенного воздействия. Наблюдения показывают, что интенсивность мутаций у растений и животных если и выросла, то незначительно. В целом природа успешно справляется с последствиями радиации. Растут популяции животных, увеличивается многообразие видов растительности.

2.18. Дозы облучения и здоровье

Вопросы последствий чернобыльской аварии для здоровья людей относятся к наиболее обсуждаемым. Они неизменно вызывают споры, особенно среди непрофессионалов. Отчасти это объясняется тем, что раздел медицины, который изучает такие последствия (*радиационная медицина*) возник относительно недавно, его история насчитывает лишь несколько десятков лет.

Следует также иметь в виду, что крупная радиационная авария может повлечь за собой два принципиально различных вида медицинских последствий. **Радиологические** последствия – непосредственное проявление воздействия радиации на организм людей. Однако в результате аварии могут возникать и **общие** (соматические) расстройства здоровья населения. Они вызываются действием сопровождающих аварию причин, не связанных с радиацией: стресса, других социально-психологических и экономических факторов. На сегодняшний день медицинской наукой лучше изучены чисто радиологические последствия.

Пониманию этих последствий способствовало развитие **дозиметрии** – области знаний, которая занимается количественным описанием воздействия радиации на человека. Дозиметрия лежит на стыке физике, биологии и медицины. Этой наукой установлено, что риск заболеть или умереть в результате облучения зависит прежде всего от **поглощенной дозы** – энергии излучения, поглощенной в единице массы тела. Единицей поглощенной дозы служит *1 грэй (Гр)*. Это доза такого облучения, при котором в *1 кг* массы тела поглощается энергия в *1 джоуль (Дж)*.

Превышение поглощенной дозы порогового значения, составляющего около *1 Гр*, ведет к гибели в организме значительного числа клеток. Такие непосредственные эффекты облучения называют **детерминированными**, они неизбежно влекут острую лучевую болезнь (ОЛБ), причем доза, превышающая *10 Гр*, является смертельной. Некоторые другие детерминированные эффекты, например, катаракта, наблюдаются при меньших дозах, начиная с *0,25 Гр*.

При еще меньших значениях поглощенной дозы основную роль играет не гибель, а **мутация** клеток, что влечет за собой отдаленные эффекты. Мутация обычных, соматических (греч. *soma* – тело) клеток может стать причиной рака, в том числе лейкоза. Мутация половых клеток проявляется в **генетических**, то есть передающихся по наследству, последствиях. Все такие эффекты назы-

ваются **стохастическими** (вероятностными), поскольку можно предсказать только вероятность заболевания или смерти.

Делать достаточно точные прогнозы стохастических эффектов можно лишь в случаях, когда облучению подвергается значительное число лиц (*когорта*). Знания в области радиационной медицины во многом базируются на наблюдениях за когортой лиц, пострадавших в результате ядерных взрывов над Хиросимой и Нагасаки.

Отдаленные эффекты могут возникнуть из-за мутации одной-единственной клетки, поэтому теоретически они не имеют дозового порога. На этом основана так называемая *линейная беспороговая (ЛБП) модель*. Согласно этой модели, стохастические эффекты могут возникать при любых дозах облучения, причем с увеличением дозы повышается не тяжесть этих эффектов, а вероятность (риск) их появления.

Некоторые ученые оспаривают ЛБП-модель. Однако в 2006 весьма авторитетный орган – Комитет Национальной академии наук США по биологическим эффектам ионизирующего излучения (*БЭИР, BEIR – Biological Effects of Ionizing Radiation*) – опубликовал всесторонний обзор научных сведений по действию радиации и на его основе подтвердил заключение о том, что при низких дозах риск носит линейный характер без пороговой величины.

Для оценки вероятности (риска) стохастических эффектов принято использовать *эквивалентную* и *эффективную* дозы облучения, измеряемые в **зивертах (Зв)** или производных единицах ($1 \text{ мЗв} = 10^{-3} \text{ Зв}$, $1 \text{ мкЗв} = 10^{-6} \text{ Зв}$). Установлено, что вероятность стохастических эффектов зависит как от типа излучения (альфа, бета, гамма и др.), так и от того, какие органы или ткани тела облучаются.

Эквивалентная доза Н служит мерой риска при облучении отдельного органа или ткани человека с учетом типа излучения. Она получается из поглощенной дозы умножением на коэффициенты w_r , называемые *взвешивающими множителями излучения*:

$$H = D \cdot w_r .$$

Значения этих коэффициентов составляют: 1 – для гамма и бета-излучения и 20 – для альфа-излучения.

Наиболее полной величиной, описывающей стохастические эффекты, служит **эффективная доза Е**. Она определяет риск при облучении всего организма и равна сумме произведений эквивалентных доз для отдельных органов или тканей на так называемые *тканевые множители* (w_t):

$$E = w_1 \cdot H_1 + w_2 \cdot H_2 + \dots + w_t \cdot H_t + \dots$$

Эти множители учитывают неодинаковую чувствительность разных органов или тканей человека к воздействию излучения. Наиболее высокие значения тканевых множителей для красного костного мозга, легких, желудка, толстого кишечника и молочной железы (по 0,12). Для половых желез соответствующее значение составляет 0,08; для мочевого пузыря, пищевода, печени и щитовидной железы – по 0,04. Минимальные значения тканевых множителей имеют костная поверхность, кожа, головной мозг и слюнные железы – по 0,01.

С целью адекватного информирования общественности, правительств пострадавших государств о последствиях чернобыльской аварии для здоровья людей в 2003 году под эгидой ООН был создан Чернобыльский научный форум. В 2005 году Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) опубликовала доклад экспертной группы «Здоровье» Чернобыльского форума «Медицинские последствия Чернобыльской аварии и специальные программы здравоохранения» [71]. Уточненные данные о медицинских последствиях чернобыльской аварии содержатся в уже упоминавшемся Докладе НКДАР 2008 года [65]. Здесь и далее представлены во многом перекликающиеся выводы этих докладов, основанных на официальных статистических данных.

Анализ медицинских последствий аварии требует знания доз облучения, полученных различными группами населения. Соответствующая информация представлена в табл. 7 [65]. В этой таблице отдельно выделены дозы облучения щитовидной железы. Это облучение было чрезвычайно интенсивным как вследствие огромной активности выпавшего йода-131, так и в силу короткого периода полураспада: основная часть доз на щитовидную железу была получена в первые же недели после аварии. Как уже отмечалось, йод-131 избирательно накапливался в щитовидной железе, обладающей небольшими размерами. В результате эффекты его воздействия проявились рано и оказались значительно сильнее, чем для большинства других радионуклидов, относительно равномерно облучающих организм.

Таблица 7. Оценки доз для основных групп населения, подвергшихся облучению в результате чернобыльской аварии

Группа населения	Размер группы (тыс.)	Средняя доза на щитовидную железу, 1986 год (мГр)	Средняя эффективная доза, 1986-2005 годы (мЗв)
Ликвидаторы	530	нет достоверных данных для всей группы	117 только за счет внешнего облучения в 1986-1990 гг.
Эвакуированные	115	490	31 без учета дозы на щитовидную железу
Жители загрязненных территорий Беларуси, России и Украины (плотность загрязнения выше 37 кБк/м ²)	6 400	102	9 без учета дозы на щитовидную железу
Жители Беларуси, Украины и 19 регионов России	98 000	16	1,3 без учета дозы на щитовидную железу
Жители отдаленных стран, за исключением Беларуси, России, Украины, Турции, кавказских стран, Андорры и Сан-Марино	500 000	1,3	0,3 без учета дозы на щитовидную железу
<i>Для сравнения:</i>		эффективная доза для всего тела от естественного фона за 2 месяца – 0,4 мЗв	эффективная доза для всего тела от естественного фона за 10 лет – 24 мЗв

В дальнейшем облучение продолжалось при гораздо меньшей интенсивности за счет долгоживущих радионуклидов. Основным источником облучения, как внешнего, так и внутреннего, стал и остается до сих пор цезий-137.

Для описания облучения щитовидной железы принято использовать поглощенную дозу в *грэях*. В большинстве других случаев, в том числе при облучении цезием-137, используют эффективную дозу, причем ее значение, выраженное в *зивертах*, близко по величине к поглощенной дозе в *грэях*.

Чтобы определить, насколько велики дозы, приведенные в табл. 7, следует учесть, что человек постоянно подвергается воздействию радиации неаварийной природы за счет природных источников излучения (*естественный фон*) и источников, появившихся в результате деятельности человека (*техногенный фон*). Средняя годовая эффективная доза облучения одного жителя Земли составляет около 2,8 мЗв, из них 2,4 мЗв приходится на естествен-

ный фон, а 0,4 мЗв – на техногенный. Преобладающая часть техногенного облучения обусловлена медицинскими диагностическими процедурами: рентгеновскими и другими.

Будем считать, что облучение радиоактивным йодом длилось около 2 месяцев – за это время распалось более 99% его количества. Полученная за то же время эффективная доза за счет естественного фона составляет одну шестую от 2,4 мЗв, то есть 0,4 мЗв.

Нужно также учесть, что только ее часть поглощалась в щитовидной железе. Эту дозу, выраженную в *грэях*, можно оценить, умножив полученное значение на тканевый множитель, составляющий для щитовидной железы всего 0,04.

Таким образом, данные третьего столбца табл. 7 говорят о том, что дозы облучения щитовидной железы за счет йода-131 значительно превышали дозы от естественного облучения даже для жителей отдаленных стран, не говоря уже о жителях Беларуси, Украины, России и еще более пострадавших группах населения, представленных в табл. 7.

Чтобы сделать выводы об облучении долгоживущими радионуклидами (4-й столбец таблицы), учтем, что за 10 лет (1986–2005 годы) эффективная доза от естественного фона составила около 24 мЗв. Таким образом, говорить о существенном превышении фонового уровня радиации можно только для таких категорий населения, как ликвидаторы и эвакуированные.

Эти несложные рассуждения во многом предвосхищают выводы современной науки о медицинских радиологических последствиях чернобыльской аварии, о которых пойдет речь в следующем разделе.

2.19. Медицинские последствия

К самым ранним медицинским последствиям чернобыльской аварии относится **острая лучевая болезнь** (ОЛБ) у персонала станции и аварийных работников. Она стала следствием огромных доз облучения от всех выпавших радионуклидов в непосредственной близости от станции. Наибольшие дозы, составлявшие от 2 до 20 Гр, получили примерно 1000 человек, которые находились рядом с реактором в момент взрыва и первые дни после него [71]. Из них 237 человек прошли первоначальное обследование с целью выявления острой лучевой болезни. В последующем диагноз ОЛБ был подтвержден у 134 пациентов. Из них 28 человек скончались в 1986 году, несмотря на активное лечение, в том числе

трансплантацию красного костного мозга. В период по 2005 год среди выживших после ОЛБ по разным причинам умерло 22 человека. Негативными последствиями для здоровья лиц, перенесших ОЛБ, остаются поражения кожи и катаракта [65].

Надежно установленным медицинским последствием чернобыльской аварии является заболеваемость **раком щитовидной железы**, что явилось прямым следствием высоких доз облучения йодом-131.

Особенно высоким рост этой заболеваемости оказался для лиц моложе 18 лет на момент аварии (то есть детей и подростков), проживающих на территории Беларуси, Российской Федерации и Украины. Среди жителей большинства населенных пунктов дозы облучения щитовидной железы у детей были примерно в 10 раз больше, чем у взрослых [65]. Причина в том, что осевший на пастбища радиоактивный йод концентрировался в молоке коров, а молоко и молочные продукты составляют значительную долю в рационе питания детей и подростков. Ситуация усугублялась общим дефицитом йода в рационе питания жителей, что привело к стремительному накоплению йода-131 в щитовидной железе.

Специалисты расценивают происшедшее как «**йодный удар**». От него пострадали не только дети – многие специалисты считают, что практически все население Беларуси, жившее на момент аварии, в той или иной форме страдает патологиями щитовидной железы. Йодного удара можно было избежать путем йодной профилактики, а также запретом на несколько недель потребления молока (см. 2.11). Единственной страной, сумевшей достаточно своевременно и полно провести йодную профилактику, была Польша [65].

В Беларуси, Украине и четырех наиболее пострадавших областях России с 1991 по 2005 годы диагностировано 5127 случаев рака щитовидной железы у детей и подростков [65]. Резкий рост заболеваемости начал отмечаться примерно через 5 лет после аварии (спустя так называемый *латентный* или скрытый период). Эта форма рака относится к *операбельным*, и, к счастью, даже среди детей с запущенной болезнью лечение очень эффективно. Однако следует учитывать, что пострадавшим необходимо принимать лекарства всю оставшуюся жизнь. Ожидается, что увеличенная заболеваемость населения раком щитовидной железы в результате чернобыльской аварии продолжится многие годы, хотя точную оценку долгосрочным последствиям дать трудно.

Если в первые недели после аварии преобладающим источником облучения был йод-131, то в дальнейшем основным источ-

ником облучения, как внешнего, так и внутреннего, стал (и остается) цезий-137. Это облучение имеет сравнительно небольшую мощность, но продолжится еще несколько десятилетий. Последствия этого облучения не могли не сказаться для таких категорий, как ликвидаторы и эвакуированные.

Как уже отмечалось, в ликвидации последствий аварии участвовало свыше полумиллиона человек. Самые большие дозы радиации получили около 240 000 ликвидаторов, работавших в пределах 30-километровой зоны вокруг реактора. В среднем дозы, полученные ликвидаторами, составили около 100 мЗв, хотя в отдельных случаях достигали 500 мЗв и выше [71].

Согласно линейной беспороговой модели, даже небольшие дозы, дополнительные к фоновому облучению, увеличивают риск заболеть раком. По заключению экспертов группы «Здоровье» [71] в трех группах людей, подвергшихся наибольшему воздействию радиации (240 000 ликвидаторов, 116 000 эвакуированных жителей, а также 270 000 жителей зон с загрязнением свыше 555 кБк/м², которые в Беларуси относят к зонам с правом на отселение), на протяжении их жизни может произойти до 4 000 дополнительных случаев смерти от рака. Эти дополнительные случаи смерти в результате облучения составляют 3–4 процента от уровня заболеваемости раком, вызванной всеми другими возможными причинами.

Точность этих прогнозов невелика в силу следующих причин. Во-первых, прогнозы строятся на оценках дозы, делающихся спустя значительное время после аварии. Реальные же дозы, полученные населением, в большинстве случаев неизвестны. Во-вторых, модели оценки в основном базируются на данных по жертвам атомных бомбардировок. Представители этой когорты получили высокие дозы радиации за короткий период времени, в то время как воздействие радиации на население после чернобыльской аварии происходило при низких дозах и в течение длительного времени. Эффекты облучения такого рода изучены мало.

Если говорить о возможных видах онкологических заболеваний в результате повышенных доз облучения, то ранее считалось, что в первую очередь действие ионизирующего излучения должно приводить к **лейкемии**, то есть образованию злокачественных клеток крови. Повышенный риск развития лейкемии был впервые выявлен среди людей, переживших атомные бомбардировки в Японии, в интервале от двух до пяти лет после воздействия радиации. Согласно [71] результаты исследований свидетельствуют о росте

в два раза заболеваемости лейкемией среди ликвидаторов чернобыльской аварии, подвергшихся наибольшему облучению. Среди детского и взрослого населения загрязненных районов скольконибудь значимого роста не обнаружено. На основе данных о жертвах Хиросимы и Нагасаки можно предположить, что сейчас, спустя 26 лет после аварии, большинство случаев лейкемии, которые могли быть связаны с чернобыльским облучением, уже произошло.

Другой группой неплохо изученных результатов повышенных доз облучения являются воздействия на **репродуктивную функцию, наследственность и здоровье детей**. Исследования показывают, что в результате чернобыльской аварии изменений таких показателей, как способность к зачатию, количество случаев мертворождений, неблагоприятный исход беременности или осложнения во время родов, не наблюдалось и не ожидается в будущем [71]. Это не должно вызывать сомнений с учетом низкого уровня доз, полученных большинством населения. В Беларуси отмечается небольшой и непрерывный рост числа врожденных пороков развития. Однако он наблюдается как в загрязненных, так и в незагрязненных районах и, по всей видимости, связан с улучшениями качества исследований, а не с воздействием радиации.

Еще одним изученным радиологическим эффектом является возникновение **катаракты**. Известно, что при больших дозах облучения могут возникать изменения в хрусталике глаза. В ходе исследований состояния здоровья пострадавших от чернобыльской аварии было установлено, что для помутнения роговицы достаточно дозы в 250 мЗв. Результаты недавних исследований, проведенных среди других популяций, подвергшихся воздействию ионизирующей радиации (например, космонавтов, пациентов, которым делалась компьютерная томография головы), подтверждают это заключение [71].

Результаты крупного исследования, проведенного российскими учеными среди ликвидаторов аварии, свидетельствуют о повышенном риске смертности от **сердечно-сосудистых заболеваний** среди лиц, подвергшихся большим дозам облучения [71]. Для подтверждения этого требуются дальнейшие работы, однако полученные данные соответствуют результатам других исследований, проведенных, например, среди пациентов, проходящих радиотерапию и получающих достаточно большие дозы на сердце.

Возможно, что еще одним радиологическим последствием аварии является небольшой рост заболеваемости **раком молочной железы**. Он обнаружен среди женщин предклимактерического пе-

риода в наиболее загрязненных районах [71]. Однако для подтверждения этого предположения необходимо провести тщательно спланированные дополнительные исследования.

В слабозагрязненных районах Беларуси, Российской Федерации и Украины, где плотность загрязнения цезием-137 незначительно превышает 37 kBк/м^2 , проживает приблизительно шесть миллионов человек. Дозы их облучения от чернобыльских выпадений невелики и меньше уровней естественного фона. Эта часть населения за 20 лет после аварии накопила дозы, эквивалентные тем, которые получают за один сеанс рентгеновской компьютерной томографии тела. Расчеты показывают, что в этой популяции может произойти до 5 000 дополнительных случаев смерти от рака, или 0,6% случаев смерти, ожидаемых в результате других причин [71]. Обнаружить такой прирост на фоне естественных колебаний смертности и определить, какие конкретные случаи рака были вызваны радиацией, практически невозможно.

Таким образом, выводы экспертов ВОЗ говорят о том, что радиологические медицинские последствия чернобыльской аварии для населения не могут быть классифицированы как значительные.

Выводы же последнего доклада НКДАР еще более оптимистичны: «На сегодняшний день для когорт жителей Беларуси, Российской Федерации, Украины и других стран Европы, получивших средние эффективные дозы менее 30 мЗв в течение 20 лет, отсутствуют убедительные данные для прогнозирования их радиогенной заболеваемости и смертности с разумной определенностью».

Однако отсутствие заметного роста риска развития рака и других радиологических последствий, за исключением рака щитовидной железы, не является доказательством того, что такого роста не произошло. Дело в том, что обнаружить такой рост чрезвычайно трудно, поэтому эксперты сходятся во мнении, что необходимы дальнейшие эпидемиологические исследования с широким участием мирового научного сообщества.

Нерадиологические медицинские последствия Чернобыля наименее изучены. Очевидно, что переселение людей, сопряженное с потерей имущества, изменением образа жизни и питания, разрывом социальных связей, не могло не сказаться на общем состоянии здоровья населения. Сыграл свою негативную роль и стресс, усугубленный неадекватным информированием. Миллионы людей ис-

пытывали чувства беспокойства и замешательства, ощущали отсутствие физического и эмоционального благополучия. Особенно остро переживались угроза здоровью нынешнего и будущих поколений, утрата экономической стабильности. До сих пор на качестве жизни населения пострадавших районов сказываются демографические изменения, вызванные оттоком врачей, учителей, специалистов и молодежи.

Таким образом, авария оказала глубокое воздействие на психическое здоровье и благополучие целого поколения людей. Возникающим отклонениям трудно поставить медицинский диагноз и описать их количественно. У людей, пострадавших от аварии, по сей день наблюдаются тяжелые стрессовые и тревожные состояния, а также не объяснимые с медицинской точки зрения физические симптомы. Для части пострадавшего населения характерны ощущение беспомощности и неспособности контролировать будущее; чрезмерная обеспокоенность в отношении своего здоровья; неосторожное поведение, например, злоупотребление алкоголем и табаком, сбор грибов и ягод или развлечения в зонах, где имеются предупреждающие знаки о высоких уровнях радиации и др. В этой связи специалисты говорят о синдроме «чернобыльской жертвы».

Следует отметить, что на состоянии здоровья людей не могли не сказаться и другие факторы. В их числе существовавшие на пострадавших территориях проблемы общей экологии, снижение уровня жизни после распада СССР, что привело к общему увеличению смертности и сокращению продолжительности жизни в трех наиболее пострадавших от аварии странах. Все они, наряду с проявлениями стресса, затрудняют анализ медицинских последствий чернобыльской аварии.

В настоящее время подавляющее большинство жителей загрязненных территорий получает эффективную дозу облучения менее 1 мЗв в год сверх естественного и техногенного фона, как этого требует законодательство. Эта дополнительная доза в 3–10 раз меньше фоновых значений. Медицинская наука не располагает достоверными фактами ухудшения здоровья населения за счет такого дополнительного облучения. Поэтому для разговоров об общем значительном росте заболеваемости в результате облучения чернобыльскими радионуклидами нет достаточных оснований (исключение – патологии щитовидной железы в результате «йодного удара»).

2.20. Социально-экономические последствия

Чернобыльская авария изменила жизнь миллионов людей, привела к огромным потерям для экономики наиболее пострадавших стран – Беларуси, России и Украины.

Уже отмечалось, что в 1986 году было эвакуировано 116 000 человек, а в общей сложности за все годы было переселено более 330 000 человек. Эти меры позволили снизить дозы облучения переселенцев, но большинству из них нанесли глубокую психологическую травму. У многих, особенно людей пожилого возраста, возникли проблемы с адаптацией. Опросы показывают, что значительная часть переселенцев хотела бы вернуться в родные места.

Огромное число людей покинуло места своего проживания самостоятельно. В Беларуси их насчитывается около 400 000 [72]. В результате эвакуации и добровольной миграции демографическая ситуация в пострадавших районах оказалась нарушенной. Интенсивнее других уезжали молодежь, интеллигенция, квалифицированные специалисты.

Во многих районах пенсионеров больше, чем трудоспособного населения, в результате чего смертность заметно превышает рождаемость. Последний факт способствует распространению убеждения об опасности проживания в загрязненных районах, что еще более дестабилизирует ситуацию. Отток учителей, врачей и специалистов приводит к значительному снижению качества инфраструктуры, а неразвитая инфраструктура делает условия жизни малопригодными для молодежи.

Подавляющая часть населения пострадавших территорий проживала в сельской местности. Для многих людей существенным источником благосостояния была продукция частных хозяйств, производимая для собственного потребления и на продажу. Повышенное содержание радионуклидов в этой продукции привело как к опасности ее потребления самими производителями, так и к трудностям реализации на рынке. Многочисленные запретительные меры были направлены на снижение доз облучения, однако они ввели в серьезное противоречие со сложившимся укладом жизни.

В масштабе государства именно сельскохозяйственная, а также лесная отрасли понесли урон сильнее других отраслей экономики. В трех пострадавших странах было выведено из оборота около 800 000 га сельскохозяйственных угодий, примерно на 700 000 га была прекращена лесозаготовка. И то и другое повлекло серьезные проблемы с трудоустройством населения.

Сильно пострадала и промышленность загрязненных регионов, поскольку большинство ее предприятий занималось производством пищевых продуктов и лесоматериалов. Часть предприятий была закрыта, продукция оставшихся стала более дорогой, хотя бы в силу необходимости постоянного радиационного контроля.

Задача производства относительно безопасной продукции в аграрном секторе потребовала от государства проведения широкомасштабных и дорогостоящих защитных мероприятий. В их числе применение особых методов обработки почвы, внесение повышенных доз минеральных удобрений, известкование почв.

Калий и цезий находятся в одном столбце таблицы Менделеева, поэтому обладают схожими химическими свойствами. Насыщая почву калием, можно добиться снижения поступления в растения цезия. Аналогичный вывод можно сделать для кальция и стронция. Кроме того, любой способ повышения урожайности культур ведет к снижению содержания в них радионуклидов. Действительно, при одинаковой корневой системе и большем числе плодов на стебле в каждый из плодов поступит меньшее количество радионуклидов.



Рис.64. Город Славутич

Однако необходимость защитных мер в АПК снижает рентабельность производства сельхозпродукции, что ставит пострадавшие районы в невыгодные условия по сравнению с «чистыми».

Огромные расходы потребовались для работ по локализации последствий аварии, строительству саркофага, переселению жителей (см. 2.10–12). Вместо отселенного города Припять для персонала ЧАЭС

был построен город Славутич (рис. 64).

Для эвакуированных в 1986 году 116 000 человек в 1986–1987 годах было построено около 15 тысяч квартир, 23 тысячи домов (рис. 65, 66), 800 учреждений социально-культурной сферы. Значительные средства были выделены для создания необходимой материальной инфраструктуры в поселках для переселенцев: систем водо- и энергоснабжения, канализации и др. Поскольку сжигать местную древесину и торф для отопления и приготовления пищи

было признано небезопасным, многие деревни пришлось ускоренными темпами газифицировать.

Эвакуированным был возмещен материальный ущерб (см. 2.11). Пришлось компенсировать потери финансовых, материальных и технических ресурсов пострадавшим промышленным и сельскохозяйственным предприятиям. Значительное финансирование потребовалось на создание системы радиационного контроля и мониторинга.



Рис. 65. Поселок переселенцев в н.п. Моисеевка Мозырского района



Рис. 66. Дома для переселенцев в деревне Говяды Шкловского района

Для пострадавшего от аварии населения была введена обширная система льгот и денежных компенсаций. В Республике Беларусь по сегодняшний день обеспечивается бесплатное ежегодное оздоровление детей из пострадавших районов и бесплатное многоразовое питание учащихся. Действует система специальной медицинской диспансеризации всего пострадавшего населения, охватывающая около 1,5 миллиона человек [72].



Рис. 67. Концерт А. Пугачевой в зоне

Общая сумма затрат СССР на преодоление последствий аварии за период 1986–1989 годы составила около 9,2 млрд. рублей, что соответствовало на то время 12,6 млрд. долларов США. Часть этих средств была собрана простыми людьми. На специально открытый во всех сберкассах страны «счет 904» за полгода поступило 520 млн. рублей [39].

Свой вклад в пожертвования внесли многие известные деятели культу-

ры. 1 июня 1986 года, в здании администрации Чернобыля с 4-часовым концертом выступил Иосиф Кобзон. Всего певец дал три концерта в загрязненной зоне, посетил покинутый город Припять. 8 сентября 1986 года в поселке Зеленый Мыс, где строился город для ликвидаторов, состоялся концерт Аллы Пугачевой (рис. 67). Она выступала на открытой площадке посреди поля, заполненного тысячами людей. В Зеленом Мысе выступали Валерий Леонтьев и другие звезды советской эстрады. Концерт Леонтьева начался в полночь и закончился под утро. Четыре тысячи человек не расходились, даже когда рассвело.

Только в 1990 году расходы бюджета СССР на мероприятия по преодолению аварии составили около 3,4 млрд. рублей, а из бюджетов РСФСР, УССР и БССР дополнительно было выделено по 1 млрд. рублей. В 1991 году на эти цели было выделено 10,3 млрд. руб., однако вследствие распада СССР запланированные мероприятия были профинансированы лишь частично. В дальнейшем финансовое бремя последствий аварии три наиболее пострадавшие страны несли по отдельности.

Размеры расходов других стран по преодолению последствий аварии точно неизвестны. Оценочная стоимость контрмер, выплаты компенсаций и других мероприятий для северных стран Европы составляет около 200 млн. долл. США [73].

Суммарный социально-экономический ущерб, нанесенный Республике Беларусь чернобыльской аварией, оценивается специалистами в 235 млрд. долларов США в расчете на тридцатилетний период преодоления последствий. Ущерб Украины составляет 201 млрд. долл. США. Аналогичных данных для России нет, однако можно предположить, что по сравнению с Беларусью и Украиной ущерб, нанесенный России, меньше в связи со значительно меньшими масштабами эвакуации населения [73].

Затраты на преодоление последствий чернобыльской аварии еще многие годы будут тяжким бременем для экономик трех наиболее пострадавших стран. Размеры ущерба, нанесенного Украине и особенно Беларуси, несоизмеримы с реальными экономическими возможностями этих стран для его полного устранения в ближайшие годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nuclear energy of the future: what research for which objectives? – Paris: CEA Saclay and Groupe Moniteur, 2006. – 108 p.
2. International Energy Agency. Key World Energy Statistics 2013 [Электронный ресурс]. 2012. – URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013_FINAL_WEB.pdf. – Дата обращения: 17.09.2013.
3. Атомная электростанция. [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Атомная_электростанция. – Дата обращения: 17.09.2013.
4. Хиппен, Ф. Утилизация ядерного топлива. В мире науки. – 2008. – №8. – С. 38–43.
5. Кузнецов, В.М. Вывод из эксплуатации объектов атомной энергетики. [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: <http://www.seu.ru/programs/atomsafe/books/Kuznecov/snytie.pdf>. – Дата обращения: 13.09.2013.
6. Кузнецов, В. М., Меньшиков, В. Ф. Нерешенность проблемы вывода из эксплуатации энергетических ядерных реакторов в России – глобальный тупик атомной энергетики. [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: <http://www.seu.ru/programs/atomsafe/books/Kuznecov/Doclad5.pdf>. – Дата обращения: 13.09.2013.
7. World Nuclear Association. The Nuclear Renaissance [Электронный ресурс]. – 2011. – URL: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/The-Nuclear-Renaissance/#.UnIF1xBVeSp>. – Дата обращения: 15.09.2013.
8. International Atomic Energy Agency. Operational & Long-Term Shutdown Reactors. 2012 [Электронный ресурс]. – 2012. –URL: <http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>. – Дата обращения: 13.06.2012.
9. Фриш, О., Уиллер, Дж. Открытие деления ядер. Успехи физических наук. – 1968. – Том 96, вып. 4. – С. 697–715.
10. Карпан, Н.В. Чернобыль. Месть мирного атома / Исторический обзор этапов развития атомной науки и техники. Анализ причин событий Чернобыльской катастрофы. – Киев: ЧП «Кантри Лайф», 2005. – 566 с.

11. Бэкман, И.Н. Военные реакторы. [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: http://profbeckman.narod.ru/RN0.files/24_1.pdf. – Дата обращения: 17.09.2013.
12. Красин, А.К. Ядерная энергетика и пути ее развития. Мн.: Наука и техника, 1981. – 207 с.
13. Чуприн, К. Два лика мобильного атома. Военно-промышленный курьер. – №39 (456). – 2012.
14. World nuclear Association. Nuclear Power Reactors. [Электронный ресурс]. – 2013. – URL: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Power-Reactors/Nuclear-Power-Reactors>. – Дата обращения: 15.09.2013.
15. Рябцев И., Якимец, В. Три-Майл-Айленд. /Ядерная энциклопедия. – М.: Благотворительный фонд Ярошинской, 1966. – С. 262–263.
16. Андрушечко, С.А., Афров, А.М., Васильев, Б.Ю., Генералов, В.Н., Косоуров, К.Б., Семченков, Ю.М., Украинцев, В.Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М: «Логос», 2010. – 628 с.
17. Бэкман, И.Н. Реакторы на быстрых нейтронах. [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: http://profbeckman.narod.ru/RN0.files/23_3.pdf. – Дата обращения: 17.09.2013.
18. Гурин, В. Ядерный реактор. /Ядерная энциклопедия – М.: Благотворительный фонд Ярошинской, 1966. – С. 51–54.
19. Гурин, В. Физические основы, системы и типы ядерных реакторов. /Ядерная энциклопедия – М.: Благотворительный фонд Ярошинской, 1966. – С. 55–59.
20. Левин, В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. – 4-е изд. – М.: Атомиздат, 1979.
21. Правила ядерной безопасности атомных электростанций. ПБЯ-04-74. – М: Атомиздат, 1974.
22. Дойч, Дж., Мониц, Э. Ядерный вариант. В мире науки – 2007. – №1. – С. 46–51.

23. Чернобыльская катастрофа. Историография событий, социально-экономические, геохимические и медико-биологические последствия. / Под ред. Барьяхтара В.Г. – Киев: Наукова думка, 1995.

24. Острецов, И. История Чернобыльской катастрофы. [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: http://scepsis.net/library/id_3002.html. – Дата обращения: 17.09.2013.

25. Реактор Большой Мощности Канальный. [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/РБМК>. – Дата обращения: 17.09.2013.

26. Доллежалъ, Н.А., Емельянов, И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М: Атомиздат, 1980. – 208 с.

27. Авария на Чернобыльской АЭС. [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Авария_на_Чернобыльской_АЭС. – Дата обращения: 17.09.2013.

28. Дмитриев, В. Чернобыльская катастрофа. Причины ее известны. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://n-t.ru/tp/ie/ck.htm>. – Дата обращения: 17.09.2013.

29. Ядрихинский, А.А. Ядерная авария на 4 блоке Чернобыльской АЭС и ядерная безопасность реакторов РБМК. – Курчатов: Инспекция Госатомэнергонадзора СССР, 1989. – 47 с.

30. Румянцев, А.Н. Чернобыль в 2009 году. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2842>. – Дата обращения: 17.09.2013.

31. Федуленко, В.М. Чернобыльская Авария как это было? [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://mamarama.ru/viewby/user/id/2064/>. – Дата обращения: 17.09.2013.

32. Абакумов, В.Я. Анализ причин и обстоятельств аварии 1975 года на 1-м блоке ЛАЭС (комментарий инженера-физика, участника и очевидца событий). [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://accidont.ru/Accid75.html>. – Дата обращения: 17.09.2013.

33. Как готовился взрыв Чернобыля. (Воспоминания В.И.Борца). [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://pripyat.com/articles/kak-gotovilsya-vzryv-chernobylya-vospominaniya-vibortsa.html>. – Дата обращения: 17.09.2013.
34. Авария на ЛАЭС 75 года. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://accident.ru/LAES75.html>. – Дата обращения: 17.09.2013.
35. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК/ под общ. ред. Ю.М. Черкашова. – Москва, 2006. – 631 с.
36. О причинах и обстоятельствах аварии на 4 блоке чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г. – Доклад Комиссии Госпроматомнадзора СССР. – 1991 г.
37. Медведев, Г.У. Чернобыльская тетрадь. «Ядерный загар». – М: Книжная палата, 1990.
38. Дятлов, А.С. Чернобыль. Как это было? – М: Научтехиздат, 2003.
39. Дьяченко, А.А. Опыт ликвидации последствий чернобыльской катастрофы. – М: Институт стратегической стабильности Минатома России, 2004.
40. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ. – Атомная энергия. – 1986. – Т. 61, вып. 5. – С. 301.
41. Итоговый доклад о совещании по рассмотрению причин и последствий аварии в Чернобыле. Серия изданий по безопасности. – Вена, МАГАТЭ. – 1986. – № 75-INSAG-1.
42. Чернобыльская авария: Дополнение к INSAG-1: INSAG-7: Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности. – Вена, МАГАТЭ, 1993.
43. Щербак, Ю. Чернобыль. М: Советский писатель, 1991.
44. Списки погибших при аварии. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://pripyat-city.ru/documents/21-spiski-pogibshix-pri-avarii.html>. – Дата обращения: 17.09.2013.

45. Герои страны. Легасов Валерий Александрович. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: http://www.warheroes.ru/hero/hero.asp?Hero_id=6709. – Дата обращения: 17.09.2013.
46. Лелеков, С. Вертолеты над Чернобылем. – Независимое военное обозрение. 28.04.2006.
47. ЧАЭС: ликвидация аварии. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://chornobyl.in.ua/licvidacia-avarii.html>. – Дата обращения: 17.09.2013.
48. Ликвидация аварии – разгон облаков. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://chornobyl.in.ua/razgon-oblako.html>. – Дата обращения: 17.09.2013.
49. Чернобыльский "Циклон". – Российская газета. – № 4049 от 21 апреля 2006 г.
50. Полк 11350: было и убыло. – Российская газета. – № 5460 от 20 апреля 2011 г.
51. Мешков, Н.А. Величина и структура доз облучения ликвидаторов в зависимости от этапа ликвидации последствий радиационной аварии и вида работ. – Радиация и риск. – 2009. – Т. 18, № 1.
52. Легасов, В.А. Об аварии на Чернобыльской АЭС /тексты магнитофонных записей/. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: http://www.e-reading.biz/bookreader.php/33301/Legasov_-_Ob_avarii_na_Chernobyl%27skoi_AES.html. – Дата обращения: 17.09.2013.
53. Паскевич, С., Вишневский, Д. Чернобыль: реальный мир. – Эксмо, 2010. – 224 с.
54. Ярошинская, А. Чернобыль. 20 лет спустя. Преступление без наказания. М: Время, 2006. – 640 с.
55. Ядерное топливо в объекте «Укрытие». Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ). [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/201/>. – Дата обращения: 17.09.2013.

56. Новый безопасный конфайнмент. ГСП ЧАЭС. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: http://www.chnpp.gov.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=177%3A2012-02-09-10-25-56&catid=87%3A-2&Itemid=89&lang=ru. – Дата обращения: 17.09.2013.
57. Ярошинская, А. Философия ядерной безопасности. – Москва: МНЭПУ, 1996.
58. Специальное сообщение об обстановке на ЧАЭС октябрь 1984 года. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://pripyat.com/documents/spetsialnoe-soobshchenie-ob-obstanovke-na-chaes-oktyabr-1984-goda.html>. – Дата обращения: 17.09.2013.
59. Комаров, В.И. «Свидетель обвинения». – Единая Россия. – №15 (139) от 24 апреля 2006 года.
60. XXVIII съезд КПСС. Стенографический отчет. – М: Издательство политической литературы, 1991. – Т. 2. – С. 585–598.
61. Владимир Васильевич Щербицкий. Биография. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <http://www.people.su/127293>. – Дата обращения: 17.09.2013.
62. Акт расследования причин аварии на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС, произошедшей 26.04.86 г. ЧАЭС, уч. № 79, пу. 05.05.86.
63. Дополнение к акту расследования причин аварии на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС, произошедшей 26 апреля 1986 г.» Минэнерго СССР, Союзатомэнерго, инв. № 4/611, 1986 г.
64. Носовский, А.В., Васильченко, В.Н., Ключников, А.А., Пристер, Б.С. Авария на Чернобыльской АЭС. Опыт преодоления. Извлеченные уроки. – Киев: Техника, 2006. – 264 с.
65. Последствия облучения для здоровья человека в результате чернобыльской аварии. Научное приложение D к докладу НКДАР Генеральной Ассамблее ООН 2008 года. – Нью-Йорк, ООН. – 2012. – 173 с.

66. Атлас загрязнения Европы цезием-137 после чернобыльской аварии. Люксембургское бюро для официальных изданий европейских сообществ. – Люксембург, 1998. – 71 с.

67. Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и их преодоление: двадцатилетний опыт. Доклад экспертной группы «Экология» Чернобыльского форума. – Вена, МАГАТЭ, 2008.

68. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на ЧАЭС на пострадавших территориях России и Беларуси». – Москва-Минск, 2009. – 138 с.

69. Кенигсберг, Я.Э., Крюк, Ю.Е. Облучение щитовидной железы жителей Беларуси вследствие чернобыльской аварии: дозы и эффекты. – Гомель, Институт радиологии, 2004. – 121 с.

70. 20 лет после чернобыльской катастрофы. Последствия в Республике Беларусь и их преодоление. Национальный доклад – Под ред. Шевчука В.Е., Гурачевского В.Л. – Мн: Беларусь, 2006. – 112 с.

71. Медицинские последствия Чернобыльской аварии и специальные программы здравоохранения. Доклад экспертной группы «Здоровье» Чернобыльского форума ООН. – Женева, 2006. – 182 с.

72. Четверть века после Чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления. Национальный доклад Республики Беларусь. – Минск, Институт радиологии, 2001. – 89 с.

73. Пятнадцать лет Чернобыльской катастрофы. Опыт преодоления. Материалы международной конференции. – Киев, Чернобыльинтеринформ, 2001. – С. 146–148.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научно-популярное издание

Гурачевский Валерий Леонидович

**Введение в атомную энергетику.
Чернобыльская авария и ее последствия**

Редактор В. В. Ржеуцкая
Компьютерная верстка А. С. Куликова

Подписано в печать 22.12.2014. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,26. Уч.-изд. л. 8,23.
Тираж 500 экз. Заказ 1296.

Издатель РНИУП «Институт радиологии» МЧС Республики Беларусь.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/95 от 25.11.2013.

Отпечатано в Филиале БОРБИЦ РНИУП «Институт радиологии»
МЧС Республики Беларусь.
Ул. Шпилевского, 59, помещ. 7Н, 220112, г. Минск.