



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

А.А. БОРОВОЙ, Е.П. ВЕЛИХОВ

ОПЫТ ЧЕРНОБЫЛЯ

ЧАСТЬ 2





НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

А.А. БОРОВОЙ, Е.П. ВЕЛИХОВ

ОПЫТ ЧЕРНОБЫЛЯ

ЧАСТЬ 2

Москва, 2013

УДК 621.039.586

Корректор: В.В. Зубкова

Дизайн и верстка: Е.Р. Осьмакова

А.А. Боровой, Е.П. Велихов.

Опыт Чернобыля (работы на объекте «Укрытие»). Часть 2.

М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013, 162 с.

ISBN 978-5-904437-38-1

Почти каждый шаг в многолетней эпопее ликвидации последствий аварии на ЧАЭС требовал поиска нестандартных научно-технических решений. В результате коллективом инженеров и ученых, работающих в «Курчатовском институте», других НИИ России и Украины, был накоплен уникальный опыт. Многие из найденных решений, созданных методик и приборов могут быть использованы для предотвращения и минимизации последствий даже относительно небольших по масштабам инцидентов в области ядерной энергетики и промышленности. В «Курчатовском институте» были выпущены многочисленные публикации по этой теме, однако они далеко не исчерпали всей накопленной информации.

Поэтому было решено выпустить монографию, аккумулирующую опыт работ на ЧАЭС (в основном, на объекте «Укрытие»).

В виду большого объема материала он разделен на несколько частей. Но и при таком подходе книга смогла включить в себя описание только наиболее интересных (с точки зрения авторов) исследований, которые выполнялись при участии «Курчатовского института».

ВВЕДЕНИЕ (ко всей книге)

Уже более четверти века прошло с момента аварии на четвертом блоке Чернобыльской АЭС.

Она произошла ночью 26 апреля 1986 г. и привела к полному разрушению активной зоны реактора, верхней части здания 4-го блока станции, к сильным повреждениям деаэрационной этажерки и машинного зала.

Взрывы и возникший пожар сопровождалось выбросом огромной радиоактивности.

Ежесуточно в окружающую среду попадали миллионы Кюри, и этот процесс продолжался до 6 мая, после чего выброс резко упал (в тысячи раз) и в дальнейшем продолжал уменьшаться (рис. 1).

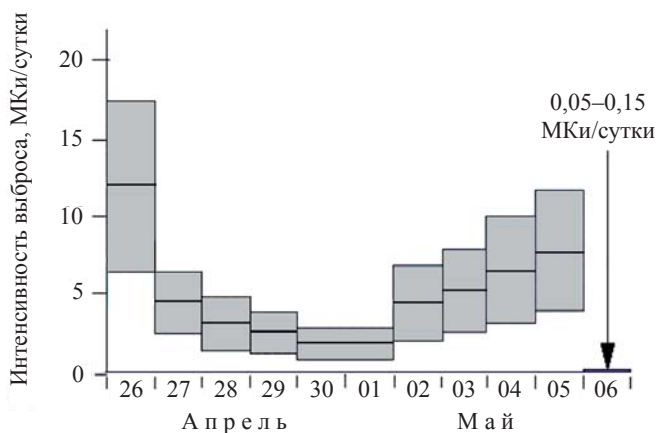


Рис. 1. Интенсивность выброса радиоактивности из разрушенного блока в период активной стадии аварии (в миллионах Кюри в сутки). Погрешность оценки выброса $\pm 50\%$. Значения выброшенной активности пересчитаны на 06.05.86 г. (конец активной стадии) с учетом радиоактивного распада¹ [1]

Всего за пределы разрушенного блока было выброшено (в процентах от накопленного до аварии в реакторе количества радионуклидов) [2]:

- радиоактивных инертных газов — 100%,
- радионуклидов йода, в том числе ^{131}I — (50–70)%,
- ^{137}Cs и ^{134}Cs — (33 $\pm$ 10)%,
- нелетучих радионуклидов в составе частиц диспергированного ядерного топлива (среди них ^{90}Sr , ^{144}Ce , ^{239}Pu , ^{241}Am и многих других) — до 5%.

На рис. 2 представлена карта загрязнения Европы ^{137}Cs .

¹В этом случае все короткоживущие радионуклиды с периодом полураспада порядка 1 дня не вносят заметного вклада в интегральную оценку выброса.

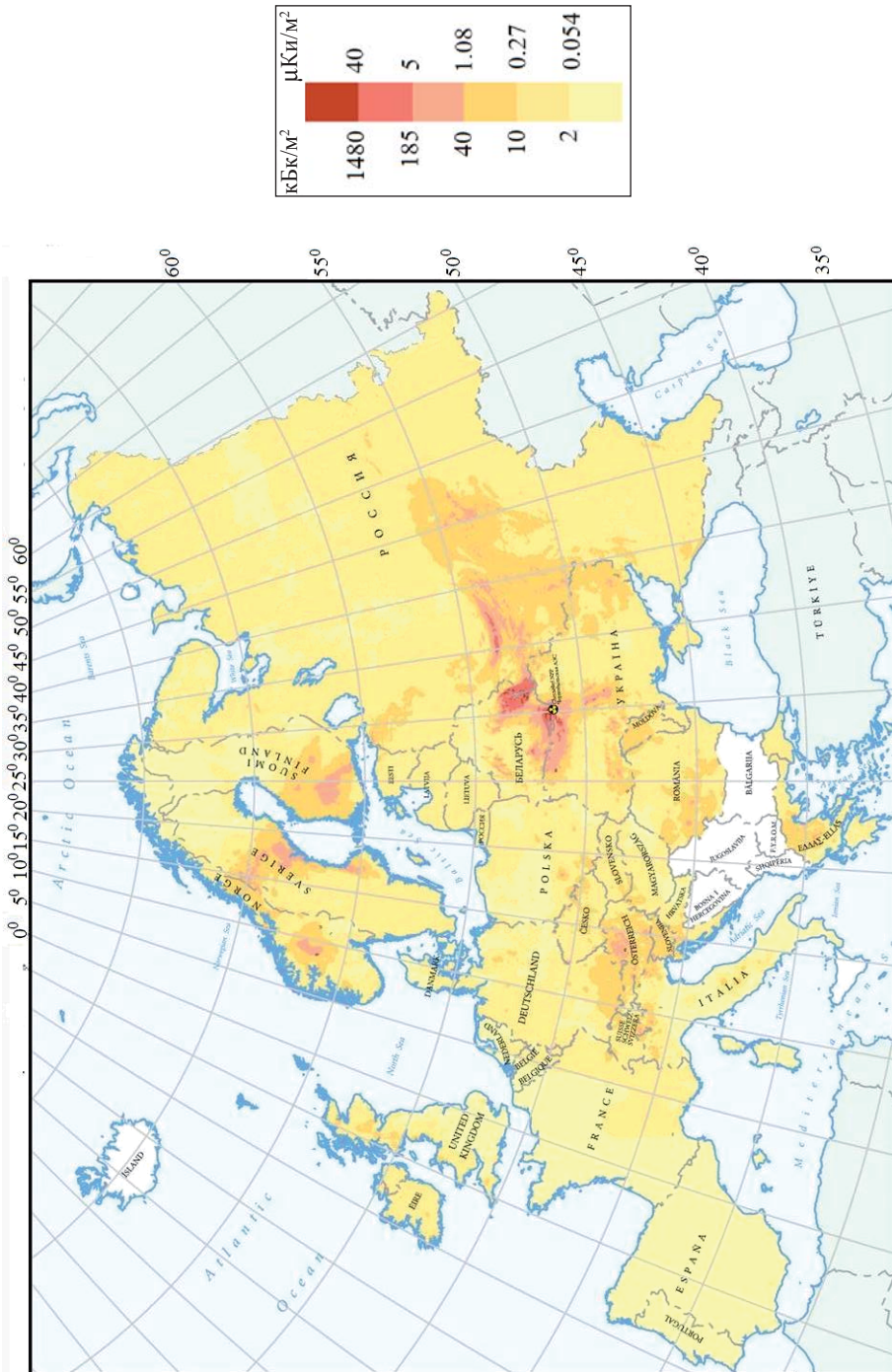


Рис. 2. Европейская карта загрязнения цезием-137 (Чернобыльское + глобальное)

Видно, какие огромные территории затронула авария на ЧАЭС.

Локализация и ликвидация последствий аварии потребовали напряженной, часто поистине героической работы сотен тысяч гражданских и военных специалистов.

Для сопровождения этих работ были привлечены сотрудники десятков научных учреждений страны. От них требовалось в кратчайшее время и с максимальной эффективностью решать задачи, многие из которых не имели ранее даже далеких аналогов.

Часто возникшие проблемы вызывали необходимость проведения совместных «мозговых штурмов» инженеров и научных работников самых разных, иногда очень далеких друг от друга специальностей. В ходе таких «штурмов» были предложены многие новые научно-технические методы и средства, позволившие в дальнейшем выполнить необходимые работы по ЛПА.

Как известно, особо масштабные работы, включающие создание объекта «Укрытие», закрывшего разрушенный блок и практически предотвратившего дальнейший выход радиоактивности в окружающую среду, пуск 1-го и 2-го, а позднее и 3-го блока Чернобыльской АЭС были окончены в 1986–87 гг. Однако оставалось еще много незавершенных дел, как на самой площадке станции, так и на загрязненных территориях.

Что касается «Укрытия», то в первую очередь было необходимо определить степень опасности, которую представляло ядерное топливо и радиоактивные материалы, находившиеся в нем, создать систему мониторинга ТСМ, а также выполнить целый ряд проектных, строительных и монтажных работ по укреплению внутренних конструкций объекта. Для решения этих задач (а также целого ряда задач в чернобыльской Зоне) в конце 1987 г. в Чернобыле была создана комплексная экспедиция при Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (КЭ)². В наиболее напряженный период работ ее численный состав превышал 3000 человек. Стратегию и тактику проводимых работ определял Научный отдел (до 100 человек). В нем были собраны сотрудники ведущих научно-исследовательских институтов Минсредмаша СССР, НИИ Украины и Беларуси (см. [3]).

К 1989 г. стало очевидным, что существующий объект «Укрытие» не может гарантировать ядерную и радиационную безопасность при экстремальных природных воздействиях (землетрясение, ураган). Поэтому специалисты «Курчатовского института» вышли с предложением о преобразовании «Укрытия» в экологически безопасное состояние [4]. Предлагалось возвести над существующим объектом герметичное и прочное сооружение – новый безопасный конфаймент (НБК) или «Укрытие-2», которое могло бы простоять многие десятилетия. А со временем создать технологии и под защитой НБК разобрать разрушенный блок, вывезти и захоронить топливо.

²Основными задачами КЭ были определены следующие.

1. Проведение НИР по обеспечению безопасного состояния объекта «Укрытие».
2. Изучение радиационной обстановки в зоне ЧАЭС и контролируемой зоне.
3. Выполнение конструкторских и проектных работ в обеспечение программы исследований.
4. Выполнение строительно-монтажных работ в обеспечение научных исследований, возложенных на КЭ.

И ряд других задач.

Работа КЭ продолжалась до 1992 г. когда чернобыльская зона перешла под юрисдикцию Украины.

При этом встал вопрос о приемнике КЭ и о продолжении работы российских специалистов на объекте «Укрытие» и ЧАЭС. После обсуждения этого вопроса дирекция «Курчатовского института» совместно с Президиумом Национальной Академии Наук Украины выдвинули предложение о создании в Чернобыле научного центра, в который ежегодно командировались бы сотрудники «Курчатовского института» (и ряда других научных учреждений России) для работы, связанной с безопасностью объекта «Укрытие».

Такой центр был создан (Постановление Кабинета Министров Украины от 4 февраля 1992 г.) на базе КЭ и получил название Межотраслевого Научно-технического Центра «Укрытие» (МНТЦ) при НАНУ. Основной его задачей стало проведение научных и проектных работ по преобразованию «Укрытия» в экологически безопасную систему.

«Курчатовский институт» принял на себя научное руководство Отделением ядерной и радиационной безопасности (ОЯРБ) МНТЦ [3] и продолжил свою деятельность по текущей безопасности «Укрытия» и по подготовке к его преобразованию.

Уже после первых эскизных проработок НБК, а особенно после проведения международного конкурса на его проектирование, стало ясно, что преобразование «Укрытия» очень дорогое мероприятие и потребует международной помощи.

Понадобились масса усилий и значительное время, прежде чем Правительству Украины удалось договориться о создании международного «Чернобыльского фонда». Для этого международной группой в 1996–97 гг., на основе предыдущих исследований русских и украинских специалистов, был разработан Shelter Implementation Plan — План проведения работ на объекте «Укрытие» (SIP). 1998 г. можно считать началом его реализации.

Сейчас работы по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасное состояние продолжают на Чернобыльской АЭС при финансовой, технической и организационной помощи всего международного сообщества, в том числе и России.

Как уже говорилось, почти каждый шаг в многолетней эпопее ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, обеспечению безопасности объекта «Укрытие» и при подготовке его преобразования требовал поиска нестандартных научно-технических решений.

В результате коллективом инженеров и ученых, работающих в «Курчатовском институте», других НИИ России и Украины, был накоплен уникальный опыт.

Он ценен не только для использования в случае крупных аварий.

Многие из найденных решений, созданных методик и приборов могут быть использованы для предотвращения и минимизации последствий даже относительно небольших по масштабам инцидентов в области ядерной энергетики и промышленности.

Все эти годы в «Курчатовском институте» велась работа по сбору, структурированию, сохранению и предоставлению пользователям информации, накопленной в ходе ЛПА на ЧАЭС в 1986–2010 гг. Были выпущены многочисленные публикации по этой теме (см., например, [3, 5–18]), однако, они далеко не исчерпали всего накопленного материала.

В конце 2010 г. в «Курчатовском институте» было решено написать монографию, аккумулирующую опыт работ на ЧАЭС в области научно-технических методов, применявшихся при ЛПА (в основном, на объекте «Укрытие»), включающую и часть уже опубликованных материалов.

Никто не мог предположить, что буквально через несколько месяцев произойдет новая крупнейшая радиационная катастрофа.

11 марта 2011 г. в результате землетрясения на японской АЭС Фукусима Дай-ичи (Ф1) произошла авария, характер и последствия которой позволили сравнивать ее масштабы с чернобыльской и даже присвоить ей 7-ой уровень по шкале INES³.

Землетрясение и удар цунами вывели из строя внешние средства электроснабжения и резервные дизельные электрогенераторы. Это стало причиной неработоспособности всех систем нормального и аварийного охлаждения и в конечном итоге привело к расплавлению активной зоны ряда реакторов, взрывам водорода и разрушению 1–4 блоков.

Исходные события и характер аварий для Чернобыльской АЭС и для Ф1 были различны.

Если в первом случае имело место так называемая «реактивная авария», первопричиной которой стал разгон реактора на мгновенных нейтронах, то вторая была вызвана потерей охлаждения и перегревом ТВЭЛ-ов.

События, произошедшие в дальнейшем, также отличались. В Чернобыле после взрывов, которые за несколько секунд полностью разрушили реактор и сам блок, в течение 10 дней продолжался выброс радиоактивности.

На Ф1 опасность нарастала постепенно. В течении первых 4 дней (с 11 по 15 марта) один за другим развивались аварии на 4-х блоках, сопровождающиеся взрывами и выбросом летучих радиоактивных элементов (см. рис. 3).

Тем не менее многие проблемы, вставшие перед теми, кто работал над локализацией и ликвидацией последствий аварии на Ф1, оказались схожи с чернобыльскими проблемами как 25 летней давности, так и возникавшими в последующие годы.

Среди этих проблем — очистка территории от радиоактивных завалов, обращение с огромными объемами радиоактивной почвы и воды, проведение разведки в разрушенных и загрязненных радиоактивностью помещениях, дезактивация блоков, создание системы мониторинга скоплений ядерного топлива и еще десятки и десятки проблем.

К сожалению, почти сразу обнаружилось, что «опыт Чернобыля» был практически не известен государственным органам, управляющей компании и персоналу, работающему непосредственно на площадке Ф1. Это признал президент японского агентства по атомной энергии (JAEA) Ацуюки Судзуки, который на заседании группы INSAG в ходе генеральной конференции МАГАТЭ в Вене заявил о том, что Япония не отнеслась с нужной серьезностью к изучению аварий на ТМ1-2 и Чернобыльской АЭС.

³Шкала INES (International Nuclear Event Scale) разработана Международным агентством по атомной энергии в 1988 году и с 1990 года используется в целях единообразия оценки чрезвычайных случаев, связанных с аварийными радиационными выбросами в окружающую среду на атомных станциях.

Авария 7-го уровня характеризуется большим выбросом радиоактивности в окружающую среду (радиологический эквивалент более нескольких десятков тысяч ТБк I-131): тяжёлые последствия для здоровья населения и для окружающей среды.

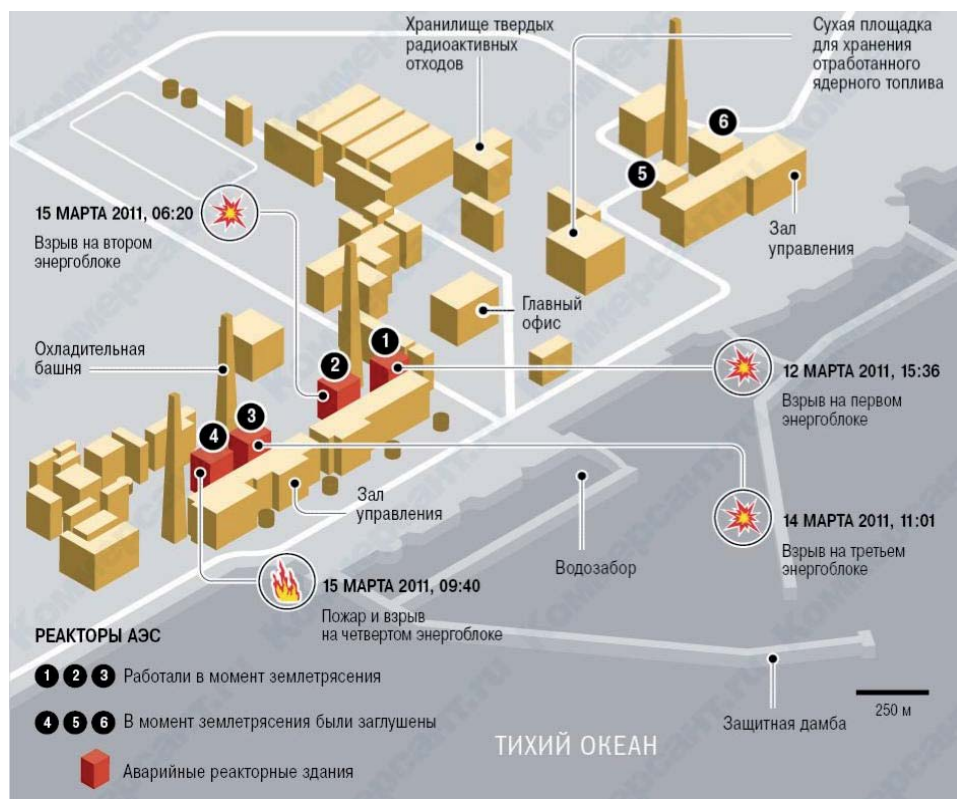


Рис. 3. Состояние энергоблоков АЭС Фукусима Дай-ичи после аварии. На рис. указаны причины разрушения блоков и время, когда это произошло

По оценкам японских специалистов работы по ликвидации последствий аварии на Ф1 продлятся несколько десятилетий.

В свете произошедших событий предлагаемая работа по сбору и обобщению научно-технического опыта, накопленного в «Курчатовском институте» по ЛПА на ЧАЭС, приобретает дополнительную актуальность.

В виду большого объема материала его было решено разделить на несколько частей. Но и при таком подходе книга смогла включить в себя описание только наиболее интересных (с точки зрения авторов) исследований, которые выполнялись при участии «Курчатовского института».

ЛИТЕРАТУРА

1. USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy. The Accident at the Chernobyl NPP and its Consequences. IAEA Post Accident Review Meeting, Vienna, 25–29 August 1986.
2. Боровой А.А., Гагаринский А.Ю. Выброс радионуклидов из разрушенного блока Чернобыльской АЭС, Атомная энергия, т. 90, вып. 2, с. 137–145, 2001 г.
3. А.А. Боровой, Е.П. Велихов. К 25-летию аварии на Чернобыльской АЭС. Работы «Курчатовского института» по ликвидации последствий аварии. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2011 г., 129 с.

4. Беляев С.Т., Боровой А.А. О преобразовании объекта «Укрытие». Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова. Инв. № 57-05/110 от 29.09.89 г., 5 с.
5. Абалин С.С., Беляев С.Т., Боровой А.А. и др. Диагностические исследования аварийного реактора ЧАЭС. Атомная энергия, т. 68, вып. 5, 1990, с. 355–359.
6. Borovoi A.A. Analytical Report (Post-Accident Management of Destroyed Fuel from Chernobyl). IAEA, Work Material, 1990, p. 1–99.
7. Беляев С.Т., Боровой А.А., Бузулуков Ю.П. и др. Некоторые аспекты послеаварийных работ в контролируемой зоне ЧАЭС. Первая международная рабочая группа по тяжелым авариям и их последствиям, Москва, Наука, 1990, с. 131–143.
8. Беляев С.Т., Бондаренко Л.Н., Боровой А.А. и др. Техника и методы изучения нейтронно – физических характеристик топливосодержащих масс 4-го энергоблока ЧАЭС. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова № 5312/3, Москва, 1991 г., 24 стр.
9. Borvoi A., Ivanov A., Sich A. Use of robotic technologies and remote systems for diagnostic and research within the Chernobyl Sarcophagus. Proceedings of ANS Fifth Topical Meeting on Robotics and Remote Systems, Knoxville, Tennessee, April 25–30, 1993, p. 211–216.
10. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отчет МНТЦ «Укрытие». Отв. Исполнитель Боровой А.А. Инв. № 216 от 06.09.96 г., Чернобыль, 188 стр.
11. Borovoi A., Bogatov S. Consequences of Chernobyl; a view ten years on. Advances in Nuclear Science and Technology, Vol. 25, Plenum Press, New York and London, 1997, p. 171–214.
12. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Богатов С.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. и др. Проблемы объекта «Укрытие», Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2002-17, Москва 2002 г., 22 с
13. Боровой А.А. Ядерное топливо в объекте «Укрытие». Атомная энергия, т. 100, вып. 4, апрель 2006 г., с. 259–267.
14. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П., Ключников А.А. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС Москва, Наука, 2010, 240 с.
15. Боровой А.А., Перфилов А.В. Использование специальных скважин для исследований на объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. Препринт РНЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6620/3, Москва, 2010 г., 33 с.
16. Абалин С.С., Боровой А.А., Перфилов А.В. Роботы на объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6684/3 Москва 2011, 44 с.

9. СИСТЕМА «ФИНИШ»

9.1. Система «Финиш» и контроль над безопасностью скоплений ТСМ в «Укрытии» [1–5]

В первой части настоящей работы (см. раздел 2.3) говорилось о том, что в конце 1986 г. и в 1987 г., «усилиями ОГ во многих помещениях объекта были установлены радиационные и тепловые детекторы, постепенно объединявшиеся в так называемую «Оперативную систему диагностики». Их показания существенным образом дополняли и позволяли контролировать не всегда устойчивую работу штатной системы ИДК «Шатер» (см., например, [1]).»

Однако, действительно ведущую роль в мониторинге процессов, происходящих в топливе разрушенного блока, эта оперативная система стала играть после включения в нее в 1988–90 гг. детекторов, установленных с помощью пробуренных скважин или непосредственно разведывательными группами.

Она получила название «Информационно-измерительная система «Финиш» или ИИС «Финиш». (см. рис. 1, 2).

Формирование системы шло следующим образом [2, 3].

После обнаружения скопления ТСМ, рядом с ним, большей частью через скважины, устанавливались «сторожевые» детекторы (см. Главу 4). Они изме-



Рис. 1. Вход в помещение Г359 (деаэраторная этажерка 4-го блока) — пульта управления системой «Финиш»

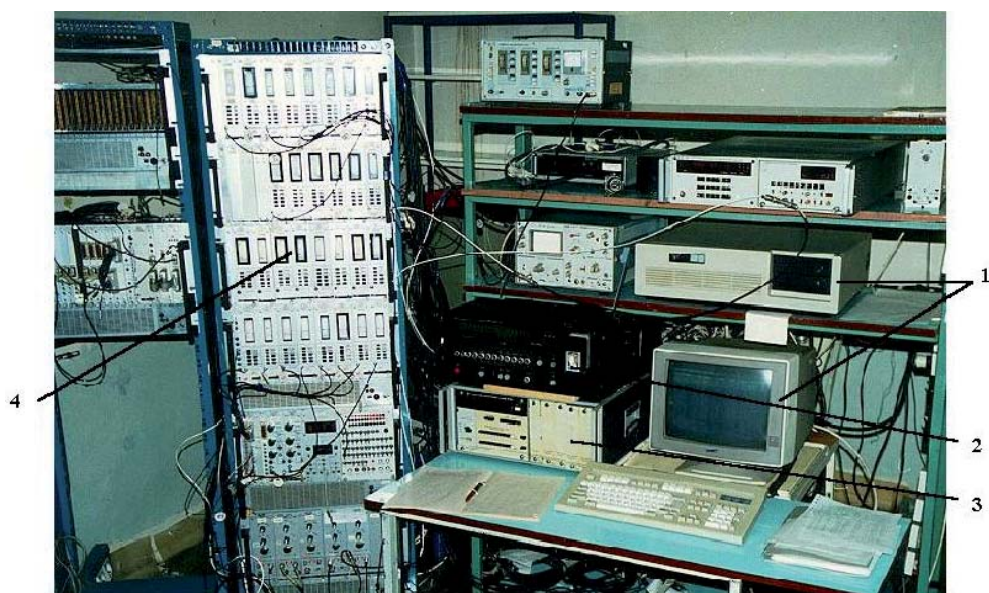


Рис. 2. Пульт управления системой «Финиш» (в начале 90-х годов): 1 — системная ЭВМ; 2 — измерительно-вычислительный комплекс К-537; 3 — дополнительный коммутатор каналов Ф-799; 4 — аппаратура предварительной обработки импульсных сигналов, КАМАК

ряли величину потока нейтронов. Рядом с ними помещались детекторы мощности дозы гамма-излучения, температуры и тепловых потоков. Показания этих детекторов выводились на центральный пульт и длительное время (месяцы) анализировались. Убедившись в исправности и информативности канала, который состоял из следующих частей:

*СИСТЕМА ПИТАНИЯ → ДЕТЕКТОР → ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ →
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЙ ШКАФ → КАБЕЛЬНЫЕ КОММУНИКАЦИИ →
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ПУЛЬТ,*

его переводили в режим стационарного измерения, и он официально входил в ИИС «Финиш».

Каналы системы позволяли осуществлять реальный контроль состояния топливосодержащих материалов.

В первое время они рассматривались как чисто исследовательские и вводились в строй без соответствующей проектной документации и аттестации. В результате, в начале 90-х годов для использования этих каналов в штатном режиме пришлось дополнительно провести значительный комплекс работ.

Сбор и первоначальная обработка информации, поступающей от системы «Финиш» осуществлялась на пульте, установленном в одном из очищенных и оборудованных помещений деаэрационной этажерки 4-го блока (помещение Г359). Затем информация передавалась в лабораторный корпус в г. Чернобыль

Главная задача, которая ставилась перед системой «Финиш», состояла в наблюдении за состоянием ядерной безопасности (подкритичности) отдельных скоплений ТСМ по нейтронному потоку (Φ_n) и другим параметрам (МЭД гамма-излучения, температуре, тепловым потокам).

На рост эффективного коэффициента размножения нейтронов ($K_{\text{эф}}$) в скоплении ТСМ указывает, прежде всего, увеличение исходящих от него нейтронных потоков — $\Phi_{\text{н}}$ ¹.

К сожалению, абсолютные значения $\Phi_{\text{н}}$, регистрируемые вблизи такого скопления не несут необходимой количественной информации о величине его подкритичности².

Причина этого состоит, прежде всего, в том в том, что реальная геометрия источник-приемник и состав материалов разделяющих их неизвестны. Поэтому гораздо более информативной является динамика относительных изменений $\Phi_{\text{н}}$, отклонение их величины от устойчивых (среднегодовых и/или среднесезонных) значений.

В этом отношении показательно «аномальное нейтронное событие» (см. раздел 8.3.1.), зарегистрированное ИСС «Финиш» в 1990 г.

Для иллюстрации этого мы еще раз приведем график роста потока нейтронов, который наблюдался 29–30 июня детектором системы «Финиш», установленном в скважине 3.10.Г в пом. 304/3 (см. рис. 3).

В ходе этого события величина регистрируемого нейтронного потока возросла в 60 раз (!) по сравнению со средне-сезонной скоростью.

Что касается величин МЭД, температуры и тепловых потоков, то детекторы (при существующем их расположении в «Укрытии» — на периферии то-

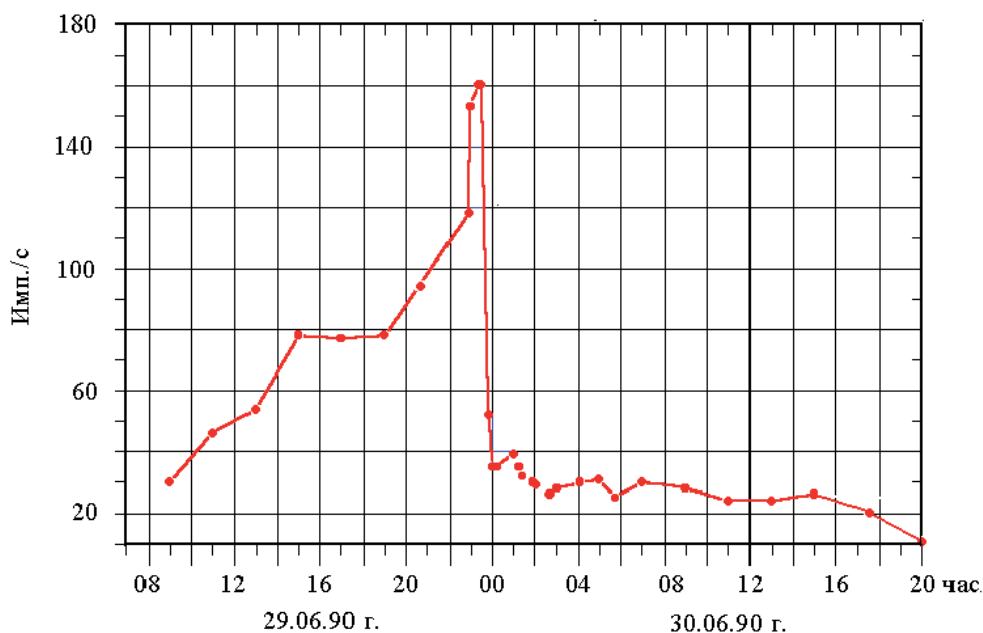


Рис. 3. Временная зависимость счета 50 канала системы «Финиш» (скважина 3.10.Г) 29 и 30 июня 1990 г.

¹Нейтронная активность для ТСМ в стабильном подкритическом состоянии мала и определяется в основном нейтронами спонтанного деления ^{244}Cm ($T_{\alpha} = 18$ лет) (см. раздел 4.3.1). Опыт эксплуатации системы «Финиш» показал, что естественный годовой спад активности выражается незначительным ($\leq 3\%$) трендом на понижение.

²В разделе 4.3.7 уже говорилось о том, что с помощью «пассивных» нейтронных методов — измерением потока нейтронов, удалось только оценить верхнюю границу $K_{\text{эф}}$.

пливных скоплений) способны регистрировать увеличение значения $K_{эф}$ только когда этот коэффициент становится близким к 1³.

Насколько оперативным может быть слежение за подкритичностью скоплений ТСМ в обычных условиях объекта с помощью регистрации нейтронных потоков?

Некоторые оценки этого, основанные на опыте наблюдения за «аномальными нейтронными событиями» 1990 и 1996 гг., были сделаны в работе [4].

«Предположим, что скопление ТСМ находится в глубоко подкритическом состоянии с эффективным коэффициентом размножения $K_{эф} \approx 0,35^4$ т.е. с запасом отрицательной реактивности ($\delta K_{эф} = 1 - K_{эф}$) порядка 100β ($\beta = 0,0065$).

В объем ТСМ положительная реактивность может вводиться за счет эффектов гетерогенности, когда при поступлении воды происходит смачивание и/или заполнение трещин капилляров и полостей. Источники поступления (атмосферные осадки, конденсационная влага) и маршруты миграции воды на IV блоке дают основание полагать, что скорость $dK_{эф}/dt$ самопроизвольного введения реактивности будет незначительной.

В результате поступления воды ТСМ может вести себя как размножитель нейтронов с коэффициентом размножения $1/\delta K_{эф}$.

При подходе к критичности ($\delta K_{эф} \rightarrow 0$), скорость счета $n(t)$ в канале будет неограниченно возрастать.

Скорость нарастания счета dn/dt определяется скоростью ввода реактивности $dK_{эф}/dt$ и текущим уровнем подкритичности $\delta K_{эф}$ как $dn/dt \approx [1/\delta K_{эф}^2] (dK_{эф}/dt)$.

Из этого следует, что при средней скорости ввода реактивности $dK_{эф}/dt \approx 10^{-3}$ β /сек. в подкритическую систему с начальной подкритичностью $\delta K_{эф} \sim 100\beta$ ($K_{эф} \approx 0,35$), **время достижения аварийного значения подкритичности $\delta K_{эф} = 3\beta$ ($K_{эф} = 0,98$) будет составлять десятки часов**.

За это время могут быть приняты соответствующие контрмеры (например, введение нейтронного поглотителя, как и было сделано в 1990г.).

9.2. Совершенствование систем контроля ТСМ

После своего создания «Финиш» постоянно совершенствовался⁵.

В 1992 г. была проведена метрологическая аттестация 20 исследовательских каналов и система получила «Свидетельство о государственной метрологической аттестации № 430/2015-01».

В нем отмечалось, что ИИС «Финиш» с каналами измерения — **нейтронного потока, мощности экспозиционной дозы гамма-излучения, температуры, теплового потока и подсистемой коммутирующей и регистрирующей аппаратуры**

³Пока $K_{эф}$ не приблизится к 1, интенсивность гамма-излучения от процессов деления остается на порядки ниже уровня регистрируемого вблизи скоплений ТСМ остаточного излучения топлива. То же касается и температуры — динамике этого параметра мешает проявиться остаточное тепловыделение топлива.

⁴См. раздел 4.3.7.

⁵Здесь определяющую роль сыграл коллектив специалистов КИ и ОЯРБ, работавших под руководством Г.В. Яковлева и Е.Д. Высоцкого.

на основании метрологической аттестации допущена к применению для контроля за изменениями потока нейтронов, мощности экспозиционной дозы гамма-излучения и температуры ТСМ во внутренних помещениях объекта «Укрытие».

В 1993 г. 20 аттестованных каналов были приняты в опытно-промышленную эксплуатацию.

В 1995 г. после прохождения необходимой аттестации наиболее информативные каналы системы стали использоваться в штатном режиме.

В декабре 1998 г., из состава исследовательской системы «Финиш», был выделен самостоятельный комплекс технических средств для обеспечения регламентного контроля состояния подкритичности ТСМ, получивший название «Финиш-Р»⁶.

В 2000 г. комплекс «Финиш-Р» был полностью аттестован Харьковским государственным НИИ метрологии (ХГНИИМ) и получил свидетельство о государственной метрологической аттестации № 115 от 31.03.2000 г.

Параллельно с усовершенствованием «Финиша» МНТЦ и ЧАЭС создавались и другие системы контроля ТСМ – «Сигнал»⁷ и «Пилот»⁸. Поскольку КИ практически не вел эти работы, мы не будем на них более подробно останавливаться.

К моменту выпуска второй редакции «Анализа ...» (2001 г.) осуществлялся контроль ядерно-физических и тепловых параметров следующих крупных скоплений ТСМ, находящихся в «Укрытии» (см. рис. 4–7):

⁶Согласно «Технологическому регламенту» режим работы ИИС «Финиш-Р» был периодический, он работал 2 раза за смену.

⁷Первая очередь система контроля ТСМ «Сигнал» была сдана в опытную эксплуатацию в конце 1994 г. Она состояла из четырех каналов контроля и вторичной измерительной аппаратуры. Подсистема позволяла измерять величины плотностей нейтронных потоков, МЭД гамма-излучения и температуры в местах установки датчиков. В 1995 г. количество каналов контроля плотности нейтронного потока и МЭД было увеличено еще на шестнадцать. Дополнительные каналы были установлены в ЦЗ с трубного наката кровли объекта «Укрытие» через технологические люки. С 1998 г. подсистема была введена в опытно-промышленную эксплуатацию. Целью опытно-промышленной эксплуатации было подтверждение работоспособности системы в условиях объекта «Укрытие». После устранения выявленных недостатков в 2000 г. система была переведена в режим штатной эксплуатации [2]. В дальнейшем предполагалось, что системы «Финиш-Р» и «Сигнал» войдут в единую систему контроля ядерной безопасности (СКЯБ), которая в свою очередь станет частью интегрированной автоматизированной системы контроля (ИАСК), находящихся на объекте «Укрытие» источников ядерной, радиационной и общетехнической опасности (см. ниже).

⁸Экспериментальная система наблюдения за ядерной безопасностью «Пилот» предназначалась для измерения нейтронного потока, МЭД и температуры в местах установки блоков датчиков на 4-м блоке ЧАЭС с целью разработки технических решений для проектирования штатной системы мониторинга (в рамках 12 задачи проекта SIP) по результатам опытной эксплуатации. Система была разработана и изготовлена «Тихоокеанской северо-западной национальной лабораторией» США, установлена и введена в эксплуатацию на объекте «Укрытие» в конце 1998 г. Двухгодичная эксплуатация «Пилота», в условиях объекта «Укрытие» показала, что многие технические решения себя не оправдали, надежность всей системы и отдельных измерительных каналов недостаточна. Система достаточно сложна в эксплуатации, отсутствует ее обеспечение запасными частями. От использования «Пилота» в штатном режиме пришлось отказаться.

- лавообразных ТСМ «вертикального потока» в пом. 305/2 и пом. 210/7 (ПРК);
- лавообразных ТСМ «горизонтального потока» в пом. 304/3;
- ТСМ в пом. 914/2 (ЦЗ) и на уцелевшей части схемы «ОР» (РП);
- отработавшего топлива в ЮБВ.

При этом каждое скопление ТСМ рассматривалось как отдельный объект наблюдения, являющийся обособленным источником ядерной и радиационной опасности.

ИИС «Финиш» использовалась в качестве «испытательного полигона» и «горячего резерва» для комплекса «Финиш-Р» (на рис. 4–7 «Финиш-И»).

В дальнейшем планировалось провести реконструкцию системы «Финиш-Р». Эта реконструкция преследовала своей целью повысить информативность и надежность контроля за ТСМ [4, 5], в том числе:

- расширить рабочий диапазон измерений нейтронной и гамма-активности при использовании камер деления;
- исследовать температурно-влажностный режим, при котором скопления ТСМ находятся в объекте;
- исследовать функции отклика нейтронных детекторов в реальной штатной геометрии источник — приемник;
- отработать методики контроля над сохранением измерительных характеристик каналов в условиях отсутствия доступа к детекторам;
- отработать целый ряд методических приемов и технических элементов, которые предполагалось в дальнейшем использовать в штатных системах мониторинга ТСМ.

• В августе 1999 г. был разработан проект «Реконструкция комплекса технических средств контроля делящихся ядерно-опасных материалов «Финиш-Р».

Однако, реализация этого проекта была отложена, т.к. стратегией преобразования объекта «Укрытие» [6] и планом осуществления мероприятий на объекте «Укрытие» SIP [7] было предусмотрено создание интегрированной автоматизированной системы контроля (ИАСК), находящихся на объекте «Укрытие» источников ядерной, радиационной и общетехнической опасности.

В ноябре 2001 г. ГСП ЧАЭС приняло решение о разработке и создании ИАСК [8].

Одной из подсистем контроля ИАСК должна была стать система контроля ядерной безопасности (СКЯБ), которой предстояло включить в себя действующие системы контроля ИИС «Финиш-Р» и СК ТСМ «Сигнал» [9–11]⁹.

9.3. Структурная схема ИИС «Финиш»

Для того чтобы дать представление о структуре систем контроля за ТСМ, работавших в первое десятилетие после аварии на объекте «Укрытие». на рис. 8 приводится структурная схема исследовательской системы «Финиш».

⁹См. часть 4 настоящей работы.

▲ Пилот

■ Финиш-Р

№ пом.	№ канала	Параметр	Координаты
210/6	БД2	п. у. т. ф	отм. 6.0 И-К, 46-47
210/6	БД5	п. у. т. ф	отм. 6.0 И-К, 46-47
210/7	БД3	п. у. т. ф	отм. 6.0 И-К, 47-48

● Сигнал

№ пом.	№ канала	Параметр	Координаты
210/6	1, 2, 3, 4	п. у. т	отм. 6.0 И+1.5, 47-04

№ пом.	№ канала	Параметр	Координаты
210/6	27	t	отм. 8.0 И-2.0, 46+3.0
210/7	5	n	отм. 6.5 К-1.0, 48-3.0
210/6	26	t	отм. 8.0 И-2.0, 46+1.7
210/5	25	t	отм. 8.0 И-2.0, 45+3.0
012/15	29	t	отм. 5.4 Л+1.7, 47+2.0

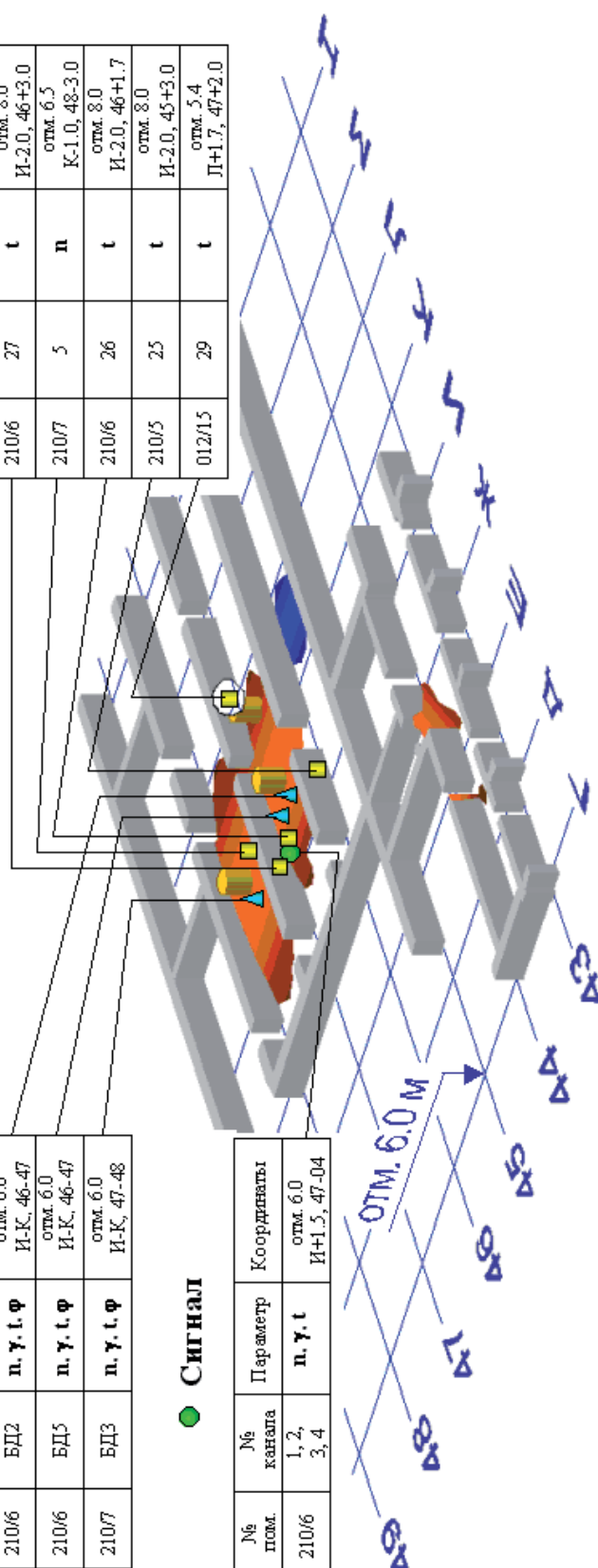


Рис. 4. Расположение датчиков систем контроля ТСМ «Укрытие» в помещениях на отметке +6.000

◆ Финиш-И

№ пом.	№ канала	Параметр	Координаты
304/3	46, 56	п. у	отм. 9.7 И-1.2, 46+3.0
305/2 - 304/3	45, 55	п. у	отм. 8.8 И-0.8, 46+3.0
305/2	40, 42	п. у	отм. 12.0 И-1.2, 46+2.6
305/2	50, 52	п. у	отм. 9.1 К, 47-1.0

▲ Пилот

№ пом.	№ канала	Параметр	Координаты
308/2	БД6	п. у, т. ф	отм. 9.0 Л. 45
305/2	БД7	п. у, т. ф	отм. 9.0 Л-07, 47
305/2	БД1	п. у, т. ф	отм. 9.0 И-К, 45+3.0
305/2	БД8	п. у, т. ф	отм. 9.0 И-К, 45+3.0
304/3	БД4	п. у, т. ф	отм. 12.0 И, 45+1.4

■ Финиш-Р

№ пом.	№ канала	Параметр	Координаты
305/2	21	т	отм. 8.8 К+2.2, 45+2.7
305/2	1	п	отм. 12.7 К+3.2, 46+1.2
305/2	13, 23	у, т	отм. 12.0 К-3.0, 46+2.8
304/3	4	п	отм. 12.0 И-3.0, 46+1.7
305/2 - 304/3	3	п	отм. 9.0 И-0.6, 46+3.8
305/2	2	п	отм. 12.0 И+0.8, 46+0.1
305/2	22	т	отм. 8.8 К-2.0, 47-1.3

● Сигнал

№ пом.	№ канала	Параметр	Координаты
305/2	9, 10, 11, 12	п. у, т	отм. 9.1 К-1.0, 47+2.5
304/3	5, 6, 7, 8	п. у, т	отм. 9.7 И-2.0, 47-1.5

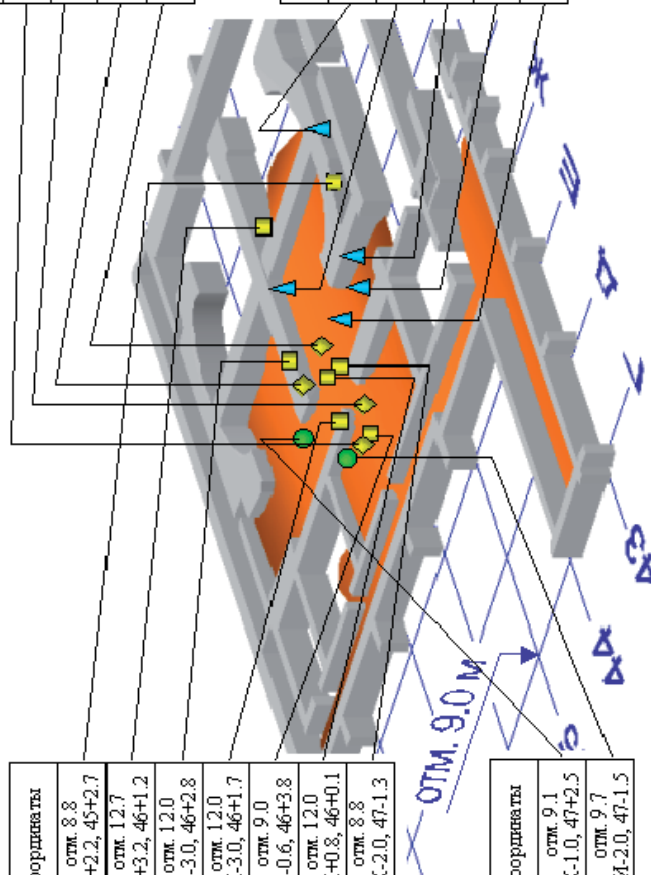


Рис. 5. Расположение датчиков систем контроля ТСМ «Укрытия» на отметке +9.000

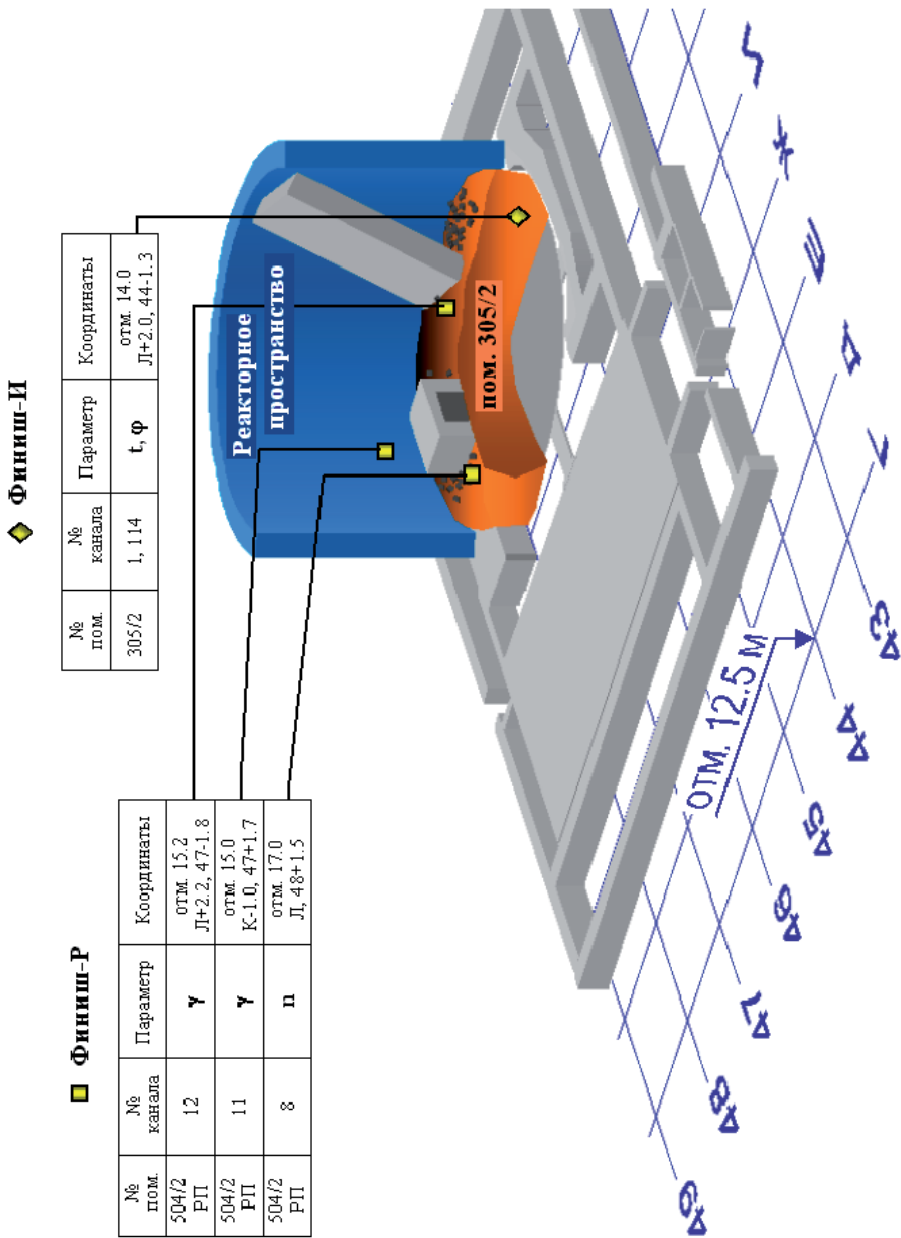


Рис. 6. Расположение датчиков систем контроля ТСМ «Укрытия» в реакторном пространстве и в помещении 305/2

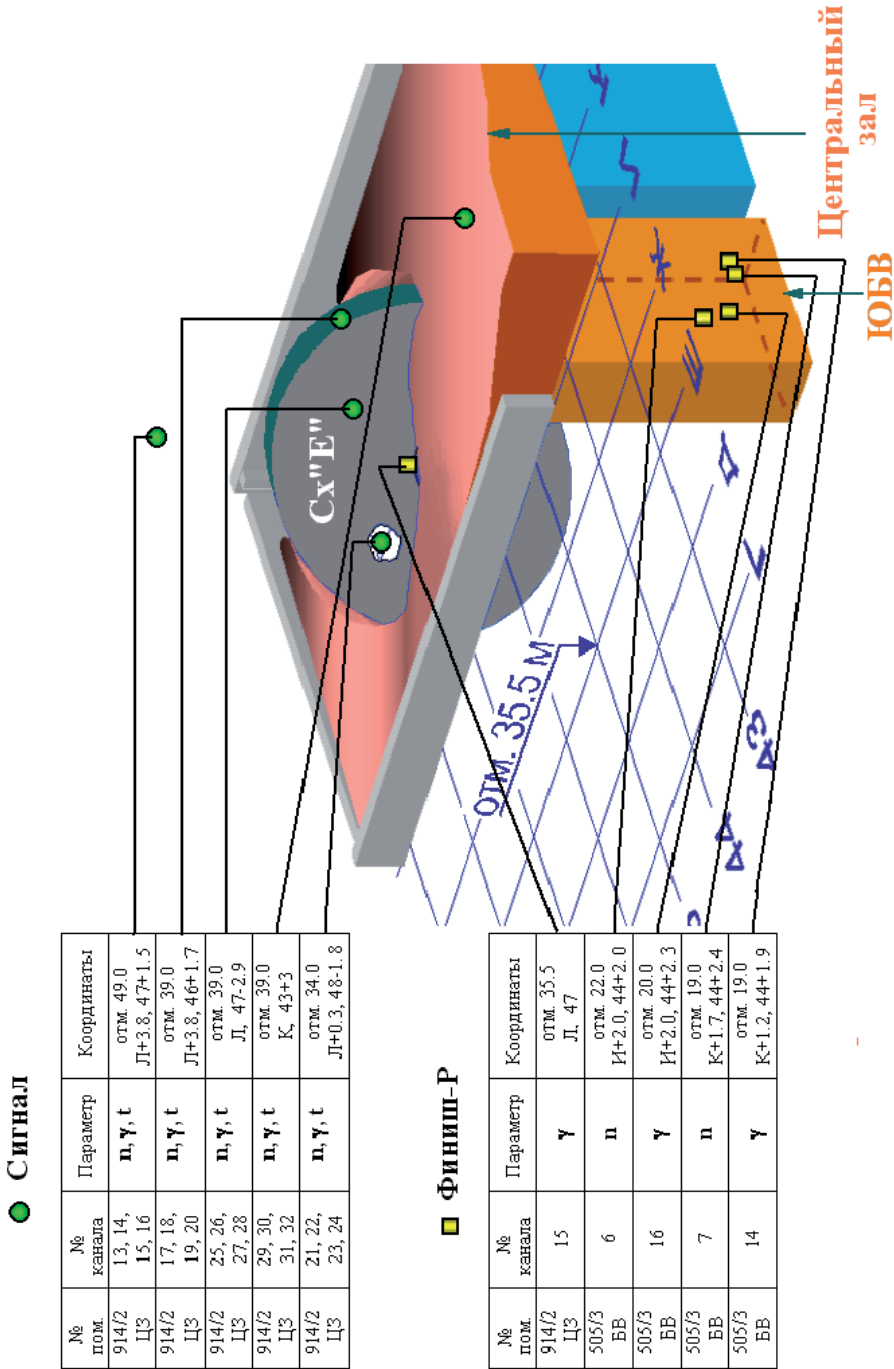


Рис. 7. Расположение датчиков систем контроля ТСМ «Укрытия» на верхних отметках объекта

В состав канала входит блок *интенсиметра 1301А*, осуществляющий преобразование импульсного сигнала от датчика РД в аналоговый сигнал, поступающий на вход ИВК К-537 для его последующей обработки и измерения. Блок 1301А позволяет автономно измерять уровень входного сигнала с помощью встроенного стрелочного прибора.

Канал измерения МЭД на базе камеры *КНК-15* не требует дополнительных преобразований, токовый сигнал с выхода БН поступает непосредственно для обработки и измерения на ИВК К-537.

Набор каналов измерения температуры, состоит из датчиков, кабельных коммуникаций и коробок холодных спаев.

Температура внутри коробки холодных спаев контролируется термометром сопротивления ТП 018-04. Каналы подключены к ИВК К-537 для последующего измерения и обработки электрических величин.

ИТВ-4 – канал измерения влажности и температуры¹¹.

Блок датчика ИТВ-4 состоит из гигрочувствительного элемента емкостного типа и платинового термометра сопротивления, помещенных в свинцовый экран.

Такая конструкция позволяет работать датчику в полях с МЭД до 3000 Р/ч.

Нормирующий преобразователь – *НП*, расположенный в помещении 318/3, принимает сигналы от блока датчиков и преобразует их в биполярный токовый сигнал, пропорциональный влажности воздуха. Сигнал от термометра сопротивлений, без преобразования, вместе с токовым сигналом, через кабельную систему подается для измерения на ИВК К-537.

Измерительно-вычислительный комплекс *ИВК К-537* – устройство групповой коммутации и измерения, на которое поступают типовые аналоговые сигналы с каналов детектирования нейтронов, датчиков МЭД и температуры.

Коммутация и первичная обработка результатов измерений, связанная с масштабированием, линеаризацией и преобразованием в физическую величину, проводится по каждому каналу отдельно в соответствии с заданными системной ЭВМ параметрами обработки.

Сформированный в результате измерения массив данных (кадр), запоминается в ИВК и передается в системную ЭВМ через параллельный интерфейсный канал.

Управляющую функцию и базу данных системы образуют две ЭВМ, связанные между собой через телефонный канал и модемы. Управляющая ЭВМ была размещена непосредственно в объекте «Укрытие», а вторая ЭВМ, выполняющая функции сервера базы данных и архива базы данных информационно-измерительной системы «Финиш», находилась в Чернобыле в ОЯРБ.

¹¹Датчик установлен в скважину В-13-106 в 1998 г., и контролирует влажность воздуха в помещении 305/2.

Его технические характеристики:

диапазон измерения относительной влажности воздуха, % – (0–100);

пределы погрешности измерения относительной влажности воздуха, % – $\pm 4,0$;

диапазон измерения температуры воздуха, °С – от –40 до +50;

пределы погрешности измерения температуры воздуха, °С – $\pm 0,3$;

диапазон рабочих температур измерения относительной влажности воздуха, °С – от –20 до 50.

Операторы системы «Финиш» проводили сеансы измерений дважды в смену (рис. 9). При необходимости вводился режим непрерывных измерений.

Ориентиром для принятия решений по изменениям параметров состояния ТСМ являлась утвержденная таблица параметров регламентного контроля, где были приведены:

- контрольный уровень-сигнал **«Внимание»**;
- критический уровень-сигнал **«Опасно»**.

Ежегодно они корректировались на основании среднегодовых показаний за предыдущий год.

9.4. Анализ результатов измерений, полученных с помощью системы «Финиш» (на примере 1997 г.)

Такой анализ проводился постоянно и с его помощью отслеживались любые изменения поведения ТСМ, которые могли повлиять на безопасность объекта «Укрытие».

Именно он позволил на ранней стадии обратить внимание на (сначала медленное) увеличение нейтронного потока регистрируемого 50 каналом системы «Финиш» 29 июня 1990 г. («аномальное нейтронное событие»).

Как видно из раздела 8.4 исследователи не могли и в дальнейшем исключить уменьшения подкритичности в некоторых скоплениях ТСМ в пом. 305/2.

Детальный анализ данных стал особенно актуальным, после того, как в 1997–2002гг. в печати появились довольно многочисленные работы (см., например, [12–14]), в которых говорилось о возможности близкого по времени (через три — четыре года) и стремительного (недели) превращения всех 1200 т чернобыльской лавы под действием собственной α -активности в субмикрон-

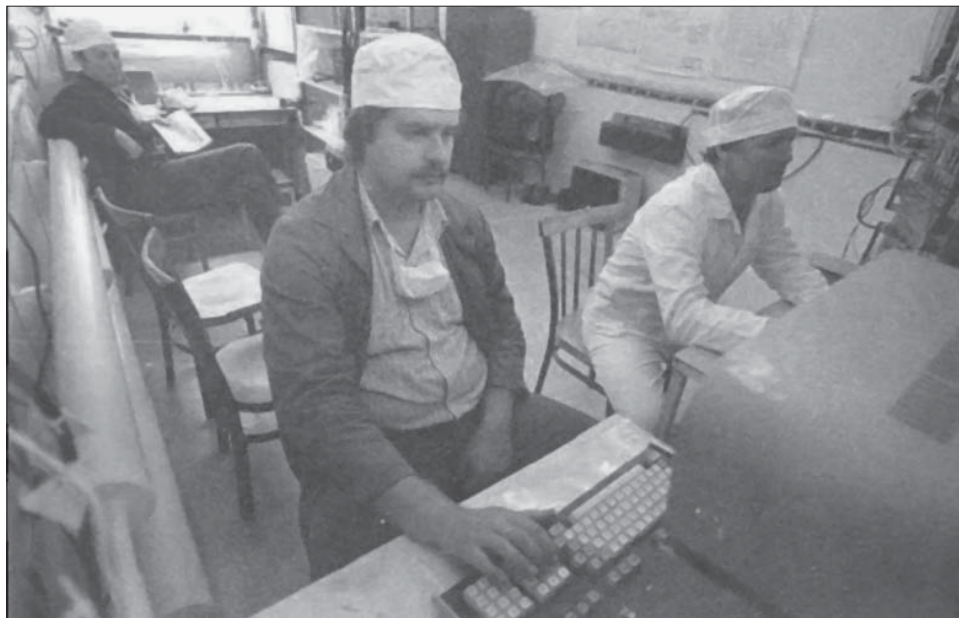


Рис. 9. Сотрудники КЭ за пультом управления системы «Финиш»

ную (!) пыль. С «катастрофическими радиоэкологическими последствиями» (слова авторов)¹².

Для иллюстрации методов проведения такого анализа мы воспользуемся результатами «обычного» года — 1997 г. (см. рис. 10–13), когда из системы «Финиш», проработавшей уже почти десятилетие, еще не была окончательно выделена система «Финиш-Р».

В 1997 г. текущую информацию обеспечивали 59 каналов.

Из них 22 канала (8 — нейтронных, 6 — МЭД и 8 — температуры) регламентного контроля ТСМ с размещением датчиков:

- в центральном зале (МЭД — 1 ед.);
- в реакторном пространстве (нейтроны — 1, МЭД — 2);
- в пом. 305/2 (нейтроны — 2, МЭД — 1, температура — 3);
- в пом. 304/3 (нейтроны — 3);
- в парораспределительном коридоре пом. 210/5,6,7 (нейтроны — 1, температура — 3);
- в бассейне выдержки (нейтроны — 1, МЭД — 2);
- ББ (температура — 2).

37 каналов использовались для наблюдений температурного режима по периферии основных скоплений ТСМ.

53 температурных канала находились в ждущем режиме и могли быть иницированы при исследовании аномальных ситуаций.

Полная информационная мощность системы была рассчитана на подключение до 163 каналов с типовыми аналоговыми сигналами

Анализ информации, поступающей от системы «Финиш» начинался с отбраковки недостоверных показаний, вызванных влиянием внешних и техногенных факторов.

К последним обычно относились:

- подвижка детектора относительно источника (угловая и/или линейная);
- экранирование детектора;
- изменение коэффициента усиления предусилителя канала;
- изменение порога селекции;
- изменение высоковольтного напряжения питания детектора;
- утечка и пробой в блоке детектирования;
- электромагнитные наводки;
- отказ элементов измерительного канала.

После этого восстанавливалась реальная динамика параметров ТСМ.

В рамках такого восстановления были выполнены приводимые ниже графики (рис. 10–13).

¹²Под «катастрофическими последствиями» подразумевалось, прежде всего, то, что появление в помещениях «Укрытия» огромного количества мелкодисперсной легкоподвижной пыли должно было привести к ее массовому выбросу в окружающую среду через оставшиеся в объекте щели. Кроме того все прежде доступные помещения «Укрытия» оказались бы загрязнены и стали недоступными для проведения работ.

Надо сказать, что с самого начала специалисты КИ указывали на необоснованность таких предсказаний. Долгое время вопрос оставался дискуссионным, пока на основании совместных исследований КИ и ИПБ АЭС гипотеза не была окончательно отвергнута.

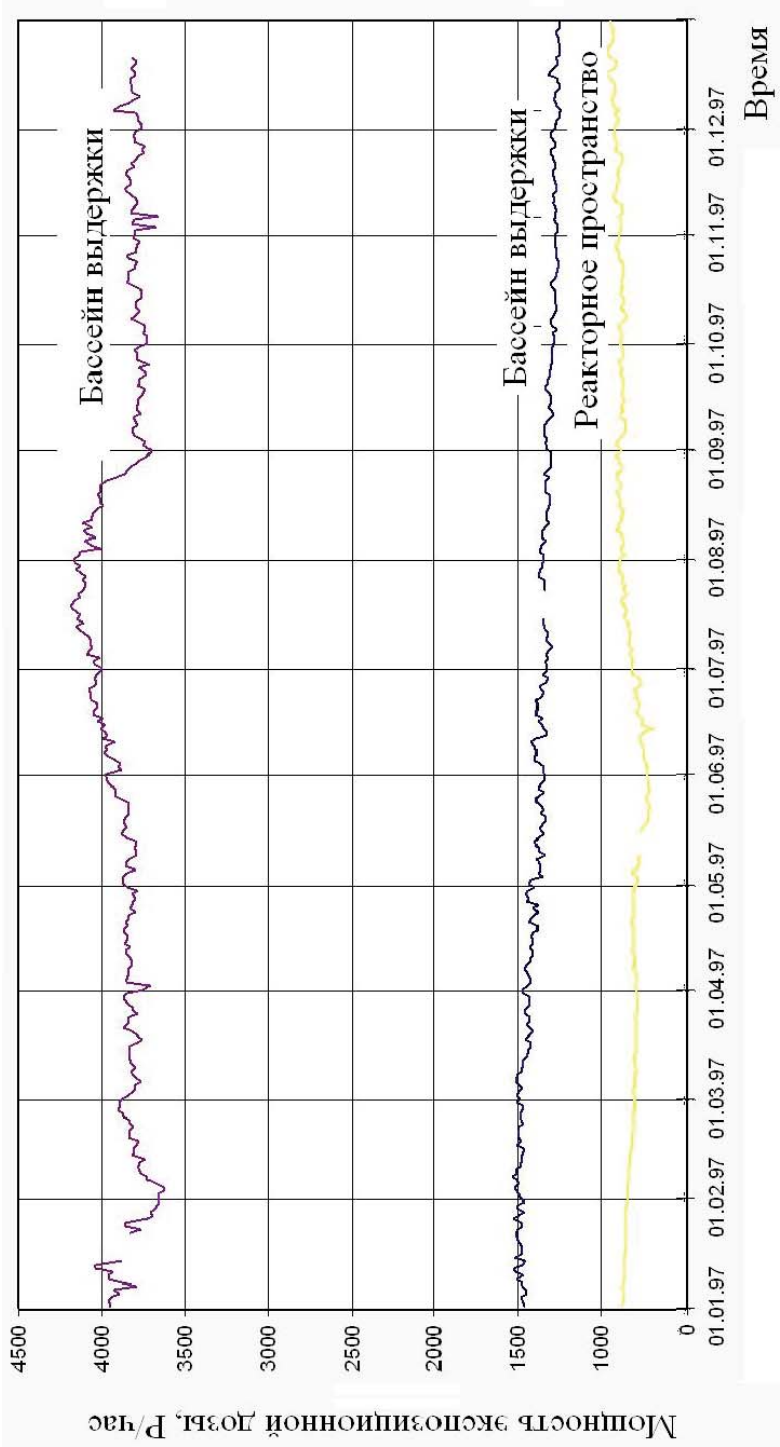


Рис. 10. Динамика МЭД за 1997 г.

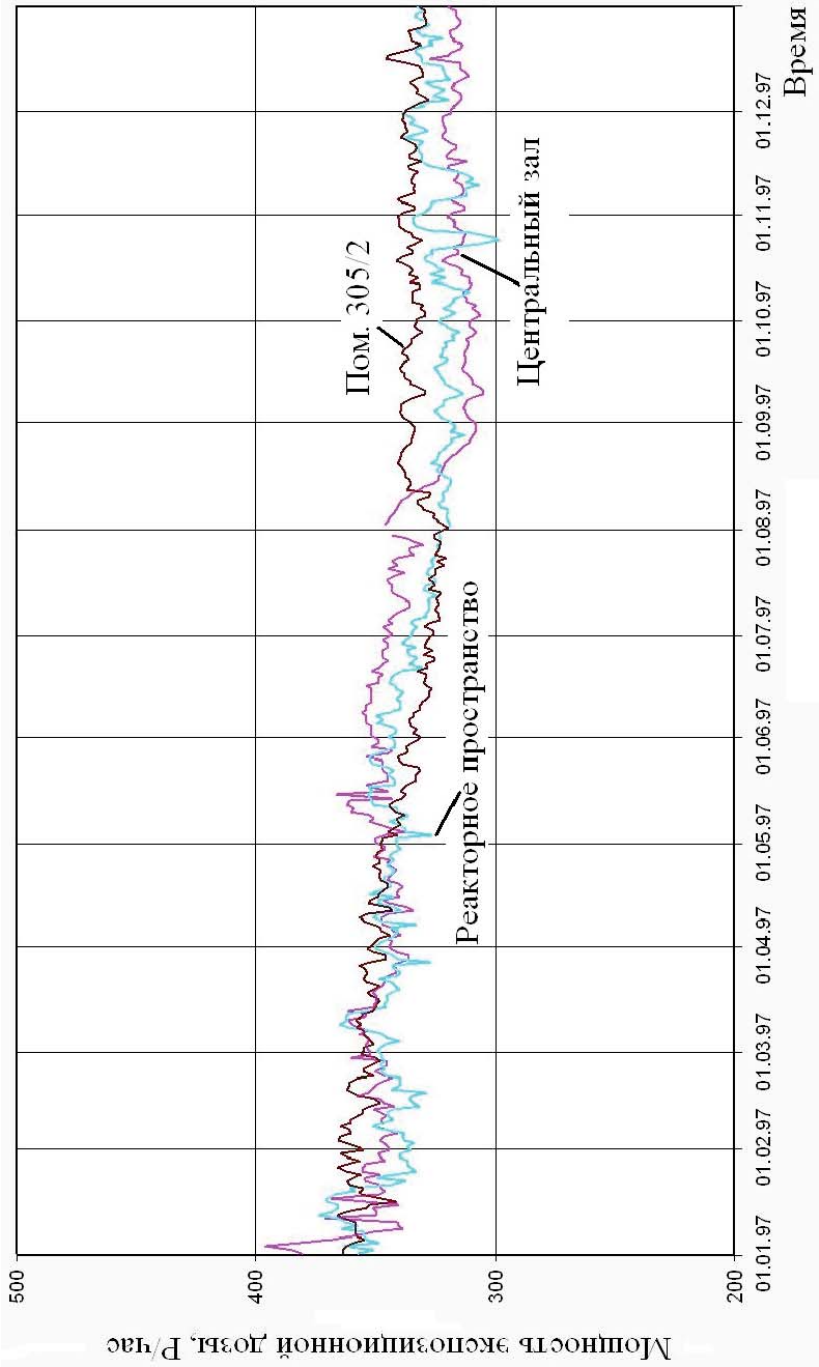


Рис. 11. Динамика МЭД за 1997 г.

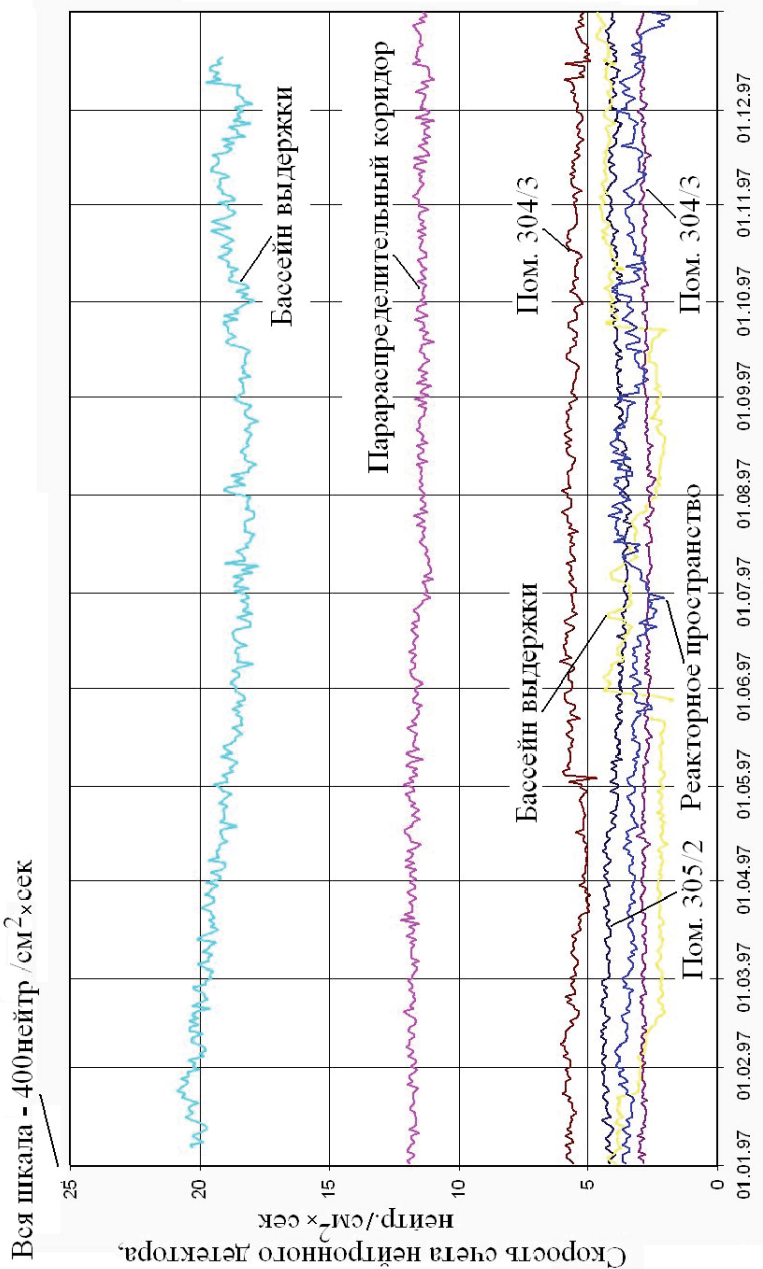


Рис. 12. Динамика нейтронной активности за 1997 г.

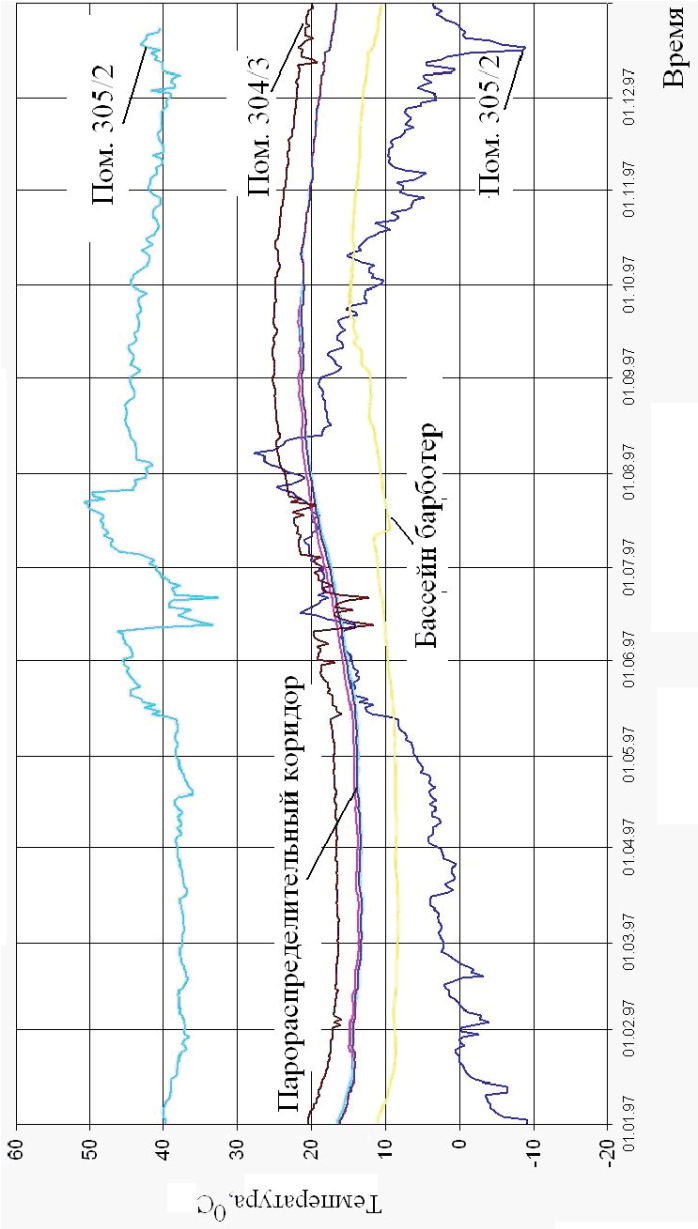


Рис. 13. Динамика температурного режима за 1997 г.

Они прошли этапы машинного и экспертного анализа и из них были исключены аномалии, связанные с метрологическими отказами и аппаратурными сбоями.

Окончательные результаты годовых наблюдений совпали с результатами расчетного моделирования процессов протекающих в ТСМ.

Годовой спад нейтронной активности выражается (см. рис. 12) незначительным (1–3)% трендом на понижение.

Гамма — активность (рис. 10 и 11) определяется на 90% мощностью дозы, которую дают изотопы ^{137}Cs и ^{134}Cs .

Температура в центральном зале и в реакторном пространстве колеблется в соответствии с наружной температурой (рис. 13).

Температура в пом. 305/2 и 304/3 (рис. 13) определяется температурой ТСМ и незначительно коррелирует с наружной. Максимальная температура 40° регистрируется на отметке. +9.100 в нижней плите перекрытия пом. 305/2.

В отчете [4] отмечается, что отказы в работе системы «Финиш» носят локальный (отдельные каналы) характер и все они связаны с нарушением контактных соединений в кабельных коммуникациях и потерей работоспособности детекторов и датчиков, выработавших свой ресурс. Это подтверждают и наблюдения, сделанные на протяжении более длительного срока¹³.

Время по восстановлению работоспособности канала составляло в среднем от двух до трех суток.

Здесь следует отметить, что выбор детекторов, их долговременные предварительные испытания, испытания всех элементов каналов «Финиша», жесткий контроль монтажа, предварительного (проводимого в лабораториях) и окончательного (он проводился в помещениях объекта), необходимое техническое обслуживание — сделали возможным надежную многолетнюю работу этой системы в тяжелейших условиях «Укрытия».

Окончательный вывод, сделанный в годовом отчете 1997 г. о работе системы, следующий:

«Динамика поведения параметров носит устойчивый и предсказуемый характер с незначительными сезонными колебаниями около среднегодовой составляющей».

Этот вывод исключает возможность массового разрушения скоплений ТСМ в течение этого года («превращения их в субмикронную пыль»), на возможность которого указывалось в работах [12–14].

В заключение отметим, что система «Финиш» и созданные на ее основе дочерние системы позволили в течение прошедших десятилетий постоянно и

¹³Так, например, летом 1993 г. в связи с большим количеством воды в объекте «Укрытие» постоянное электропитание в его помещениях было выключено из-за соображений электробезопасности. И хотя система «Финиш» продолжала свою работу (ее электропитание осуществлялось от независимого источника), постоянная высокая влажность и невозможность ремонта привели к выходу из строя части каналов. Только благодаря усилиям сотрудников ОЯРБ удалось восстановить систему в полном объеме.

Большое число отказов в 1994 г. было обусловлено повреждением части кабелей ИИС «Финиш» при проведении ремонтных работ на объекте. Это привело к одновременному выходу из строя четырех нейтронных каналов и четырех гамма — каналов. Они были восстановлены в кратчайшие сроки.

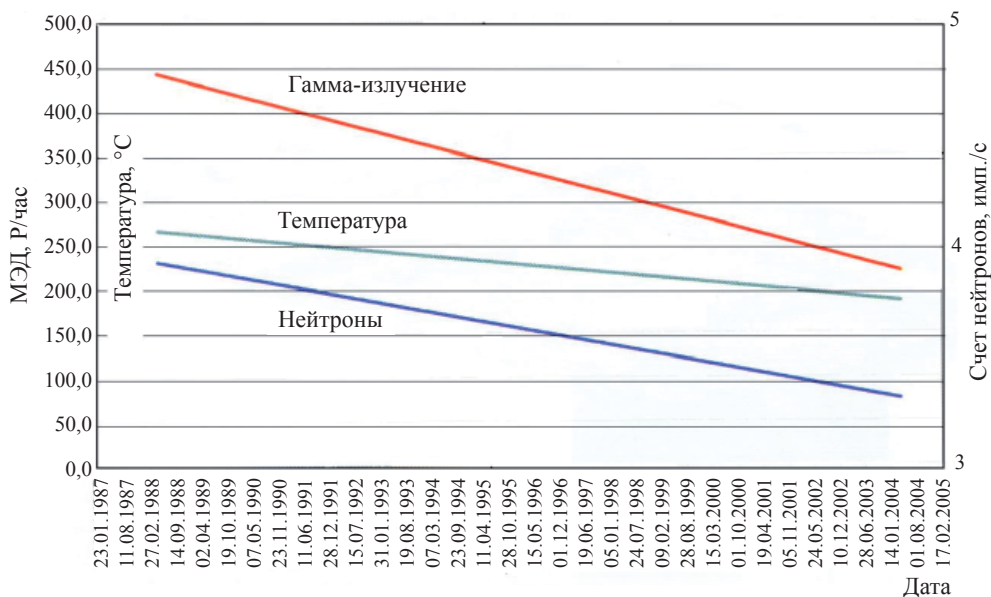


Рис. 14. Усредненные годовые тренды температуры, нейтронной и гамма активности в подаппаратном пом. 305/2

эффективно осуществлять контроль за ядерной и радиационной безопасностью «Укрытия».

Накопленная информация сыграла важную роль при подготовке документов по возможности преобразования объекта в экологически безопасное состояние.

В качестве иллюстрации многолетней работы систем диагностики «Укрытия» ниже приводятся данные, взятые из Национального доклада Украины и полученные, в основном, с помощью «Финиша» (см. рис. 14 и [15]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оперативный контроль и диагностика состояния объекта «Укрытие» в период от 01.01.87 г. до 28.04.87 г. Отчет ОГ КИ, Чернобыль, 1987 г., 27 с.
2. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отв. исполнитель Боровой А.А., Отчет МНТЦ «Укрытие», № 3836, 2001 г. Чернобыль.
3. Боровой А.А., Высотский Е.Д., Иванов А.И., Иванов И.Е., Шевченко В.Г., Яковлев Г.В. Система контроля ТСМ объекта «Укрытие» «Финиш». В сборнике «Объект «Укрытие» — 10 лет», основные результаты научных исследований», Национальная Академия Наук Украины, Чернобыль 1996 г., стр. 128–139.
4. Высотский Е.Д., Шевченко В.Г., Иванов В.Е., Шевченко В.В. Регламентная эксплуатация и развитие системы «Финиш». Отчет МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 1998 г., 20 с.
5. Боровой А.А., Высоцкий Е.П., Шевченко В.Г. и др. Реконструкция системы «Финиш» под обеспечение регламентных измерений физических параметров ядерно-опасных делящихся материалов объекта «Укрытие». Сборник «Проблемы Чернобыля», вып. 3, Чернобыль, 1998, с. 114–116.

6. Стратегия преобразования объекта «Укрытие», согласованная решением Межведомственной Комиссии по вопросам комплексного решения проблем ЧАЭС. Протокол № 2 от 12.03.2001 г.
7. The EC-Tacis Nuclear Safety Program and the US-DoE-INSP-Program: Chernobyl Unit 4 – Shelter Implementation Plan, 1997, p. 232.
8. Техническое решение № 3/01-ОУ. О разработке интегрированной автоматизированной системы контроля объекта «Укрытие», 2000 г.
9. Интегрированная автоматизированная система контроля. Проектные основы. D1. NUTECO-03-DBP-001 2002 г.
10. ИАСК ОУ. Оценка безопасности, IAMS-OVER-ZS-1101, 2005 г.
11. ИАСК. Технический проект. Пояснительная записка. IAMS-OVER-ZS-1103, 2005 г.
12. Барьяхтар В.Г., Гончар В.В., Жидков А.В., Ключников А.А. Радиационные повреждения в лавообразных топливосодержащих материалах объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие» № 98-12, 1998, 23 с.
13. Жидков А.В. Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния. В сб.: Проблемы Чернобыля, 2001, вып. 7, с. 23–40.
14. Baryakhtar V., Gonchar V., Zhidkov A., Zhidkov V. Radiation damages and self – sputtering of high radioactive dielectrics: spontaneous emission of submicron dust particles. Condensed Matter Physics, 2002, v. 5, № 3(31), p. 449–471.
15. 20 лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее. Национальный доклад Украины Киев, Аттика, 2006, 232 с.

10. РАДИОАКТИВНАЯ ПЫЛЬ И АЭРОЗОЛИ. ГОРЯЧИЕ ТОПЛИВНЫЕ ЧАСТИЦЫ

10.1. В первые месяцы после аварии

Главной особенностью аварии на ЧАЭС, обусловившей ее катастрофические последствия, был выброс в окружающую среду десятков миллионов кюри в виде радиоактивных аэрозолей¹. Это привело к загрязнению многих тысяч квадратных километров земель и выводу части из них из хозяйственного оборота.

Рис. 1 (см. также раздел 1.4.2, рис. 17) иллюстрирует динамику распространения радиоактивности на территории СССР в первые дни после аварии.

Первое измерение уровней радиации над развалом реактора было проведено группой воздушной радиационной разведки с помощью самолета-лаборатории Ан-24рр² бортовой номер 03 в ночь с 27 на 28 апреля 1986 г. [2].

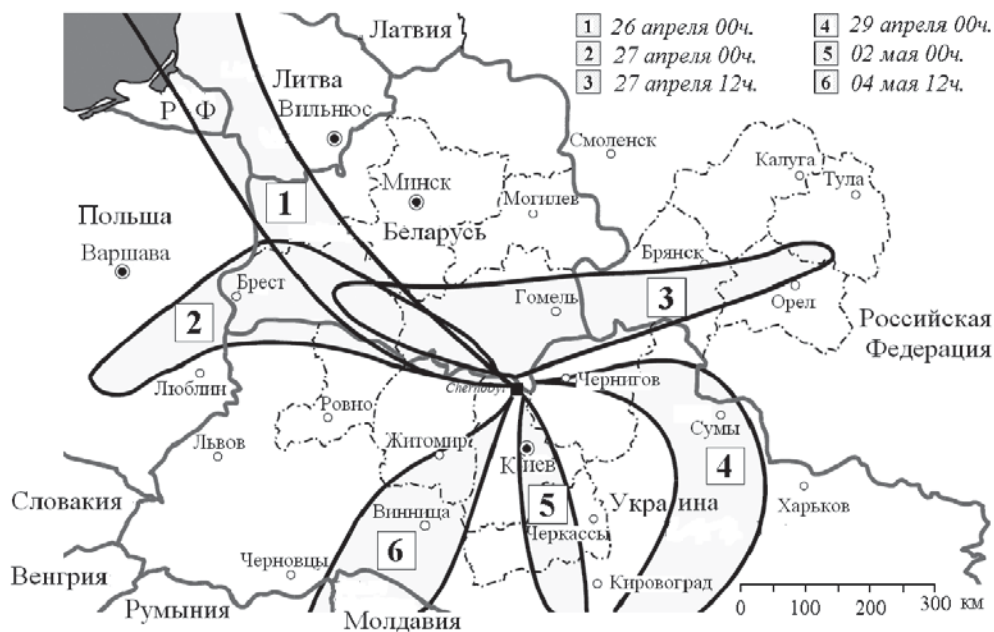


Рис. 1. Распространение выброса радиоактивности из аварийного 4-го блока ЧАЭС (26 апреля – 04 мая 1986 г.)

¹За время активной стадии из разрушенного реактора было выброшено в виде мелких частиц $\leq 5\%$ топлива (по урану), $(33 \pm 10)\%$ от накопленного в активной зоне ^{137}Cs . Это составляло $(2,3 \pm 0,7)$ МКи. По оценкам было выброшено и $(50\text{--}60)\%$ ^{131}I (см. [1]).

²Ан-24рр (см. рис. 2) – самолёт-лаборатория для радиационной разведки, приспособлен для отбора радиоактивных продуктов из облака ядерного взрыва. Привлекался к работам по ЛПА на ЧАЭС. В салоне вместо пассажирского оборудования установлены спецоборудование радиометрической и химической лаборатории и рабочие места операторов. Для забора воздуха за кабиной экипажа по обоим бортам самолета подвешены на пилонх фильеры – гондолы.

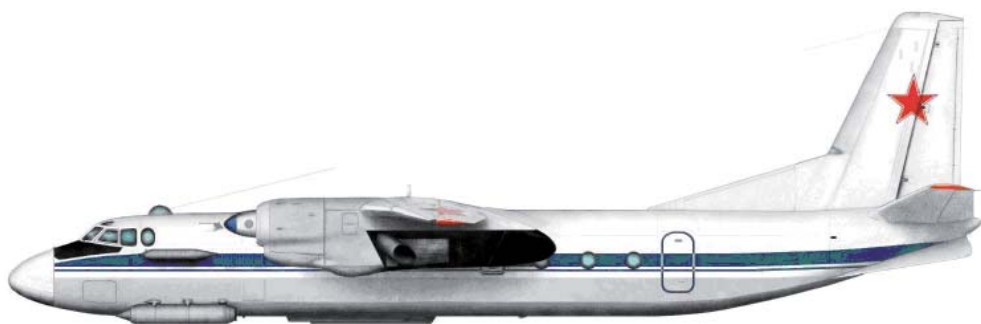


Рис. 2. Самолёт-лаборатория Ан-24рр

На борту самолета была установлена высокочувствительная к гамма-излучению аппаратура для геологических исследований, прибор для поиска точечных гамма источников «Зефир» и оборудование для отбора проб воздуха. В 23 часа 27 апреля самолет поднялся с подмосковного аэродрома и в 1 час. 11 мин. 28 апреля был над ЧАЭС. Вот, что пишет участник полета:

«...начали снижение с одновременным измерением радиоактивности на каждом уровне, так называемая «этажерка»: 5, 4, 3, 2 тыс. м — фон, на одной тысяче метров зашкалила геологическая аппаратура и «Зефир»... При дальнейшем снижении до высоты 500 м возрастающие показания радиометра КРБ-1 достигли величины 40 мР/час. По условиям безопасности полетов в ночных условиях дальнейшее снижение пришлось прекратить» [2]

Этой же группой было установлено, что ночью 27 апреля радиоактивные аэрозоли наиболее интенсивно распространялись в западном направлении в слое от 500 до 1200 м со скоростью 3—4 м/с.

Правительственной Комиссией были приняты все меры для того, чтобы наладить постоянный отбор проб аэрозолей над разрушенным блоком и исследование их радиационного состава.

Через несколько дней к этой задаче была подключена вертолетная техника.

С начала мая измерения стали проводить сотрудники «Радиевого института» под руководством А.А. Римского-Корсакова [3].

Пробоотбор производился над реактором, площадкой вокруг 4-го блока, территорией ЧАЭС и 30 км зоны. Для этого использовались специальные фильтр — гондолы, предварительно окаченные емкости с фильтрами, которые несли самолеты и вертолеты радиационной разведки.

Гондолы были различных конструкций. Например, под крыльями самолета АН-24рр располагались две гондолы, каждая из которых содержала $\sim 3 \text{ м}^2$ фильтрующего материала ФПП-15-1,5. Одна из них, как правило, использовалась на маршруте полета, вторую открывали над ЧАЭС, где проводились галсы на высоте 200—300 м. Воздух устремлялся в откачанную емкость и находящиеся в нем аэрозоли оседали на фильтре, который затем анализировался в лабораториях³.

³Самолеты-лаборатории АН-24рр осуществляли контроль дневных выбросов радиоактивных продуктов из реактора в атмосферу практически ежедневно (и в три смены) вплоть до 21 августа. За первые три месяца после аварии четыре самолета-лаборатории совершили 285 контрольных полетов, отобрали с помощью фильтр — гондол около 600 проб. Такая работа потребовала смены 8 экипажей.

В дальнейшем десятками организаций отбирались пробы аэрозолей и почвы на площадке ЧАЭС и в чернобыльской зоне и выполнялись их анализы. К этой работе привлекались службы Госкомгидромета, учреждения Минобороны, институты Минсредмаша, Академии Наук СССР и УССР, Минздрава СССР, учреждения республиканского подчинения и т.п. (см., например, [4–7]).

В силу многочисленных объективных причин — нестационарного характера самого выброса, меняющихся метеоусловий, методических трудностей отбора проб в значительных радиационных полях, активных воздействиях на разрушенный реактор (сброс материалов с вертолетов), погрешности измерений дозиметрических приборов и т.д. и т.п., точность определения основного выброса оказалась весьма низкой [7].

Тем не менее, эти измерения позволили сделать важный вывод (о нем уже говорилось в разделе 1.4.2):

в течение всей активной стадии аварии выброс радиоактивности, за исключением легколетучих веществ — инертных газов, йода, цезия, теллура и др., происходил в составе частиц мелкодиспергированного топлива. Основная часть радионуклидов была заключена в матрице окислов урана.

Это показали уже первые результаты анализов воздушных фильтров, взятых над развалом реактора.

В таблице 1 приведены результаты исследования одного из таких фильтров. В ней приводятся отношения экспериментально определенных активностей отдельных радионуклидов к расчетным значениям для топлива 4-го блока перед аварией, сделанных в это время в КИ (см. раздел 1.4.2).

Расчеты и эксперимент совпадали для всех радионуклидов с точностью до методических погрешностей. Исключение представляли легко летучие изотопы цезия. Анализ других воздушных фильтров, а также проб почвы, взятых в ближайшей зоне, очень скоро подтвердил этот вывод.

Одна из важнейших характеристик аэрозолей — их дисперсность, распределение по диаметрам частиц. Первые пробы для оценки дисперсного состава радиоактивных аэрозолей были получены специалистами Министерства обороны СССР.

Таблица 1. Отношения экспериментальных активностей радионуклидов аэрозольного выброса к расчетным значениям (для топлива 4-го блока перед аварией) [5]

Радионуклид	Отношение экспериментальной и расчетной активностей*
⁹⁵ Nb	1.06
⁹⁵ Zr	1.07
¹⁰³ Ru	0.92
¹⁰⁶ Ru	1.20
¹³⁴ Cs	3.11
¹³⁷ Cs	3.20
¹⁴¹ Ce	0.85
¹⁴⁴ Ce	1.05

*Погрешность отношения ±20%.

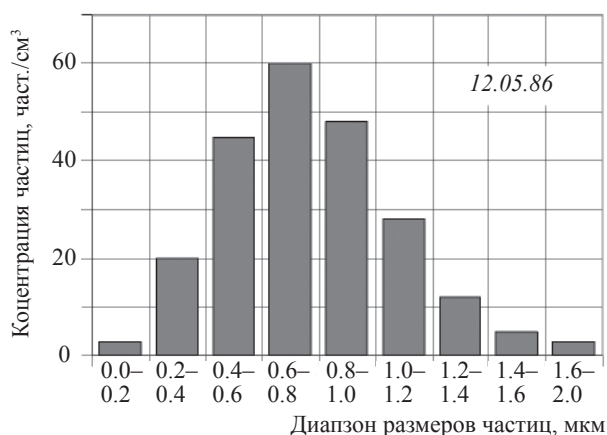


Рис. 3. Распределение радиоактивных частиц по размерам на промплощадке ЧАЭС (на высоте 2 м от земли)

В работе [8] приведены данные по распределению радиоактивного аэрозоля на высоте 2 м на промплощадке ЧАЭС 12 мая 1986 г. Проба отбиралась на ткань ФПП-15, в качестве аспирационного устройства использовались вакуум-бачки.

В работе приведено распределение количества частиц в 1 см^3 воздуха с размерами в диапазоне от 0 до 1,6 мкм с градацией через 0,2 мкм. Обработка данных показала, что они хорошо аппроксимируются логнормальным распределением с $АД^3 = 0,62 \text{ мкм}$ и средним геометрическим отклонением $\sigma = 1,5$ (см. рис. 3).

Через два дня, 14 мая 1986 г., над развалом 4-го блока ЧАЭС на высоте 300 м от поверхности земли был выполнен пробоотбор с помощью самолета Ан-24рр [9]. В одной из гондол размещался пакет трехслойного фильтра площадью 1 м^2 , через который воздух при скорости полета 350–400 км/ч фильтровался в диапазоне 0,9–1,2 м/с.

После окончания полета каждый из слоев пакета был измерен на гамма – спектрометре и исходя из количества того или иного радионуклида, рассчитаны параметры логнормального распределения.

Было установлено, что труднолетучие радионуклиды ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{140}La , $^{141,144}\text{Ce}$ имели $АМАД^4$ около 0,7 мкм при $\sigma = 1,6–1,8$.

Таким образом, эти результаты были практически идентичны зарегистрированным 12 мая на промплощадке ЧАЭС.

Что касается легколетучих радионуклидов ^{131}I , ^{132}Te , ^{134}Cs , ^{137}Cs , то они были связаны с существенно меньшими частицами, $АМАД$ которых находился в диапазоне 0,3–0,4 мкм при $\sigma = 2,3–2,5$. Такое различие вероятнее всего было обусловлено высокими температурами в развале реактора и происходящими там физико-химическими процессами, благодаря которым летучие радионуклиды оседали на субмикронных частицах – носителях.

Важно отметить, что спустя две недели после аварии, над развалом реактора и вблизи разрушенного 4-го энергоблока преобладали субмикронные ради-

⁴Аэродинамический диаметр аэрозоля.

⁵Аэродинамический медианный по активности диаметр аэрозоля, мкм.

оактивные аэрозоли. Они вовлекались в дальний атмосферный перенос и идентифицировались за тысячи километров от Чернобыля (см., например, [9–11]).

Практически сразу после окончания активной стадии аварии на площадке ЧАЭС развернулась борьба с радиоактивной пылью. В Гл. 1 уже рассказывалось, что основным средством этой борьбы (так же, как и с выброшенными фрагментами активной зоны) стало снятии радиоактивного грунта и покрытие площадки чистыми материалами — песком, щебнем, бетоном и т.п. Кроме того пыль постоянно осаждали водой и связывали специальными пылеподавляющими составами. Все это проводилось с помощью поливальных машин и специально оснащенных вертолетов⁶.

10.2. Во время строительства «Укрытия»

Строительство «Укрытия», одновременная работа на его площадке десятков единиц строительной техники, постоянное движение тяжелых транспортных машин приводило к дополнительному подъему пыли и значительному увеличению содержания радиоактивных аэрозолей в воздухе.

Следует отметить, что в этот период характерные размеры аэрозолей стали меняться. К первой декаде сентября среди носителей радионуклидов чернобыльского генезиса стали преобладать частицы с АМАД более 1 мкм.

Таким образом, спустя 4 месяца после аварии спектр размеров РАУ сместился из субмикронной области в микронную область.

Если в первое время после аварии для людей, работающих на площадке станции, основную опасность представляло проникающее излучение, то со временем все большее значение стали играть радиоактивные аэрозоли. Это заставляло интенсифицировать меры по осаждению пыли.

Особое внимание привлекал развал реактора, который и после завершения активной стадии аварии мог оставаться источником радиоактивных газов и аэрозолей и существенно влиять на загрязненность воздуха вокруг объекта.

На заседаниях Правительственной комиссии все чаще поднимался вопрос о возобновлении сброса на разрушенный блок пылеподавляющих растворов⁷.

В результате осенью, в качестве превентивной меры, вертолеты снова начали заливать развал реактора. Их полеты проходили с 6 по 8 августа, с 16 по 20 августа и с 30 августа по 5 сентября. Сначала на высоте 250 м, а на последнем этапе часть растворов сбрасывалась с высоты 170 м.

Вот что сообщается в очередном из актов, направленном в ПК.

«В период с 30.08.86 г. по 05.09.86 г. проводились работы по пылеподавлению в районе центрального зала и деаэрационной этажерки 4-го энергоблока

⁶На вертолетах МИ-6, МИ-8, МИ-26 устанавливались специальные емкости для растворов и распылительные устройства.

⁷Согласно [12] с 27 апреля по 18 июня 1986 г. на блок было сброшено следующее количество пылеподавляющих материалов (в виде растворов):

— тринатрийфосфата — Na_3PO_4 ~2500 т;

— других композиций (латекс марки СКС-65гп, барда, жидкое стекло, поливиниловый спирт, каучук и др.) ~2700 т.

ЧАЭС в соответствии с Решением Правительственной комиссии № 121. В этот период было произведено 40 вертолето-вылетов. Израсходовано 180 тонн раствора тринатрийфосфата и 180 тонн композиции ИХП на основе поливиниловой дисперсии, карбамидной смолы и гидрофильного аэросила.

В результате обработки пылевыведение из зоны развала 4-го энергоблока практически прекращено, концентрация радиоактивных аэрозолей на территории станции снизилась в 100–1000 раз».

Следует признать, что последняя оценка сильно завышена. Дело в том, что результаты принятых мер по пылеподавлению оценивались, в основном, по данным аэро-разведки, при отборе проб на высоте 200–300 метров над разрушенным блоком. А как указывается в [13] (а до этого отмечалось в [14]) с течением времени температура развала понижалась, и поток восходящего воздуха уже не мог эффективно поднимать аэрозоли на такую высоту. Измерения на этой высоте стали малочувствительны к реальному выбросу из развала реактора.

Более точные данные о влиянии развала на аэрозольную обстановку были получены к середине сентября в измерениях с использованием «тросохода» (см. [13], [15–16]).

Суть этого метода состояла в следующем.

В помещении 7001 (оно находится под вентиляционной трубой на верхнем уровне третьего энергоблока) саперы проделали взрывом отверстие в стене. Далее, с помощью «гарпунной пушки» они перебросили стальной трос на остатки западной стены 4 блока (рис. 4). Общая длина троса составляла около 70 м. По этому тросу мог передвигаться тросоход конструкции «Белоярскатом-энергоремонт» со скоростью около 1 м/мин. Устройство останавливалось в нужной точке и пробы воздуха отбирались непосредственно над поверхностью развала. В измерениях принимали участие сотрудники НИФХИ им. Л.Я. Карпова, РИ, КИ, ОГ УНХВ и ВНИИНМ.

Они позволили получить наиболее достоверные результаты по величинам концентраций и изотопному составу радиоактивных аэрозолей, выбрасываемых из развала реактора.

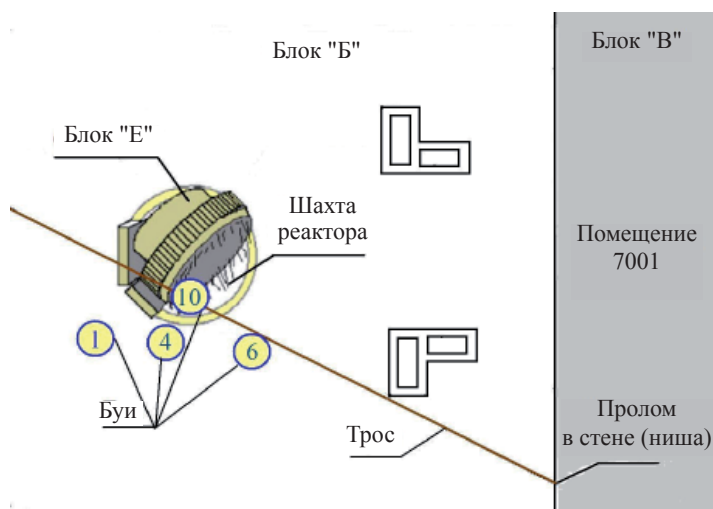


Рис. 4. Схема расположения троса, прокинутого над развалом реактора и проходящего около буев №№ 1, 4, 6, 10 [13]

Используя данные об активности воздуха над развалом и о скоростях подъема воздуха, полученные с помощью буюв (рис. 4), оказалось возможным оценить среднесуточный выброс γ -излучающих радионуклидов (см. таблица 2) [13]. Суммарный выброс смеси радионуклидов 3 и 9 октября оказался лишь в 15–20 раз больше, чем разрешенный для блока АЭС (1000 МВт) при его нормальной работе.

Таблица 2. Средняя активность воздуха над развалом и оценки суммарного выброса

Дата отбора	Период отбора (ч, мин)	Средняя активность (Σ по γ), Бк/м ³	Вертикальные скорости потоков по данным буюв № 1, 2, 4, 6, м/с				Суммарный выброс, ГБк/сут
			1	2	4	6	
28.08	17 ²⁵ —18 ²⁵	1660	0,7	1,9	2,7	0,7	52
29.08	17 ³⁰ —19 ¹⁶	1220	0,5	2,0	2,2	0,4	33
03.09	15 ⁰⁴ —16 ³⁴	1590	0,2	0,2	0,1	0,2	7,4
09.09	17 ¹⁸ —18 ⁴⁵	1780	0,4	0,4	0,2	0,1	11

Данные по отдельным радионуклидам за 9 сентября приведены в таблице 3. Из нее видно, что концентрация радионуклидов *непосредственно над развалом реактора* лишь в 4 раза превышала ДКА для смеси нуклидов (согласно НРБ-76) [16].

Таблица 3. Радионуклидный состав γ -излучающих нуклидов из развала реактора 4-го блока ЧАЭС (09.09.86)

Нуклид	Период полураспада	Активность, Ки/л	Относительное содержание, %	ДКА, Ки/л (НРБ-76)
¹⁴⁴ Ce	284,4 сут	15,1×10 ⁻¹²	31,5	6,4×10 ⁻¹²
¹⁴¹ Ce	62,5 сут	1,72×10 ⁻¹²	3,6	1,6×10 ⁻¹⁰
¹⁰³ Ru	39,4 сут	3,03×10 ⁻¹²	6,3	5,2×10 ⁻¹¹
¹⁰⁶ Ru	367,0 сут	5,95×10 ⁻¹²	12,4	5,6×10 ⁻¹²
¹³⁷ Cs	30,17 лет	1,98×10 ⁻¹²	4,1	1,4×10 ⁻¹¹
⁹⁵ Zr	60,0 сут	6,63×10 ⁻¹²	13,8	3,2×10 ⁻¹¹
⁹⁵ Nb	35,0 сут	12,6×10 ⁻¹²	26,3	1,0×10 ⁻¹⁰
¹³⁴ Cs	2,07 года	8,40×10 ⁻¹³	1,7	1,3×10 ⁻¹¹
Сумма		4,8×10 ⁻¹¹		1,2×10 ⁻¹¹

После проведения соответствующих оценок стало ясным, что в сложившихся условиях выброс радиоактивных аэрозолей из развала уже не является определяющим фактором загрязнения приземного слоя воздуха на площадке.

Вот, что вспоминают участники работы [16].

«Неожиданно стабильно малые величины удельных концентраций γ -излучающих радионуклидов над развалом 4-го блока ... побудили лабораторию радиометрии⁸ совместно с представителями ВНИИНМ и НИФХИ обратиться в Правительственную комиссию с предложением об изменении проекта «Укрытия» 4-го блока ЧАЭС, который предполагал организацию обязатель-

⁸«Радиевого института».

ной принудительной вентиляции после полного перекрытия развала. Предложение рекомендовало использовать только естественную конвекцию, оставив принудительную вентиляцию в качестве резервной. Как известно, это предложение, в конечном счете, было реализовано.

И, надо отметить, существенно упростило дальнейшую эксплуатацию объекта «Укрытие».

Следующим актуальным вопросом стал вопрос о том, как будет влиять только что положенный трубный накат на естественную вентиляцию «Укрытия». Не приведет ли это к затруднению вентиляции и постепенному разогреву ТСМ в объекте, как скажется на поведении пыли и аэрозолей. Ответ был получен в работах лаборатории радиометрии РИ (см. [16] и ссылки в ней). Ее сотрудники провели измерения аэрозольной активности в пространстве над трубным накатом и под ним (рис. 5) — в верхней части центрального зала (См. также раздел 2.2.4)

Объемные активности (по 8 основным радионуклидам) оказались следующими.

Над трубным накатом.

На высоте **+12 м** (точка 1 на рис. 5) — 532 Бк/м³

На высоте **+24 м** (точка 2 на рис. 5) — 661 Бк/м³

На высоте **+38 м** (точка 3 на рис. 5) — 691 Бк/м³

На высоте **+50 м** (точка 4 на рис. 5) — 1252 Бк/м³

Под трубным накатом

На высоте **−19 м** (точка 5 на рис. 5) — 1819 Бк/м³

Общий вывод, сделанный исследователями — трубный накат, расположенный на высоте ~35 м выше пола центрального зала, не является серьезным препятствием для воздушных потоков, поднимающихся из развала, и не мешает естественной вентиляции. Потоки огибают его с боковых сторон.

Следует отметить, что после создания «Укрытия» отвод остаточного тепла, выделяемого топливом в здании 4-го блока, осуществлялся только за счет естественной вентиляции.

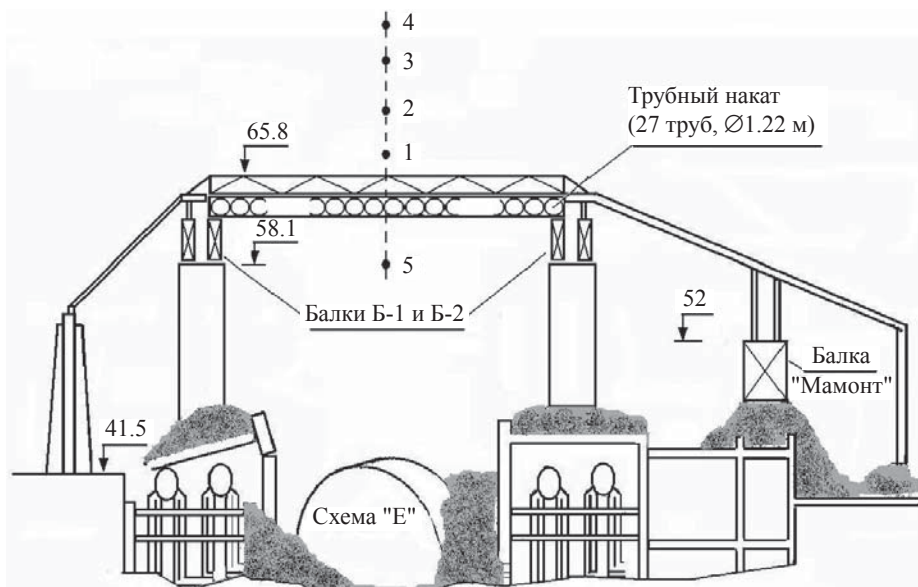


Рис. 5. Схема измерений объемных активностей аэрозолей, выполненных 1 и 2 октября 1986 г. над (точки 1—4) и под (точка 5) трубным накатом объекта «Укрытие»

Этому способствовали не столько технологические проходки, оставленные строителями, сколько большое количество щелей в объекте.

Избежать их возникновения было практически невозможно, поскольку дозовые поля не позволяли осуществлять монтаж конструкций с необходимой точностью и проводить многие необходимые сварочные работы.

С завершением строительства «Укрытия» борьба с радиоактивной пылью и аэрозолями вступила в новую фазу и для сотрудников созданной в 1987 г. КЭ перенеслась во внутренние помещения объекта. Одновременно была создана постоянная система мониторинга радиоактивности воздуха на площадке объекта (см. раздел 13.1).

При этом происходило накопление экспериментального материала, который помог понять процессы образования мелкодисперсных радиоактивных частиц, образующих аэрозоли.

Если в первые дни после аварии было установлено два типа таких частиц — топливные (содержащие отработавшее топливо и, связанные с ним, труднолетучие радионуклиды) и конденсационные (частицы из неактивных материалов, на которых в процессе аварии конденсировались легколетучие радионуклиды), то по мере того, как складывались представления о ходе развития аварии их классификация усложнялась.

Особый интерес исследователей вызывало то, что частицы являлись «свидетелями» происходивших процессов и несли информацию о характере и последовательности физико-химических взаимодействиях материалов, происходивших в активной зоне, об их температуре и т.п.

Поэтому в следующем разделе будут кратко рассмотрены процессы, ставшие источниками образования этих частиц.

10.3. Процессы, при которых образовывались радиоактивные частицы

В настоящее время рассматривается пять таких процессов.

1. Диспергирование топлива при вводе избыточной реактивности.
2. Пароциркониевая реакция.
3. Высокотемпературное окисление фрагментов топлива в воздушной атмосфере.
4. Образование «конденсационных» аэрозолей из паров летучих радионуклидов;
5. Образование аэрозолей при формировании ЛТСМ.

Образовавшиеся частицы либо были выброшены при взрыве в сохранившиеся помещения «Укрытия» и за пределы объекта, либо попали в развал реактора и там при высоких температурах могли взаимодействовать с конструкционными материалами.

Мы кратко охарактеризуем перечисленные процессы (см. [17, 18]).

1. При вводе избыточной реактивности (авария типа RIA) в юго-восточной части реактора произошел быстрый разогрев топлива, разрушение топливных таблеток (за счет выделения газообразных продуктов деления), а затем и ТВЭЛ-ов. Диспергирование топливных таблеток привело к образованию горячих топливных частиц с размерами от единиц до нескольких сотен микрон, имеющих высокую удельную активность и испускающих сложный спектр α , β и γ излучения, характерный для отработавшего топлива. Пример такой черно-

быльской частицы — зерна двуокиси урана, показан на микрофотографии (рис. 6). На ее поверхности видны следы пористости, обусловленной газовой выделением при аварийной вспышке мощности.

Частицы данного типа были выброшены во внутренние помещения объекта «Укрытие» и на «западный след», сформировавшийся сразу после аварии за счет восточного ветра.

Другой механизм диспергирования топлива при аварии происходил за счет взаимодействия расплавленной периферии таблетки с конструкционными материалами и теплоносителем. Это привело, например, к образованию частиц вида $UO_x + Zr$ и $Zr-U-O$.

Микрофотография такой частицы приведена на рис. 7.

2. По мере развития аварийных процессов в ходе высокотемпературного взаимодействия водяного пара с цирконием образовывался водород (шла парциркуниевая реакция — $2H_2O + Zr = 2H_2 + ZrO_2 + Q$, $Q = 1,46 \times 10^8$ Дж/кг H_2).

В результате произошел объемный взрыв воздушно-водородной смеси, приведший к разрушению конструкций и материалов под действием ударной волны.

Скорее всего, именно этот механизм ответственен за формирование основной части уран-циркониевых частиц. Часто эти частицы имеют вид фрагментов окислов урана в циркониевой оболочке⁹ (см. рис. 8 и 9).

3. Высокая температура оставшегося в реакторе ядерного топлива, сохранявшаяся достаточно долгое время из-за остаточного тепловыделения, привела к дальнейшему окислению диоксида урана и его дополнительному диспергированию¹⁰.

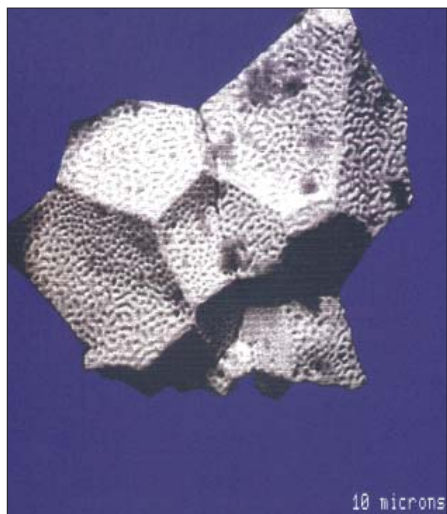


Рис. 6. Микрофотография «горячей частицы» — зерна двуокиси урана

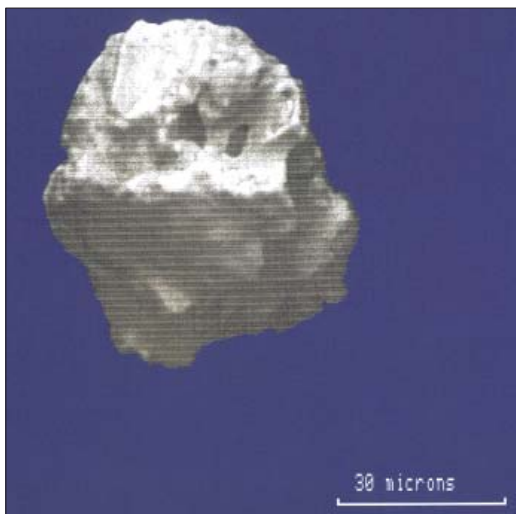


Рис. 7. Микрофотография. «Горячая частица» в виде фазы $(Zr,U)O_x$

⁹Однако нельзя также исключить формирование части подобных частиц в момент взрывного распыления тепловыделяющих сборок при вводе избыточной реактивности или в начальной стадии процесса формирования ЛТСМ.

¹⁰Эксперименты показывают, что при окислении топливных таблеток в воздушной атмосфере и температурах несколько сот градусов Цельсия, топливо через 1–3 часа рассыпается на частицы U_3O_8 с характерными размерами 1–15 мкм.

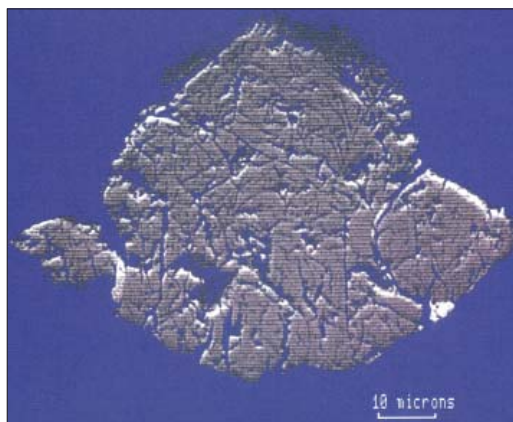


Рис. 8. Микрофотография. Полированный препарат «горячей частицы» в виде окиси циркония с включениями фазы $(\text{Zr,U})\text{O}_x$ (белые участки)

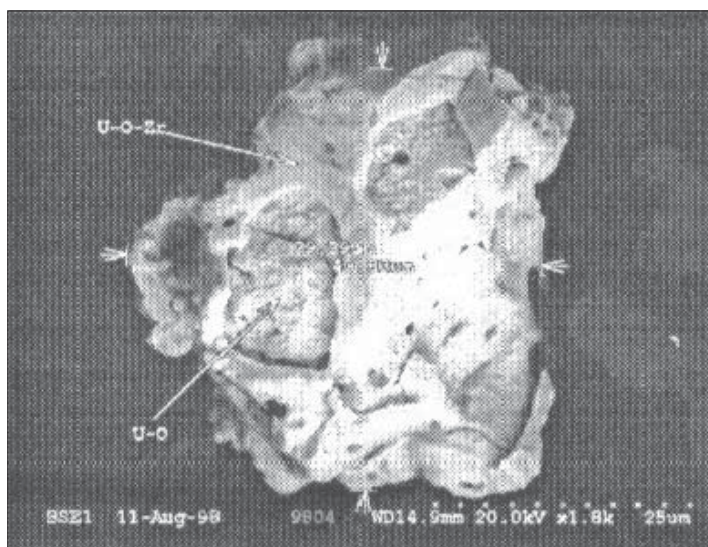


Рис. 9. Микрофотография. Частица окисла урана в «оболочке» из фазы $(\text{Zr,U})\text{O}_x$

Именно с частицами окисленного топлива связана значительная часть активности поверхностного загрязнения внутренних помещений «Укрытия» и выпадений ближней зоны ЧАЭС.

Частицы окисленного топлива гораздо менее устойчивы к воздействию выщелачивающих агентов по сравнению с зернами UO_2 . Последние практически не разрушаются в водных растворах. А окисленные частицы, находящиеся в нейтральных или слабощелочных средах (как в «Укрытии»), относительно быстро (за ~ 1 год) теряют около 90% своей активности, которая переходит в раствор.

При растворении таких частиц они разрушаются на микроблоки «ниточной» структуры с сильно развитой поверхностью (рис. 10). Дальнейшее разрушение таких микроблоков может формировать субмикронные урано – содержащие частицы.

4. При авариях на реакторах летучие радионуклиды, участвующие в выбросе и первоначально находящиеся в газообразной форме, быстро осаждаются

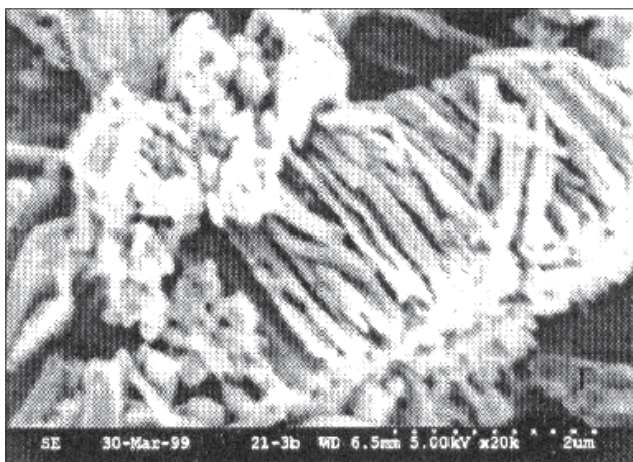


Рис. 10. Микрофотография. Частица окисла урана в «оболочке» из фазы $(Zr,U)O_x$

на неактивные и активные аэрозольные частицы, формируя так называемую «конденсационную» компоненту выброса.

Основная часть радиоактивных атомов осаждается на поверхности субмикронных частиц, которые приобретают незначительную активность.

Характеристики этих частиц не постоянны из-за миграции радиоактивных атомов к их поверхности и обратно, изменения заряда частиц, их коагуляции и т.п. После выпадения на грунт вследствие высокой растворимости радионуклиды цезия с поверхности первичных частиц перераспределяются по частицам грунта до их захвата частицами, имеющими наибольшую сорбирующую способность (преимущественно глинистыми минералами).

В помещениях объекта «Укрытие» первичные радиоактивные частицы «конденсационного» происхождения через короткое время ассоциировались с частицами обычной неактивной пыли или сорбировались на поверхностях конструкционных материалов.

5. Вопрос о том, какое количество аэрозолей образовалось в процессах, проходивших при формировании лавы, каковы были характеристики этих аэрозолей, до сих пор полностью не изучен. В составе исследованных ГЧ встречаются те, которые возникли при контакте топлива с различными конструкционными материалами. Это привело к образованию сложных химических соединений, особенно на поверхности частиц (см. раздел 10.4.6).

10.4. Методы исследования горячих топливных частиц

10.4.1. Общие замечания

Одной из особенностей аварии на ЧАЭС стало образование так называемых «горячих топливных частиц». Их изучали многие научные коллективы.

Для иллюстрации приведем рисунок, взятый из работы [19] (рис. 11). Он представляет один из результатов, полученных при исследовании сотен этих частиц, извлеченных из верхнего слоя почвы в ближней зоне ЧАЭС. Был получен график зависимости между активностью ^{144}Ce и эффективным средним размером ГТЧ на момент аварии.

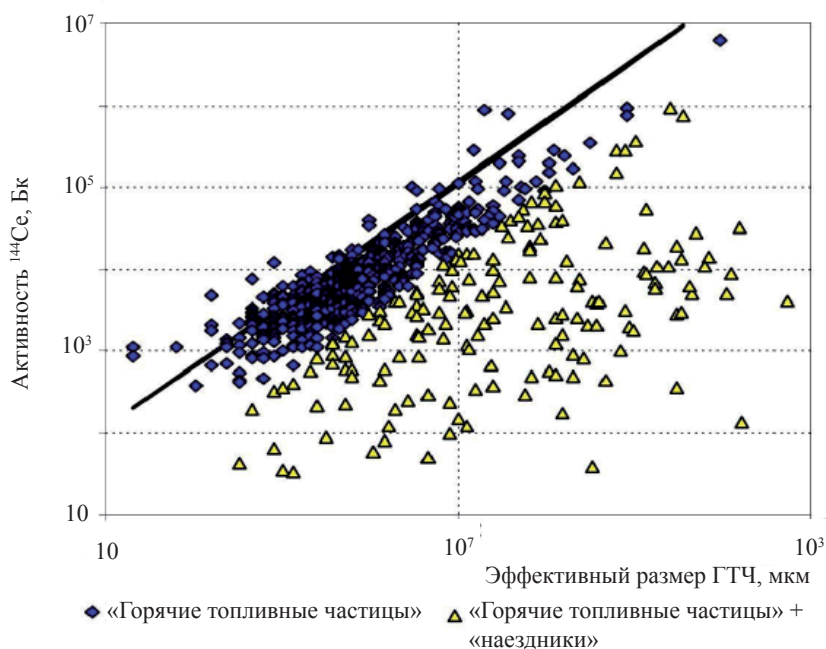


Рис. 11. Зависимости между активностью ^{144}Ce в топливных частицах на момент аварии и их эффективным размером¹¹

Что именно привлекло такое внимание к ГТЧ?

Конденсационная компонента выброса, образовавшаяся в результате аварии на ЧАЭС, схожа с глобальными выпадениями радионуклидов после испытаний ядерного оружия.

Во многих случаях ее поведение могло быть предсказано достаточно точно.

А свойства и поведение в окружающей среде ГТЧ, содержащих такие радионуклиды, как стронций, плутоний и др., к моменту аварии на ЧАЭС были практически неизвестны, их необходимо было исследовать¹².

При этом, в первую очередь, специалистов интересовала биологическая опасность ГТЧ.

А степень этой опасности определялась их радионуклидным составом, активностью, аэродинамическими характеристиками и растворимостью в жидких органических средах.

В исследованиях ГТЧ, находящихся в помещениях «Укрытия», специалисты КИ принимали самое активное участие. Они использовали существующие методы и разрабатывали новые. Необходимо было обеспечить:

¹¹Часть частиц, они отмечены знаком — Δ , выпадает из основного массива данных. Это обусловлено завышением их размера из-за неактивных включений, так называемых «наездников», которые обнаруживаются под микроскопом.

¹²В работе [13] отмечается, что в период создания «Укрытия»: «проблема ингаляционных дозовых нагрузок оставалась актуальной..., но для ее решения не хватало ни методических, ни организационных, ни технических средств... Результатом сложившейся ситуации было то, что работы по ликвидации последствий аварии регламентировались только величиной МЭД т.е. внешним облучением».

- отбор проб радиоактивной пыли;
- отбор проб аэрозолей из больших объемов воздуха;
- локализацию и извлечение ГТЧ из проб;
- определение дисперсности аэрозолей и аэродинамических характеристик ГТЧ;
- определение радионуклидного и изотопного состава частиц, изучить их микроскопическое строение;
- исследовать растворимость ГТЧ в различных жидкостях (в том числе в имитаторе легочной жидкости).

Эти методы рассматриваются в следующих разделах.

10.4.2. Отбор проб радиоактивной пыли

Работам в помещениях объекта, как правило, предшествовало изучение пылевого загрязнения на их стенах, полу, потолке. Это позволяло определить нахождение и принять меры по подавлению источников образования РАУ.

Часть загрязнения, которая при взаимном контакте поверхностей не переходит с одной на другую, называют фиксированной (не снимаемой), а та часть загрязнения, которая может переходить, называется нефиксированной (снимаемой).

Последняя является основной причиной загрязнения воздушной среды.

Фиксированная загрязненность является источником проникающего излучения. Однако, при проведении механической обработки поверхности, сварке и т.п. она также может попасть в воздушную среду и стать источником РАУ.

Для измерения нефиксированного загрязнения на «Укрытии» применялся метод мазков¹³ и метод — «сдувом воздухом». Если первый широко известен, то второй был впервые испытан в 1999–2000 гг.

Само название метода — «сдувом воздухом», говорит о способе снятия поверхностного загрязнения. При этом используется «перевернутая чаша», под которой подстилающая поверхность активизируется воздушными струями и частицы с нее поднимаются в воздух (см. рис. 12, 13).

Устройство работает следующим образом. Корпус воронки (1) своей нижней открытой частью прижимается к исследуемой поверхности (6). Воздух засасывается насосом через отверстие (3), при этом он проходит через внутренний объем корпуса (1) и фильтр (4). Поступает воздух через ряд отверстий (8) в патрубках (2). В корпусе (1) на вертикальном валу (7) установлена щетка (5), которую вращают вручную во время отбора пробы. Пылевые частицы, ото-

¹³Метод мазков — способ измерения загрязненности поверхности путем исследования активности, снятой с этой поверхностей контактным путем на сорбент. В качестве сорбента чаще всего используют: хлопчатобумажную ткань, марлю, фильтровальную бумагу, ватные тампоны.

Метод мазков дает возможность непосредственного измерения количества радиоактивного вещества, которое может переходить контактным путем на обувь, спецодежду, участки тела, а также поступать в воздух рабочих помещений при движении людей или проведении технологических операций.

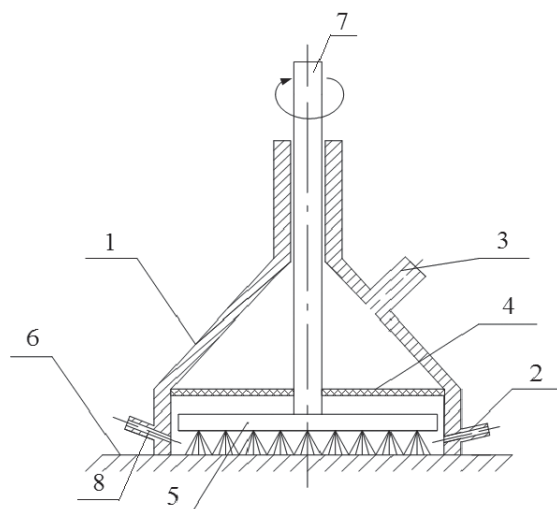


Рис. 12. Устройство для взятия проб с поверхности: 1 – корпус; 2 – патрубок подвода воздуха; 3 – патрубок для отвода воздуха; 4 – фильтр; 5 – щетка; 6 – исследуемая поверхность; 7 – вал; 8 – отверстия

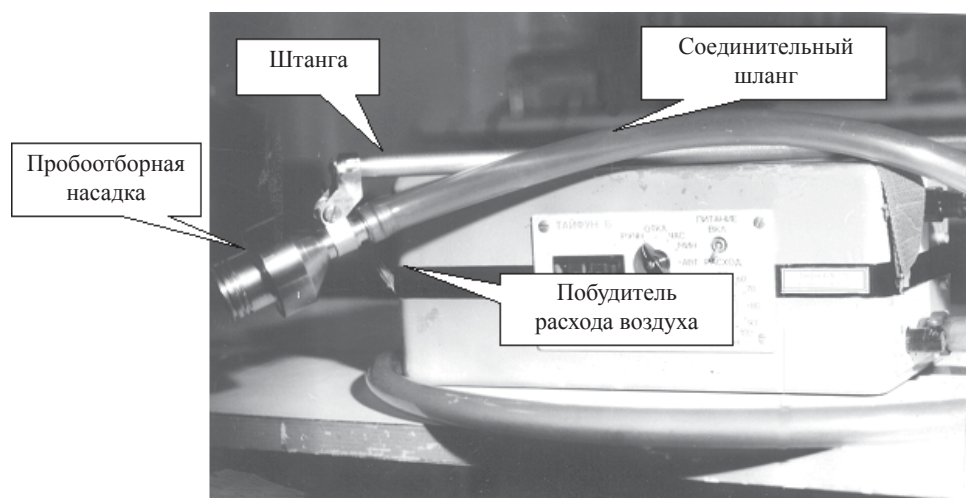


Рис. 13. Внешний вид устройства для пробоотбора «сдувом воздуха»

рванные от поверхности при вращении щетки, уносятся воздушным потоком и оседают на съемном фильтре (4), который изготовлен, например, из ленты ЛФС-2-50.

Время отбора пробы в одной точке поверхности около 10 секунд. Затем пробоотбор может перемещаться в следующую точку и т.п. Фильтр с отобранной пылью анализируется с помощью той же аппаратуры, что и мазки.

Пробоотборник пыли с помощью «щетки» обладает следующими преимуществами перед пробами на мазок:

- он гораздо менее чувствителен к действиям оператора (при пробоотборе методом мазка из-за субъективных особенностей оператора возможно значительное занижение или завышение результата);
- является прямым методом измерения пыли способной к подъему в воздух и представляющей, поэтому, наибольшую радиологическую опасность;

- позволяет, без потери эффективности, проводить пробоотбор с нескольких мест поверхности на один фильтр и, тем самым, давать интегральную оценку загрязненности.

Доля пыли, отобранной с поверхности, не обязательно такая же, как при помощи мазка. Например, в случае с влажными или пропитанными маслом отложениями пыли, проба на мазок не выявит различия между данными отложениями и сухими, а пробоотборник с помощью «сдува воздухом» даст разные результаты.

Таким образом пробоотбор пыли с помощью «сдува воздухом» может быть использован как основное нормированное воздействие на поверхность с пылевым загрязнением при определении коэффициента дефляции,

Расчеты и опыт показали, что в условиях объекта «Укрытие» средняя эффективность «сдува» загрязнения составляет примерно 0,7 относительно спиртового мазка (на последний попадает около 35% снимаемой активности) (Подробное описание этого метода см. Патент РФ № 92187).

10.4.3. Отбор проб РАУ

Оперативный отбор проб РАУ производили обычными методами с помощью фильтров, прокачивая через них воздух переносными воздухоудками. Большинство проб было отобрано с помощью аналитических фильтров АФА-РМП-20 или АФА-РСП-20¹⁴ с фильтрующей поверхностью 20 см².

Как правило, отбор шел при объемных расходах 80÷100 л/мин, что соответствует линейным скоростям фильтрации 65÷85 см/с.

Известно, что эффективность работы фильтра сильно зависит от окружающих условий (например, влажности) и реального спектра размеров аэрозольных частиц. Для того, чтобы понять представительность пробоотбора, проводимого в различных помещениях «Укрытия», был проведен целый ряд экспериментов.

Так 27–28 февраля 1989 г. в зоне буровых работ сотрудниками КЭ были отобраны 10 проб в помещениях 202/2, 207/4, 207/5, 208/9 (при МЭД 10÷50 мР/ч) и в коридоре (при МЭД – 2÷5 мР/ч). Отбор производился с помощью воздухоудки ППА-2, в аллонже¹⁵ которой размещали пакет из 4 фильтров АФА-РСП-20. [18].

Воздух прокачивали при расходе 98÷105 л/мин в течение 40 мин. Линейная скорость фильтрации составляла $V_{\phi} = 82\div 86$ см/с. Измеряли только первый и второй фильтры, поскольку третий и четвертый устанавливали для защиты второго от случайных загрязнений. Результаты измерений и расчетов эффективности улавливания аэрозолей приведены в таблице 3.

¹⁴Использование фильтров РСП было признано предпочтительным, поскольку их основной фильтрующий слой изготовлен из ультратонких волокон перхлорвинила диаметром около 0,5 мкм. Это обеспечивает улавливание аэрозолей в лобовом слое и позволяет измерять альфа-активные аэрозоли без поправки на поглощение альфа-частиц волокнами фильтра.

¹⁵Изогнутая трубка, в которую помещают воздушные фильтры.

Таблица 3. Эффективность улавливания α - и β -активных аэрозолей в помещениях ОУ фильтрами АФА-РСП-20 (февраль 1989 г.)

Шифр пробы	Место отбора	Скорость счета за вычетом фона, имп/с.				Эффективность, %	
		β -активность		α -активность		β	α
		$(N_2)^{16}$	$(N_1 + N_2)^{17}$	N_2	$N_1 + N_2$		
Э-1	207/4	0,7	117	0,028	0,36	99,4	92,2
Э-2	Коридор у пом. 207/4	0,11	2,6	0,006	0,08	95,7	92,9
Э-3	207/4	0,8	142	0,028	0,63	99,4	95,6
Э-4	202/2	0,18	8,7	0,004	0,07	97,9	94,4
Э-5	207/5	19,4	1523	0,276	6	98,7	95,4
Э-6	207/5	0,52	147	0,012	0,39	99,6	96,9
Э-6А	207/4	1,47	152	0,034	0,59	99,0	94,2
Э-7	208/9	0,07	13,1	0,02	0,7	99,5	97,2
Э-8	207/5	8,92	994	0,064	1,32	99,1	95,2
Э-9	207/4	3,1	433	0,06	0,06	99,3	94,0

Из таблицы следует, что при V_ϕ около 85 см/с эффективность улавливания фильтрами АФА-РСП-20 β -активных аэрозолей находилась в диапазоне 97,9÷99,6%, а α -активных – несколько меньше: 92,2÷97,2%.

Таким образом, были получены доказательства полноты улавливания аэрозолей и необходимой для дозиметрии точности определения их концентрации¹⁸.

10.4.4. Локализация и извлечение ГТЧ из проб

Что касается *локализации и извлечения ГТЧ из фильтров*, то здесь наряду с хорошо известной авторадиографией¹⁹ сотрудниками КИ было предложено новое оборудование, которое позволяло извлекать для последующих исследований «горячие частицы», имеющие активность больше чем 5 Бк и размеры больше чем 5 мкм [20].

Около 2000 частиц, отобранных при помощи этого оборудования, были исследованы и результаты дали важную информацию о свойствах ГТЧ. Принцип созданного метода базируется на совместном использовании электронно-оптического преобразователя и оптического микроскопа (рис. 14).

Тонкий слой сожженного фильтра (возможно, озоленной почвы) наносится на пластиковый сцинтиллятор. Бета – излучающие частицы вызывают в

¹⁶ N_2 – активность второго фильтра.

¹⁷ $(N_1 + N_2)$ – суммарная активность первого и второго фильтров.

¹⁸В декабре 2000 г. аналогичные эксперименты были проведены для оценки улавливания аэрозолей фильтрами АФА-РСП-20. Высокая эффективность работы фильтров подтвердилась.

¹⁹Метод изучения распределения радиоактивных компонентов в исследуемом объекте наложением на него чувствительной к радиоактивным излучениям фотоэмульсии.



Рис. 14. Прибор для локализации, и извлечения ГТ из проб

нем свечение. Электронно-оптический преобразователь и микроскоп расположены рядом (одним блоком) и имеют общий рабочий стол. Поэтому, переместив обнаруженную ГЧ, на оптическую ось микроскопа, (совместив пятно со специальной меткой), можно провести ее визуальное изучение.

Обнаруженные частицы могут быть извлечены с помощью специальной иглы, которая при выдвижении попадает в точку нахождения ГЧ (центр поля зрения микроскопа).

10.4.5. Определение аэродинамических характеристик ГТЧ

Эффективность работы защитных фильтров определяется аэродинамическими характеристиками находящихся в воздухе частиц.

Этими же характеристиками определяется и степень проникновения частиц в различные отделы дыхательного тракта.

Более крупные из них оседают в трахее и бронхах, более мелкие — в легких²⁰.

²⁰Согласно исследованиям в отделы легких проникают только частицы размером (0,2—1) мкм, более крупные оседают на поверхности верхних дыхательных путей.

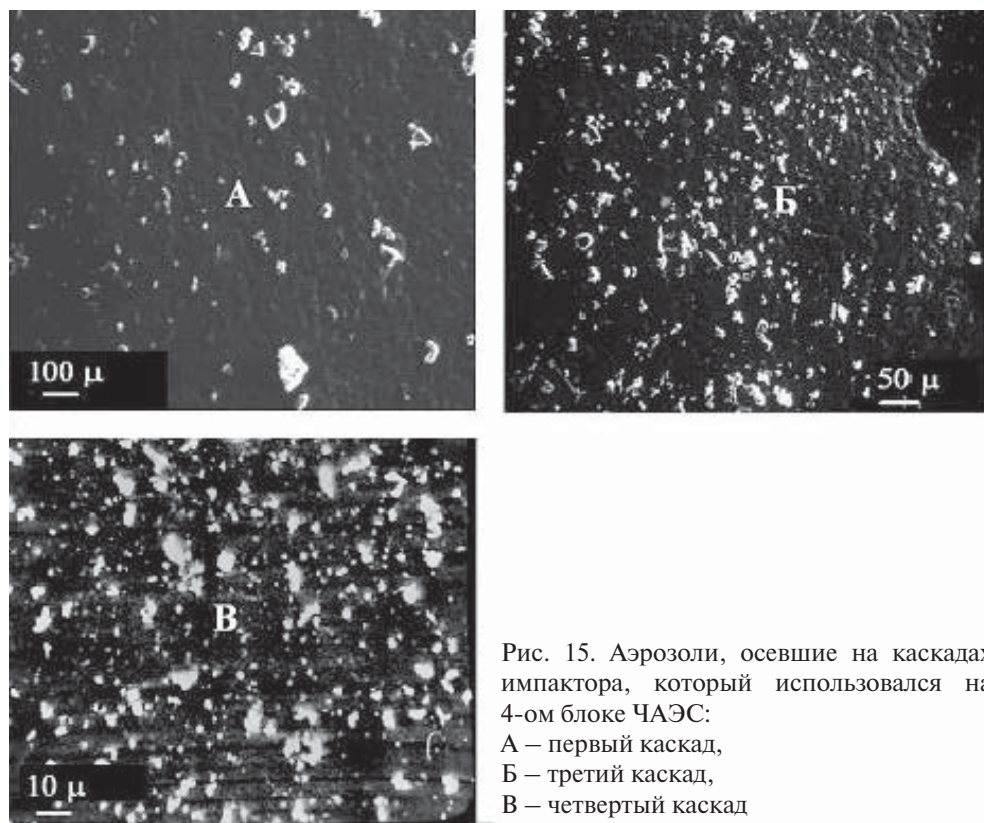


Рис. 15. Аэрозоли, осевшие на каскадах импактора, который использовался на 4-ом блоке ЧАЭС:
А – первый каскад,
Б – третий каскад,
В – четвертый каскад

Поэтому для оценки доз внутреннего облучения, которое могли получить работающие на ЧАЭС специалисты, было необходимо знание дисперсности радиоактивных аэрозолей.

Кроме того эти данные требовались для решения еще целого ряда задач, например, для прогнозов пылеподъема и пылепереноса.

При исследованиях дисперсности аэрозолей чаще всего использовались многокаскадные импакторы (см. рис. 15). К их недостаткам можно отнести довольно низкий расход воздуха через импактор – обычно не более 100 л/мин, что требует увеличенного времени пробоотбора при низких концентрациях радионуклидов в воздухе

Второй метод, который применялся для определения дисперсности РАУ это – метод многослойных фильтров. Он был разработан в НИФХИ на основе фундаментальных и прикладных исследований механики аэрозолей и свойств тонковолокнистых фильтрующих материалов (см., например, [13, 21, 22]).

Упрощенная схема получения результата выглядела так.

В процессе пробоотбора воздух с высокой линейной скоростью, при которой доминирует эффект инерционного осаждения частиц на волокнах материала, проходил через специально подобранную систему фильтров, обладающих заданными свойствами. Крупные частицы задерживались преимущественно лобовым фильтром, мелкие – с некоторыми потерями достигали конечного фильтра и удерживались им.

Измерялась активность фильтров и результаты подвергались специальной математической обработке.

В предположении о логнормальном распределении активности аэрозоля по диаметрам частиц, получали численные значения параметров распределения: АМАД и СГО²¹.

Метод позволял оперативно определять активность РАУ в воздухе и оценивать параметры их логнормального распределения. К его недостаткам можно отнести априорное предположение об одномодальном, логнормальном характере распределения аэродинамических диаметров РАУ (что не всегда соблюдается), и зависимость эффективности улавливания частиц по механизму зацепления не от аэродинамического, а от геометрического диаметра частиц, что в случае «тяжелых» топливосодержащих частиц может привести к некоторому занижению медианного значения АМАД.

В практике специалистов НИФХИ им. Л.Я. Карпова – разработчиков этого метода – в первом слое используют материал с сопротивлением 0,1÷0,2, а во втором – 0,2÷0,4 мм вод. ст. Сопротивление трехслойной композиции лишь на 20% больше, чем фильтров АФА РМП и, следовательно, незначительно сказывается на скорости пробоотбора.

Для определения аэродинамических диаметров ГТЧ сотрудниками КИ применялся и комбинированный метод, который позволял *определять диаметр, плотность и активность аэрозолей*, осажденных на воздушных фильтрах из ткани Петрянова.

(Чаще всего это были респираторы участников разведывательных групп).

После сжигания зольный остаток фильтра помещался в седиментационную²² среду (этиленгликоль). Происходило распределение частиц по высоте седиментационного столба. Жидкость сливалась по слоям, которые фильтровались через фильтры из ткани Петрянова. Каждый фильтр промывался водой, освещался в парах ацетона и контактно экспонировался с рентгеновской пленкой.

После проявления пленки в центрах пятен почернения делались отверстия диаметром около 0,3 мм, которые ограничивали поле зрения микроскопа при наблюдении частиц. Активности частиц, находящихся на вырезанных фрагментах фильтра определялась на жидко сцинтилляционном счетчике (ПСД) в 4-π геометрии.

Установка ПСД-1 [23] представляла собой низкофоновый α-, β-спектрометр (рис. 16). Основным его назначением являлось измерение низких уровней загрязнения α-активными радионуклидами объектов окружающей среды.

Для выделения сигналов от α-частиц в установке применялся способ селекции сигналов детектора ионизирующих излучений по форме сцинтилляционного импульса.

Основными достоинствами данного метода была высокая эффективность и возможность обнаружения малых α-активностей в условиях значительного внешнего γ-фона.

²¹СГО – стандартное геометрическое отклонение.

²²Седиментация (осаждение) — оседание частиц дисперсной фазы в жидкости или газе под действием гравитационного поля или центробежных сил.

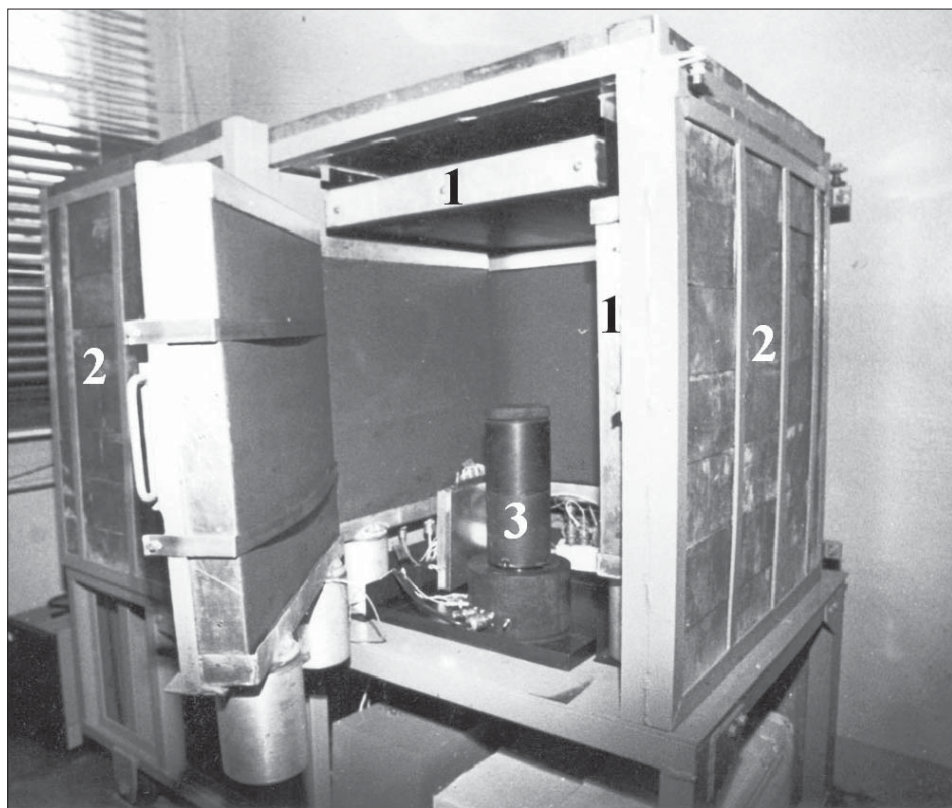


Рис. 16. Установка ПСД-1: 1 — активная защита; пластины из сцинтилляционного пластика, просматриваемого 4-мя ФЭУ; 2 — пассивная защита; свинец, борированный полиэтилен; 3 — регистрирующая часть; кювета с жидким гелем, ФЭУ

Исследуемое радиоактивное вещество вводилось в жидкий сцинтиллятор (для горячих частиц — гель высокой плотности), который и служил детектором.

Конструктивно установка была выполнена в виде защитного домика, внутри которого располагалась система активной защиты и детектирующий блок. Электронные блоки обработки информации, блоки питания и многоканальный амплитудный анализатор находились снаружи защитного домика.

Измерения спектров альфа- и бета-излучения частица проводилось ПСД одновременно. На рис. 17 и 18 показаны примеры измеренных спектров.

10.4.6. Микроскопическое строение и элементный состав ГТЧ

Именно исследования микроскопического строения и элементного состава горячих частиц позволили окончательно определиться с процессами, при которых происходили их образование во время активной стадии аварии.

Основные работы в этом направлении были выполнены специалистами РИ, КИ, МНТЦ, УкрНИИСХР, IPSN (Сакле, Франция) и рядом других учреждений (см., например, [24–32]).

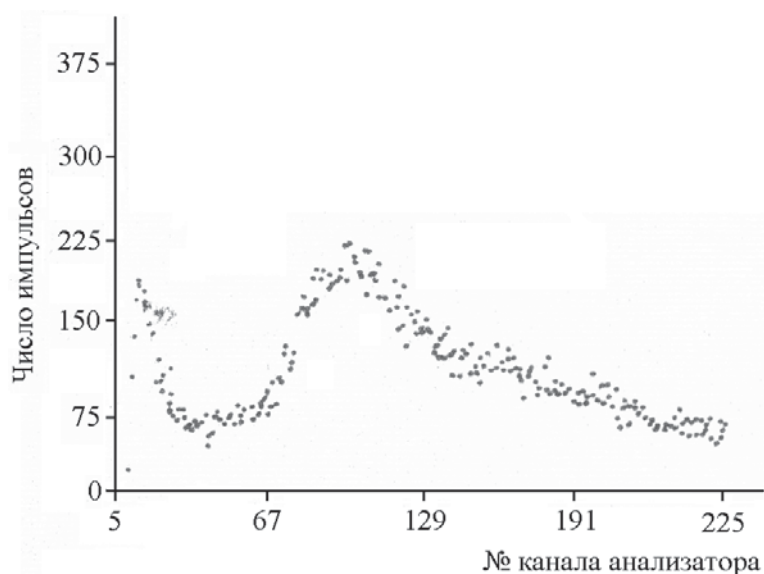


Рис. 17. Альфа-спектр ГТЧ, полученный на установке ПСД

Для проведения исследований использовались такие методы, как рентгеноспектральный микроанализ и растровая электронная микроскопия²³.

Ряд микрофотографий горячих частиц был приведен выше. В настоящем разделе приводятся еще несколько таких фотографий, взятых из работ специалистов различных исследовательских институтов.

На рис. 19 и 20 представлены фотографии, полученные при значительных увеличениях.

Интересные снимки были получены в работе ИФТТМТ ННЦ Харьковского Физико-технического института. В ней изучались горячие частицы, находящиеся на бетонных и металлических стенах помещений «Укрытия».

²³Метод растровой электронной микроскопии основан на принципе регистрации вторичных электронов, возбужденных ускоренным и сфокусированным электронным пучком (зондом) диаметром от 5 нм до 10 нм, сканирующим по поверхности исследуемого объекта.

Количество вторичных электронов зависит от угла падения зонда на поверхность, что позволяет отобразить на экране видеоустройства топографическое изображение исследуемого объекта.

Одновременно в локальной зоне взаимодействия зонда с образцом объемом от порядка 1 мкм³ возбуждается характеристическое рентгеновское излучение находящихся в ней элементов, которое регистрируется специальными спектрометрами.

Применение спектрометров позволяет делать качественный и количественный анализ элементов от В до U и получать сканограммы распределения элементов в поверхностном слое соответствующего топографического изображения исследуемого объекта.

Данным методом обычно исследуют частицы размером от 0,5 мкм до 100 мкм, находящиеся на массивных подложках, при увеличении от 30 до 10 000 крат.

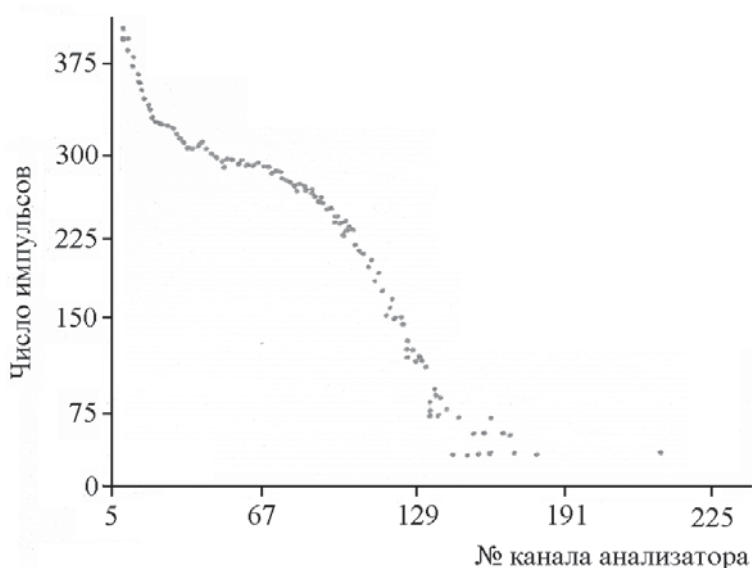


Рис. 18. Бета-спектр ГТЧ, полученный на установке ПСД

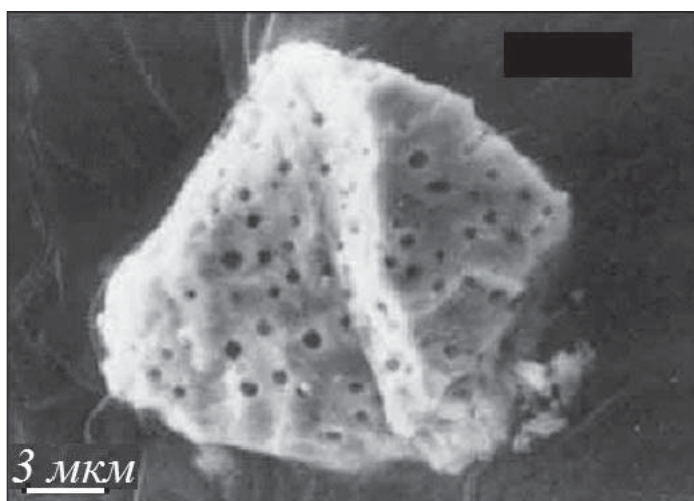


Рис. 19. Фотография ГТЧ при значительном увеличении

Они снимались с поверхностей на специальные клеящиеся пленки или с помощью взятия мазка [31]²⁴. В работе использовался аналитический электронный микроскоп, оснащенный сканирующей приставкой и рентгеноспектральным энергодисперсионным Si–Li-детектором. Одна из микрофотографий нескольких таких частиц представлена на рис. 21.

Горячие частицы, выпавшие в непосредственной близости от разрушенного блока, изучались в работах РИ (рис. 22).

²⁴Интересно, что в этой работе на стенах обнаружены мелкодисперсные частицы Рб. «Их наличие на поверхностях объекта «Укрытие» связано, по-видимому, с результатом аэрозолирования засыпавшегося в горящий реактор свинца» [31].

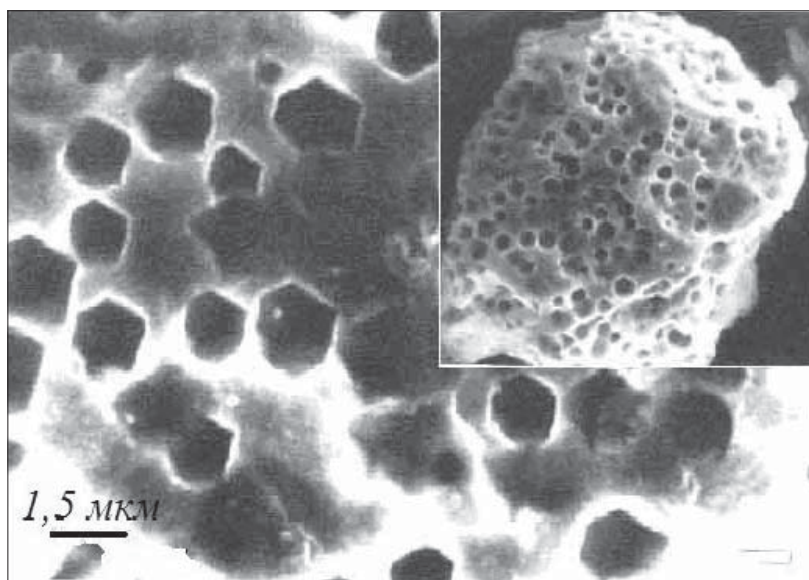


Рис. 20. Фотография ГТЧ при значительном увеличении

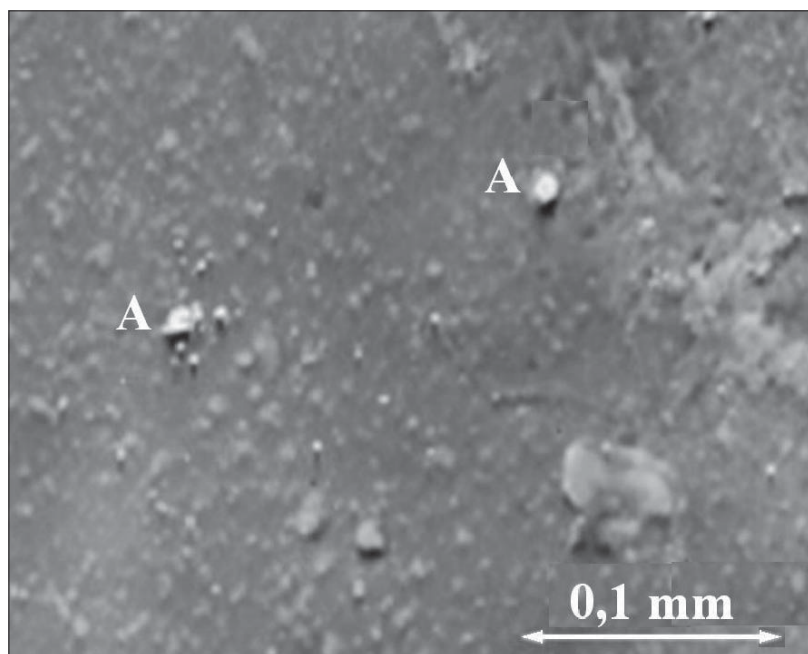


Рис. 21. Структура поверхности пленки с экстрагированными со стены объекта «Укрытие» частицами (яркие частицы «А» — частицы топлива)

В 1987–1989 гг. сотрудниками УкрНИИСХР совместно с НЦ МО СССР и ВНИИТФА были проведены масштабные исследования «горячих частиц», извлеченных из почвы 10-ти километровой зоны, вблизи ЧАЭС [32].

Путем сканирования дозиметром тонкого почвенного слоя было выделено порядка 1200 «горячих частиц» размером >10 мкм и активностью >100 Бк.

В работе отмечается, что по мере удаления от ЧАЭС доля топливной компоненты в выпадениях падала, менялся и дисперсный состав «горячих частиц».

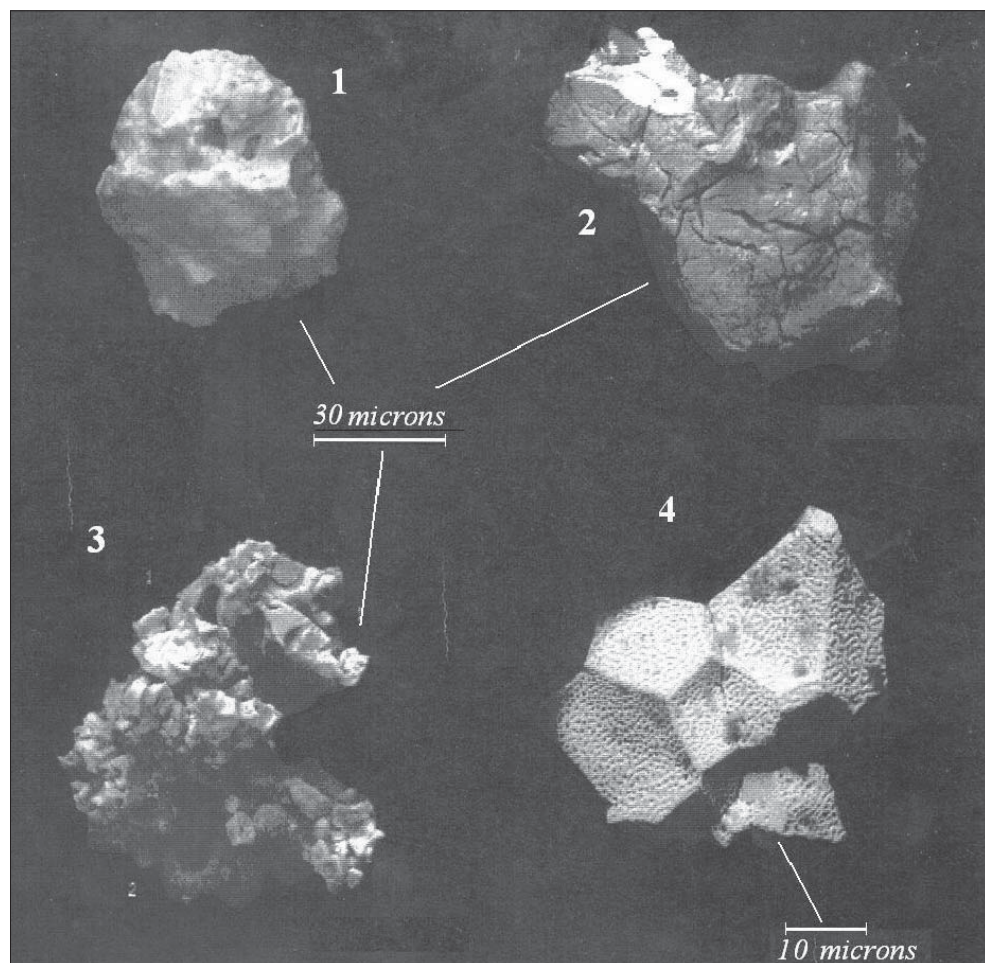


Рис. 22. Разновидности ГТЧ, выброшенных на площадку 4-го блока: 1, 2, 3 — частицы, содержащие топливо и конструкционные материалы; 4 — топливная частица

Так на расстояниях более 10 км от реактора практически не встречаются частицы размером более 10 мкм.

Мы приводим несколько фотографий наиболее характерных частиц из базы данных УкрНИИСХР (рис. 23 и рис 24), взятые из работы [19].

Фотографии на рис. 23 получены с помощью электронной микроскопии в Норвежском сельскохозяйственном университете (NLH), фото **a**, **b**, **c** и Институте ядерной безопасности и радиационной защиты (IPSN, Франция), фото **d**, **i**, **f**.

Автор работы [19] следующим образом комментирует приведенные снимки.

«Эти частицы образовались в первые секунды аварии при механическом разрушении топлива и были выброшены преимущественно в западном направлении.

Представляют собой кусочки ядерного топлива с хорошо выраженной «зернистой» структурой, либо отдельные зерна (кристаллиты) UO_2 , что обусловлено технологией производства топлива.

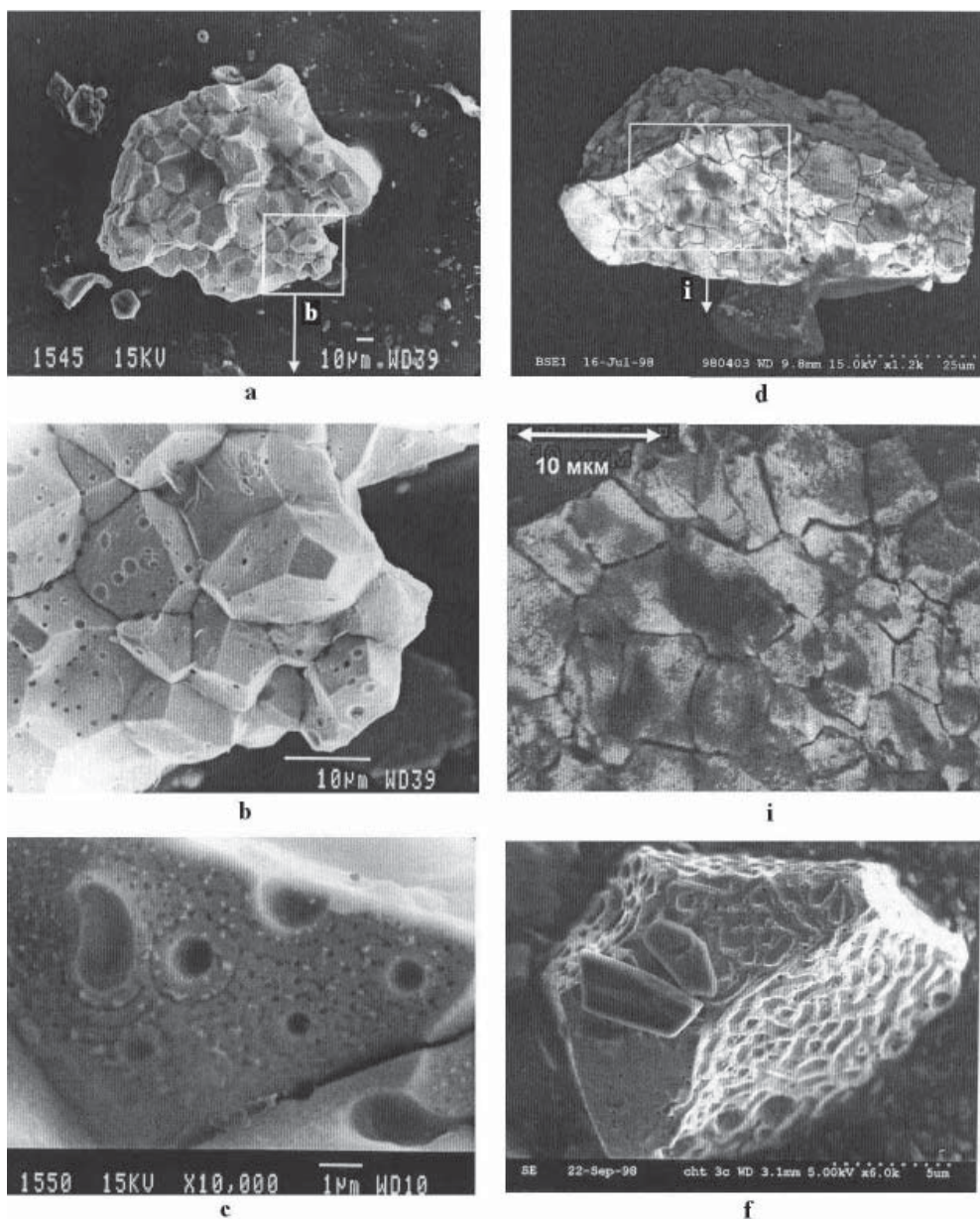


Рис. 23

Разрушение облученного ядерного топлива во время Чернобыльской аварии происходило преимущественно по границам зерен до исходных кристаллитов размером около 10 мкм.

Внешний вид слабо трансформированных во время аварии чернобыльских топливных частиц даже после достаточно длительного их нахождения в почве (до 12 лет) практически не отличается от частиц реального облученного ядерного топлива сразу после окончания его эксплуатации.

Это указывает на крайне малую скорость растворения их в окружающей среде.

На фото **b** видны пузырьки, образовавшиеся в результате диффузии и скопления газообразных продуктов деления во время эксплуатации ядерного топлива при температуре 1300–17 000 К.

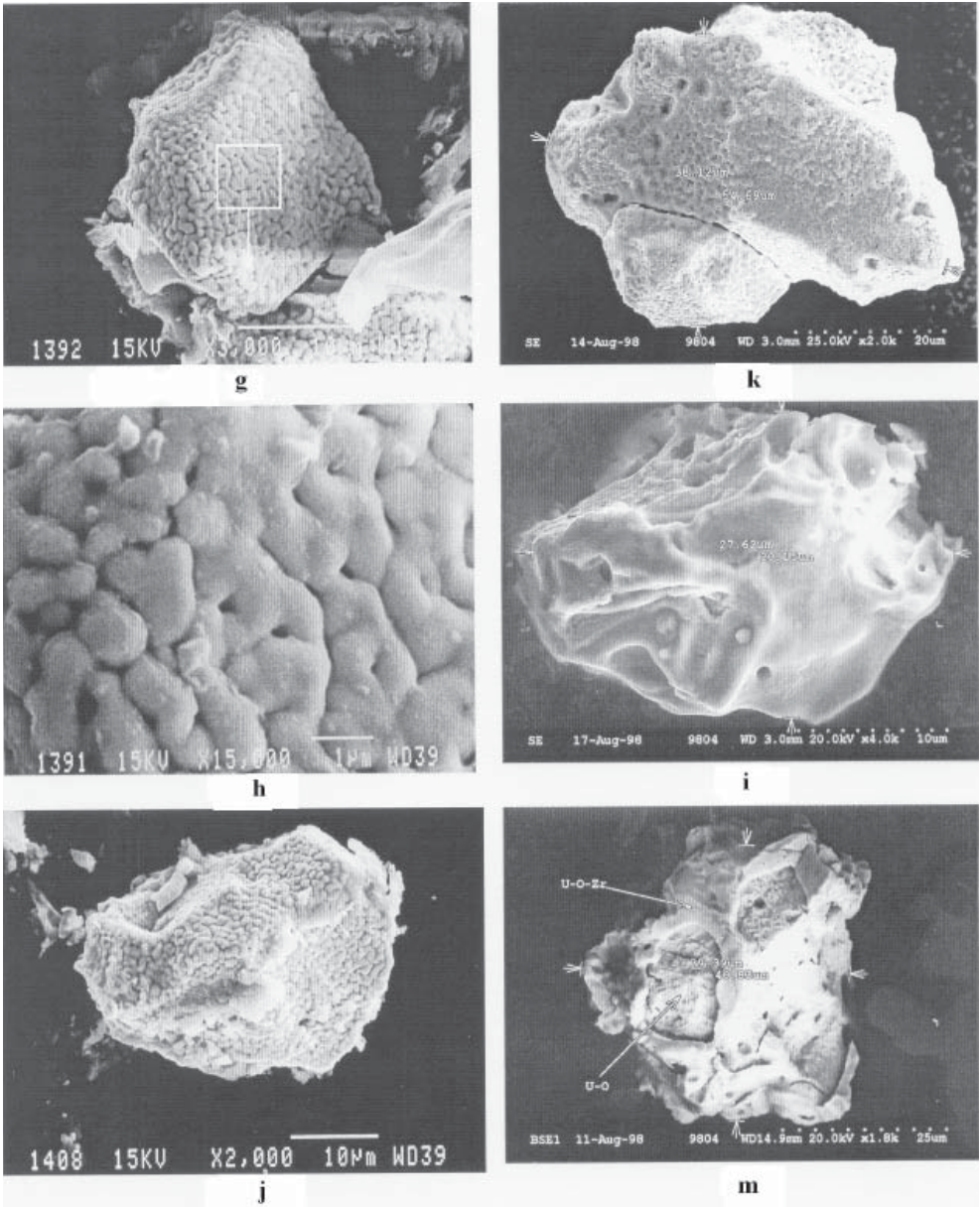


Рис. 24

При более высоких температурах наблюдается миграция самих пузырьков по пространству между зерен и их слияние, что приводит к специфическому рисунку поверхности (фото f).

Структура поверхности зерна определяется тем, из какой части топливной таблетки образовались частицы: наиболее нагретой центральной – (фото f), промежуточной (фото a, b) или слабо нагретой – внешней (фото d, i)».

На следующем рисунке (рис. 24) представлены фотографии топливных частиц также полученные с помощью электронной микроскопии в Норвежском сельскохозяйственном университете (NLH), фото g-h-j и Институте ядерной безопасности и радиационной защиты (IPSN, Франция), фото k-i-m.

У этих частиц матрица претерпела значительную трансформацию из-за окисления ядерного топлива на воздухе.

«В результате диффузии кислорода в зерно поверхность UO_2 растрескивалась за счет различий плотности и кристаллических решеток разных окислов урана. При высокой аварийной температуре топливо могло частично оплавляться. Оно контактировало с различными конструкционными материалами и материалами засыпки реактора, что привело к образованию сложных химических соединений, особенно на поверхности топливных частиц...»

На фото **m** представлена топливная частица (UO_2), окруженная циркониевым сплавом (U-O-Zr). Похожая частица на фото **i** содержит мелкие (1–2 мкм) сферические «рутениевые» частицы» [19].

10.4.7. Растворимость ГТЧ в имитаторе легочной жидкости

Попадая в дыхательные пути, ГТЧ подвергаются действию органических жидкостей и могут растворяться. При этом различные радионуклиды переносятся по организму и накапливаются в различных его органах. Примером могут служить растворимые соединения плутония, которые накапливаются на поверхности костей и могут создавать там дозу, большую, чем в легких.

Это заставляет при оценке биологической опасности таких частиц рассчитывать эффективную дозу, которая учитывает вклад от облучения самых различных органов.

Эксперименты по растворимости ГТЧ проводились в различных лабораториях.

После первых результатов (см., например, [33]), полученных в КИ, к ним неоднократно возвращались в более поздних работах (см. [32], [34–38]).

Использовались разные методики и различные составы, которые имитировали легочную жидкость.

В следующей Главе (раздел 11.2.3) будут рассмотрены результаты некоторых из этих работ.

10.5. Опасность горячих топливных частиц, попавших в дыхательные пути

Совокупность проведенных исследований, в которых были получены данные об радионуклидном составе, аэродинамических свойствах, растворимости ГТЧ позволили специалистам ответить на вопрос об их реальной опасности, в случае попадания в дыхательные пути.

Было выяснено, что опаснее – радиоактивность, равномерно распределенная по объему дыхательных путей и легких или такая же радиоактивность, сосредоточенная, как точечный источник излучения в горячей частице (естественно, с учетом ее особенностей)²⁵.

²⁵Следует отметить, что при поступлении в легкие большого количества радиоактивных частиц зоны их воздействия перекрываются и разница пропадает.

Этот вопрос особенно остро встал перед сотрудниками КЭ в 1988 г., после начала работ во внутренних помещениях объекта «Укрытия» (см. Главу 11).

Ответ на него, сначала на качественном уровне, потом с необходимыми уточнениями был получен в работах специалистов институтов Биофизики, УкрНИИСХР и ряда других исследовательских институтов (см., например, [19], [37], [39–43] и др.).

Для подробного ознакомления с проведенными расчетами и исследованиями мы отсылаем читателей к работе [19], раздел «6.2.2 Методы оценки дозовых нагрузок при ингаляционном поступлении топливных частиц».

Здесь же приведем основной вывод:

«дозовые нагрузки от горячих частиц не оказывают большего радиологического действия по сравнению с однородным распределением активности в органе» [19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровой А.А., Гагаринский А.Ю. Выброс радионуклидов из разрушенного блока Чернобыльской АЭС. Атомная энергия, т. 90, вып. 2, 2001 г., с. 137–145.
2. Организация и ведение воздушной радиационной разведки при крупных радиационных авариях. В сборнике «Москва – Чернобылю», кн.1, Москва, Воениздат, 1998, с. 89–98.
3. Римский-Корсаков А.А., Федотов П.И., Дубасов Ю.В. и др. Исследование выброса аварийного реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС. Труды Радиового института им. В.Г. Хлопина, т. XIV, 2009, с. 10–22.
4. Borovoi A.A. Fission product and transuranic release during Chernobyl accident (to be presented at International Conference «The fission of nuclei – 50 years», Leningrad 1989). Препринт КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова, Чернобыль, 1990, 20 стр.
5. Belayev S., Borovoi A. et al. Radioactivity Releases from the Chernobyl NPP Accident, International Conference Comparison of Consequences of Three Accidents: Kyshtim, Chernobyl, Windscale. Luxembourg, October 1–5, 1990.
6. Belyaev S., Borovoi A.A., Demin V. et al. The Chernobyl source term. p. 71–91 in: Proceedings of Seminar on Comparative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtim, Windscale, Chernobyl. EUR 13574 (1991).
7. Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ (25–29 августа 1986 г., Вена). ГКИАЭ, август, 1986.
8. Владимиров В.А., Малышев В.П. Итоги преодоления последствий Чернобыльской катастрофы. Чернобыль. Долг и мужество. Под ред. А.А. Дьяченко. М.: 4-й филиал Воениздата, 2001, Т. 1, с. 283–327.
9. Борисов Н.Б., Вербов В.В., Кадров Г.А. и др. Состав и концентрации газо-аэрозольных радиоактивных веществ над развалом IV блока ЧАЭС и в дальней зоне в мае 1986 г. Чернобыль. Долг и мужество. Под ред. А.А. Дьяченко. М. 4-й филиал Воениздата. 2001, Т. 1, с. 11–17.
10. Devell L., Tovedal H., Bergstrom U. et al. Initial observations of fallout from the reactor accident in Chernobyl. Nature, v. 321, 1986 – p. 192–193.

11. Interim report on fallout situation in Finland from April 26 to May 4 1986. Finnish centre for radiation and nuclear safety. Finland. May 1986, STUK-B-YALO 44, 38 p.
12. Проведение работ по засыпке реактора и пылеподавлению на бывшем 4-ом энергоблоке ЧАЭС и прилегающей к нему территории. Акт 09/05-93 от 16.09 96 г. Отв. исполнитель Симановская И.Я.
13. Огородников Б.И., Пазухин Э.М., Ключников А.А. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» 1986–2006 гг., НАНУ ИПБ АЭС, Чернобыль, 2008, 455 с.
14. Гаврилин Ю.И. Последствия развития двух сценариев на Чернобыльской АЭС. Бюллетень по атомной энергии, № 8, 2001 г., с. 20–28.
15. Левашев Д. К юбилею трагедии, о работе ученых на ЧАЭС. <http://www.bellona.ru/enwl/Archive/1237843917.64/1240611792.49>
16. Васильев С.К., Петров Б.Ф., Плещачевский Л.А. Комплекс работ лаборатории радиометрии Радиового института в Чернобыле июнь–ноябрь 1986 г. Труды Радиового института им. В.Г. Хлопина т. XIV, 2009, с. 23–45.
17. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П., Ключников А.А. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. Москва, Наука, 2010, 240 с.
18. Сбор, верификация и оценка существующей информации об аэрозолях в помещениях объекта «Укрытие». План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие». Отчет SIP AOS 01 1 DKA 01 01. Консорциум КИ НИИ РЗ. Рук. проекта А.А. Боровой. 2004 г., 148 с.
19. Кашпаров В.А. Оценка и прогнозирование радиоэкологической обстановки при радиационных авариях с выбросом частиц облученного топлива (на примере аварии на Чернобыльской АЭС). Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. Киев, 1999, 389 с.
20. Богатов С.А., Лебедева Л.И., Левина Л.А. и др. Физико-химические характеристики радиоактивных аэрозолей во внутренних помещениях «Саркофага». Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова, ИАЭ-5435/3, Москва, 1991 г., 24 с.
21. Боголапов Н.В., Кашенко Н.И., Константинов И.Е., Огородников Б.И. Метод исследования дисперсного состава радиоактивных аэрозолей в приземном слое атмосферы. Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 14. М., Атомиздат, 1975. с. 136–137.
22. Будыка А.К., Константинов И.Е., Максимов В.Ю., Скитович В.И. Усовершенствование метода пакета фильтров для массовых измерений дисперсного состава радиоактивных аэрозолей. В кн. Радиационная безопасность и защита АЭС. Вып. 11. М., Энергоатомиздат, 1986, с. 106–108.
23. Боровой А.А., Левина Л.А., Олейник С.В. и др. Низкофоновый жидкостинтиляционный α -, β -спектрометр. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова, ИАЭ-4981/2, Москва, 1989, 21 с.
24. Андерсон Е.Б., Бураков Б.Е., Шашуков Е.А. Изучение физико-химических свойств топливосодержащих масс объекта «Укрытие». Отчет о НИР по договору № 03-63/92, НПО РИ № 4320И. С. Петербург, 1992, 32 с.
25. Пазухин Э.М. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока чернойбыльской АЭС топография, физико-химические свойства, сценарий образования. Радиохимия, т. 36, вып. 2, 1994, с. 97–142.
26. Ushakov V.S., Burakov B.E., Andersen E.B. Interaction of UO_2 and zircaloy during the Chernobyl accident. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. (1997), 465 (Scientific Basis for Nuclear Waste Management XX), p. 1313–1318

27. Исследование взаимодействия топлива с конструкционными материалами в объекте «Укрытие». Обобщающий отчет по договору 39-901/63-16-2-1, № 11.07/285 от 13.12.91. Радиевый институт им. В.Г. Хлопина. Чернобыль — Санкт-Петербург, 77.
28. Examination of Chernobyl samples impact on the accident scenario understanding. Отчет IPSN MARS 1993, 102 с.
29. Teterin Yu.A., Baev A.S., Bogatov S.A. X-Ray photoelectron study of samples containing reactor fuel from «lava» and products growing on it which formed at Chernobyl NPP due to the accident. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* v. 68, 1994, P. 685–694.
30. Бураков Б.У., Пазухин Э.М., Николаева Л.Д. и др. Исследование взаимодействия топлива с конструкционными материалами в объекте «Укрытие». Отчет МНТЦ «Укрытие», №11-07/16, 1992.
31. Бородин О.В., Брык В.В. Исследование частиц, экстрагированных на пленочные пылеподаватели и мазки объекта «Укрытие» ВАНТ Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (80), №4, 2001, с. 72-75.
32. Кашпаров В. А. Радиоактивное загрязнение зоны отчуждения ЧАЭС топливными частицами и их радиологическая значимость. Проблемы безопасности атомных электростанций i Чернобиля. Чернобыль, 2005, Вып. 3, Ч. 1, с. 61–69.
33. Богатов С.А., Боровой А.А., Дворецкий В.И. и др. Исследования устойчивости наиболее радиологически опасных радионуклидов в различных формах топливного выброса при чернобыльской аварии. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова, ИАЭ-5022/3. Москва, 1990, 17 с.
34. Kashparov V.A., Protsak V.P., Yoschenko V.I., Watterson J.D. Inhalation of Radionuclides During Agricultural Work in Areas Contaminated as a Result of the Chernobyl Reactor Accident. *J. Aerosol Science*, 1994, v. 25, No 5, p. 761–767.
35. Кашпаров В.А., Иванов Ю.А., Зварич С.И. и др. Определение скорости растворения чернобыльских топливных частиц в естественных условиях. *Радиохимия*. 1997, т. 39, вып. 1, с. 71–76.
36. Кашпаров В.А., Йошенко В.И., Зварич С.И. и др. Оценка класса растворимости чернобыльских радиоактивных аэрозолей при ингаляции. *Радиохимия*. 1997, т. 39, вып. 1, с. 11–19.
37. Гаргер Е.К., Саженьюк А.Д., Одинцов А.А. и др. Оценка констант скорости растворения in vitro радиоактивных топливных частиц. *Радиационная биология. Радиоэкология*, 2004 г., т. 44, № 2, с. 229–235.
38. Одинцов А.А., Огородников Б.И. Растворимость радиоактивных аэрозолей объекта «Укрытие». Препринт ИПБ АЭС 08-2, Чернобыль, 2008, 16 с.
39. Баев А.С., Богатов С.А., Быховская Л.И. и др. Расчетно-экспериментальное определение дозовых нагрузок на дыхательную систему при ингаляции «горячих» частиц для персонала, принимавшего участие в работах по ЛПА на ЧАЭС. Препринт Института атомной энергии им. И.В. Курчатова ИАЭ-5484/14, Москва, 1992, 19 с.
40. Кутьков В.А. и др. Радионуклидное загрязнение воздушной среды в результате аварии на Чернобыльской АЭС и облучение легких. *Патология органов дыхания у ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС*. М. Грант, 1998, с. 10–43.
41. Кутьков В.А., Муравьев Ю.Б., Арефьева З.С., Камарицкая О.И. Горячие частицы — взгляд спустя семь лет после аварии на Чернобыльской АЭС. *Пульмонология*, выпуск 4, 1993, с. 10–19.

42. Технические предложения по системе контроля внутреннего ингаляционного облучения. Отчет ОП ЧАЭС. Объект «Укрытие». Составитель А.К. Сухоручкин. Инв. № 98. Славутич, 1999.
43. Нечаев С.Ю., Лихтарев И.А., Берковский В.Б. и др. Обеспечение радиационной безопасности при работах по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему. Биофизический контроль доз внутреннего облучения персонала. Радиационная гигиена, т. 2, № 1, с. 32–35.

11. ЗАДАЧИ КЭ И ПРОБЛЕМЫ РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ И АЭРОЗОЛЕЙ

11.1. Бурения скважин и строительно-монтажные работы, проводившиеся КЭ

Успешное решение главных задач, поставленных перед созданной в 1987 г. Комплексной экспедицией Института атомной энергии им. И.В. Курчатова, во многом зависело от эффективности принимаемых мер по борьбе с радиоактивной пылью в загрязненных помещениях объекта «Укрытие».

Во-первых, это касалось задач, связанных с поиском и исследованием скоплений ТСМ с помощью бурения скважин.

Результаты разведки помещений, намеченных для установки в них буровых станков, показали, что при аварии мелкодисперсная пыль внедрилась в их стены, потолок, пол, находится в воздухе в виде аэрозолей. Любое движение воздуха, перемещение людей и оборудования, сотрясения здания приводили к дополнительному подъему этой пыли.

Поэтому при подготовке рабочих мест было необходимо провести первоначальную очистку и дезактивацию рабочих помещений, достигнуть приемлемого значения МЭД внешнего излучения и приемлемых значений концентраций радиоактивных аэрозолей. А затем постоянно контролировать и поддерживать безопасные условия в ходе проведения буровых работ соответствующими контрмерами.

Необходимо было организовать проходку скважин таким образом, чтобы воспрепятствовать выбросу из них радиоактивной пыли в процессе бурения и при извлечении высокоактивных кернов¹.

Наконец, надо было обеспечить защиту от аэрозольной активности на всех этапах перемещения и исследования образцов ТСМ.

Во-вторых, задачей КЭ было выполнение строительных и монтажных работ, которые должны были укрепить ряд конструкций «Укрытия».

При этом требовалось обеспечить безопасность от радиоактивной пыли для сотен работающих.

Чтобы была понятна масштабность и ответственность проведенных работ, мы приведем несколько примеров.

Деаэрационная этажерка и машинный зал

При взрыве реактора конструкции деаэрационной этажерки, расположенные в осях 41-51 выше отметки +38.600 оказались полностью разрушенными (см. раздел 2.1, рис. 4).

Колонны каркаса² между отметками +24.270 и +38.600 отклонились от вертикали в сторону машинного зала на 0.6÷1.1 м (рис. 1). Конструкции каркаса,

¹В помещениях, из которых проводили бурение при обнаружении в кернах ТСМ пробы воздуха для анализа начинали отбираться практически непрерывно.

²Каркас деаэрационной этажерки был сооружен из многоэтажных рам, расположенных с шагом 6 м, из сборных железобетонных элементов.

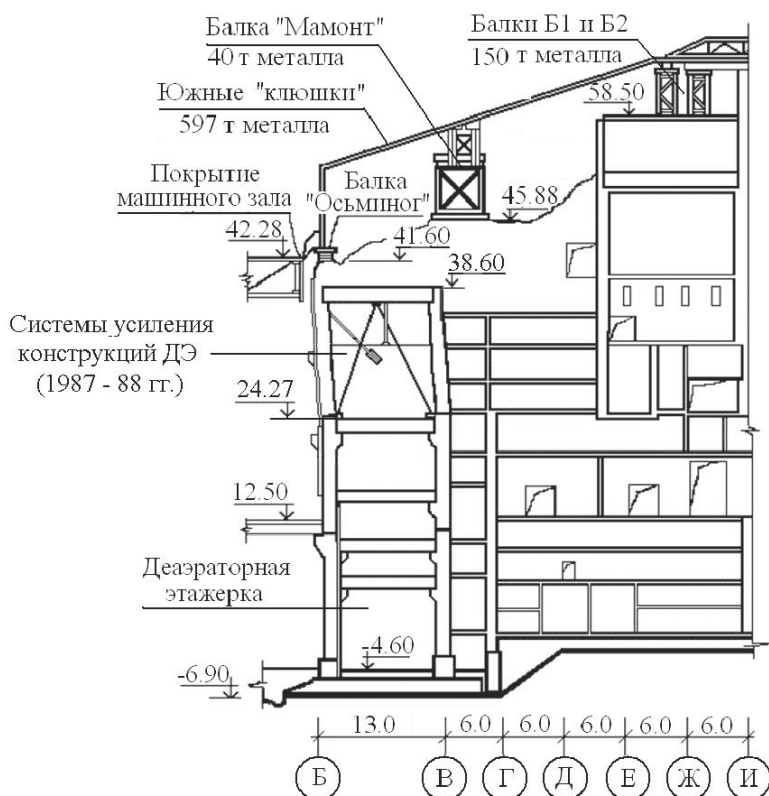


Рис. 1. Схема усиления каркаса ДЭ (южная зона «Укрытия», разрез по оси 50)

расположенные ниже отметки +24.000, существенных повреждений не получили.

В результате вся конструкция находилась в крайне неустойчивом положении, обрушение ее могло повлечь нарушение опор балок «Мамонт» и «Осьминог» и, как следствие, разрушение всех верхних конструкций «Укрытия». Поэтому одной из важнейших задач КЭ стала задача укрепления каркаса ДЭ.

Выполнить эти работы можно было только после очистки и дезактивации восточной части машинного зала (см. рис. 2 и 3).

После выполнения этих работ в пределах машинного зала были возведены разделительно-подпорные стены по осям 41 и 49. Были частично разгружены и усилены колонны и ригели верхних рам ДЭ между осями 41-51, в рядах Б-В.

Вместо металлических блоков, уложенных в 1986 г., над МЗ в осях 41-49 на поврежденные фермы, было выполнено новое покрытие (пространственный металлический блок), опирающееся на вновь возведенные стены (рис. 4).

Это покрытие вместе с разделительными стенами по осям 41 и 49 стало односторонним упором в горизонтальном направлении для каркаса деаэраторной этажерки.

Описанные работы по своему объему и сложности приближались к тем, которые проводились во время строительства «Укрытия»³.

³В пиковые моменты в них участвовало более 3000 специалистов, командированных в КЭ.

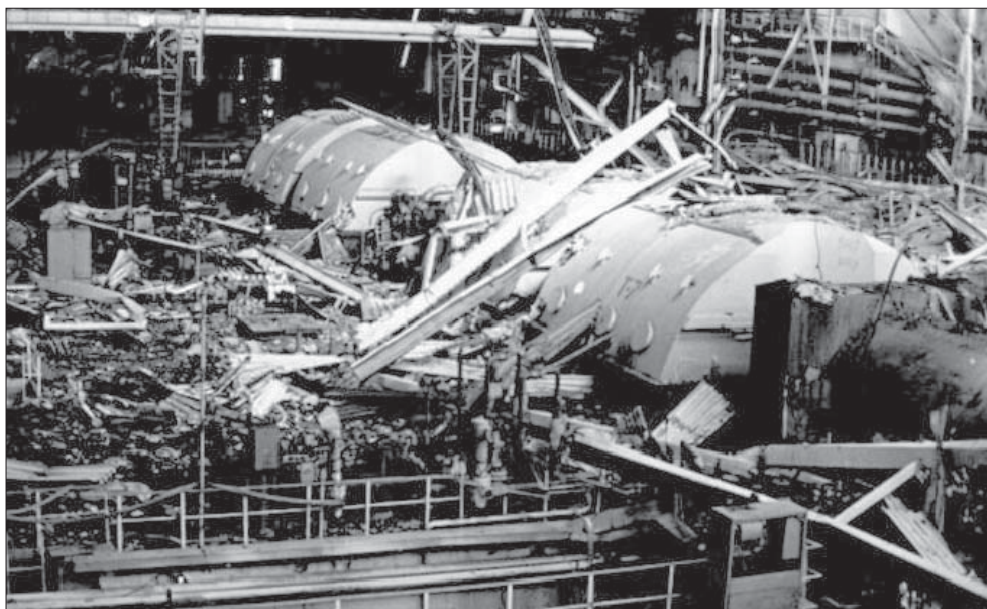


Рис. 2. 1986 г. Машинный зал 4-го блока после аварии



Рис. 3. МЗ после работ по очистке и дезактивации

Помещение (зал) южных ГЦН

По результатам обследования 1988 г., перекрытия в помещениях над южными главными циркулярными насосами были признаны аварийными.

После взрыва из-за отклонения несущих колонн разрушенное верхнее перекрытие могло в любой момент рухнуть с двадцатиметровой высоты.

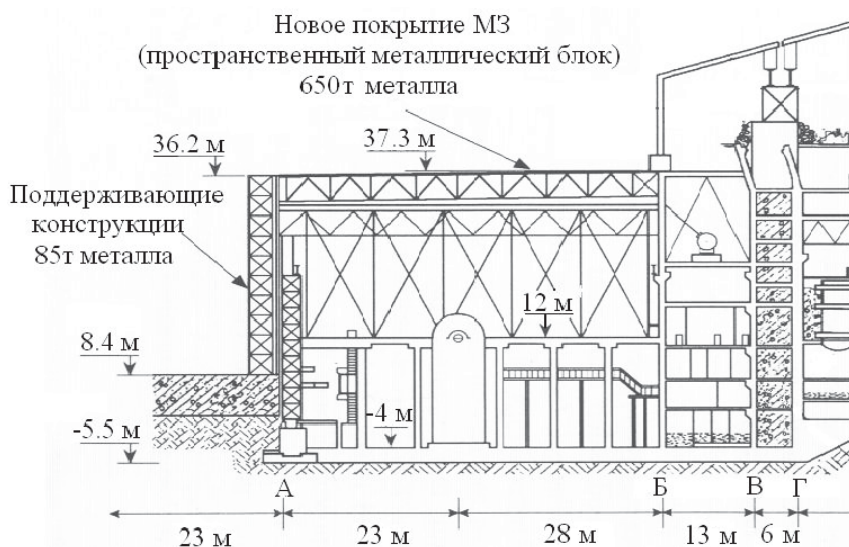


Рис. 4. Схема нового покрытия МЗ и поддерживающих конструкций

Для предотвращения этого было выполнено усиление балок перекрытия с помощью металлических ферм. Они собирались на бетонной площадке в осях 48-50 в пространственные блоки, а затем дистанционно, с помощью лебедки последовательно надвигались по рельсовым путям под ригели по осям 42-47 и подклинивались.

В этом же помещении был построен железобетонный пешеходный тоннель для прохода персонала к юго-восточным помещениям объекта (рис. 5, 6).

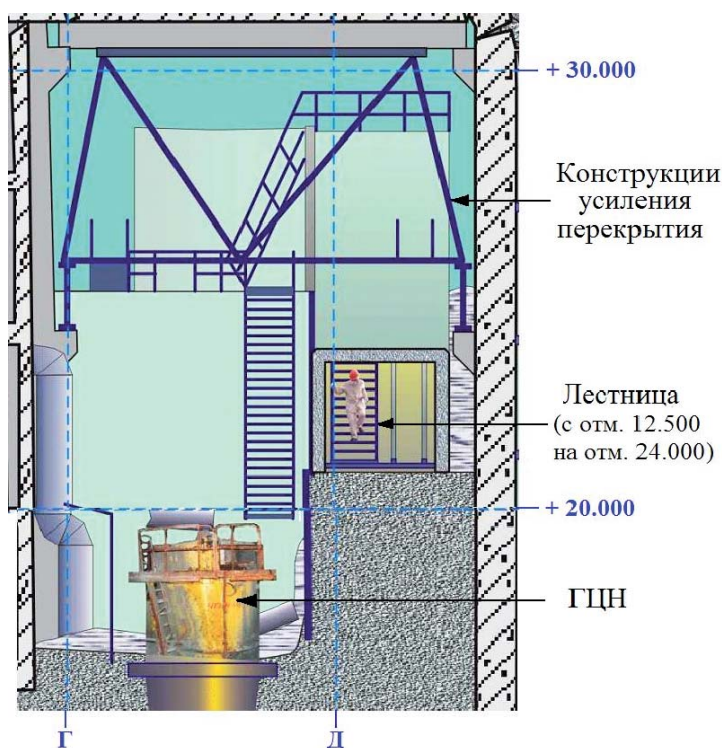


Рис. 5. Схема усиления балок перекрытия в зале южных ГЦН (разрез по оси 46)



Рис. 6. Фрагмент конструкций усиления верхнего перекрытия в зале ГЦН

Балка «Мамонт»

Было произведено усиление опор балки «Мамонт» в осях 50-51 и 41 путем дополнительного бетонирования пустот под перекрытиями ДЭ на всех отметках (см. рис. 1 и рис. 7).

Разделительная стена

Была добетонирована разделительная стена в МЗ между 3-им и 4-ым энергоблоками до высоты на 4 м выше кровли. В МЗ создана дополнительная защитная бетонная стена вдоль ряда А и оси 68 до уровня верха оконных проемов.

Был выполнен и еще целый ряд сложных строительно-монтажных работ.

Для создания и выполнения программы по борьбе с радиоактивными аэрозолями в объекте «Укрытие» Минсредмаш командировал в КЭ высококвалифицированных специалистов. Были привлечены сотрудники АН СССР, АН УССР и др. учреждений. Постоянную помощь оказывал персонал ЧАЭС.

11.2. Исследования аэрозолей в КЭ. 1988–1991 гг. [1–4, 6]

11.2.1. Основные характеристики РАУ

Перед НИО КЭ встала задача — ***исследовать характеристики аэрозольных частиц на месте проведения работ для определения специалистами их реальной опасности и выработке эффективных контрмер.***

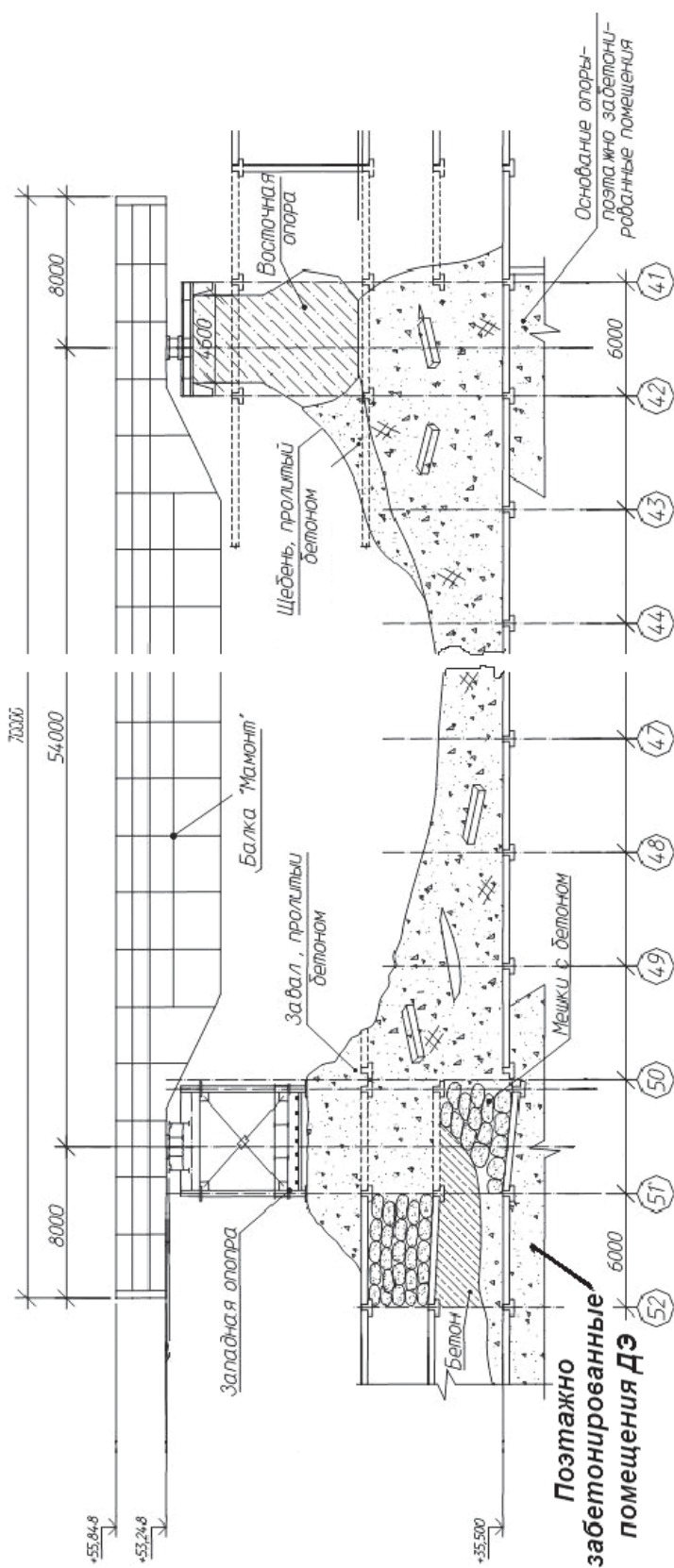


Рис. 7. Схема расположения балки «Мамонт» и ее опор. Указаны места дополнительного бетонирования под западной опорой

В предыдущей главе были рассмотрены методы, которые использовались для решения этих задач. В настоящем разделе будут изложены некоторые результаты исследований, проведенных КЭ, в 1988–91 гг.

Следует отметить, что работа по изучению свойств аэрозолей продолжалась весь период времени деятельности Комплексной экспедиции и потом была продолжена в МНТЦ.

Первым материалом для изучения стали горячие частицы, извлеченных из фильтров респираторов участников разведывательных групп, проникших в загрязненные помещения.

В июле 1988 г. были сделаны предварительные оценки среднего медианного значения активности частиц. Она соответствовала активности «шарика» из топлива 4-го энергоблока с диаметром 1 мкм.

Более точные измерения были выполнены на установке ПСД-1 [4] (см. раздел 10.4.5). После их проведения, извлеченные из сцинтилляционного геля горячие частицы с уже определенной величиной активности — A_β использовались для калибровки рентгеновской пленки.

При этом подтвердилась степенная зависимость диаметра пятна почернения от A_β .

После этого активность частиц определялась по диаметрам пятен почернения на пленке.

Интегральное распределение активностей для 197 аэрозольных частиц, отобранных с четырех воздушных фильтров из разных помещений «Укрытия» приведено на рис. 8.

Сравнение γ -активности фильтра как целого и β -активности, определяемой по пятнам почернения на рентгеновской пленке, позволяло заключить, что активность на изученных фильтрах сосредоточена именно в частицах, т.е. вклад в активность молекулярных форм радионуклидов и частиц меньшего диаметра невелик (менее 20%).

Распределение исследованных частиц по размерам и активностям показано на рис. 9.

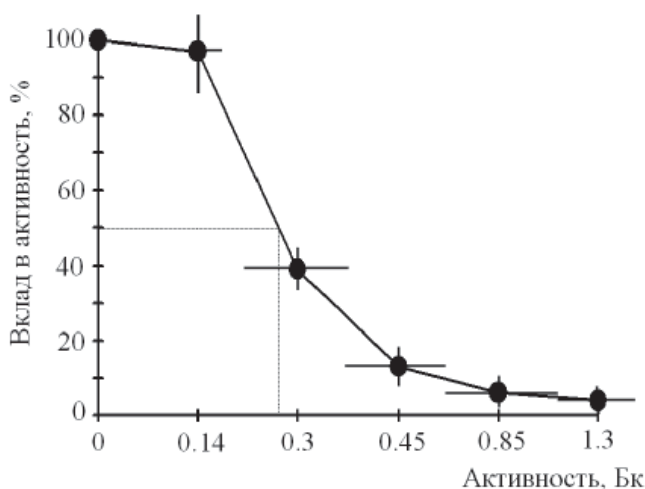


Рис. 8. Интегральное распределение активностей аэрозольных частиц (197 частиц). Медианное значение активности равно 0,27 Бк, что соответствует $2,1 \times 10^{-11}$ г (шарик $\varnothing \sim 1,6$ мкм) UO_2 для среднего состава топлива 4-го блока ЧАЭС на дату измерения — 950 суток после аварии

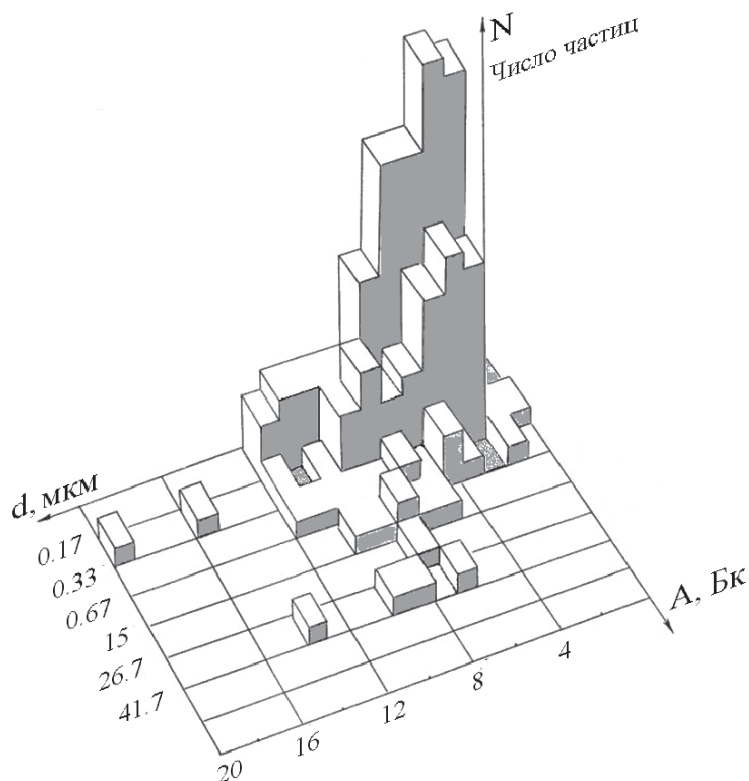


Рис. 9. Распределение частиц в воздушных фильтрах по размерам и активности. Получено в октябре–ноябре 1998 г. (180 частиц)

Это распределение, как по размерам, так и по активности удовлетворительно описывается логарифмически нормальными законами с медианными значениями 5 мкм и $3 \times 10^{-3} \text{ Бк/мкм}^3$ соответственно.

Радионуклидный состав макрообразцов аэрозолей практически совпал с расчетным для топлива 4-го блока с поправкой на распад.

Проведенные эксперименты по изучению распределения по размерам и активности РАУ сыграли важную роль для выработки критериев оценок ингаляционных доз персонала (см., например [3, 5]).

11.2.2. Плотность топливных частиц поверхностного загрязнения (эксперименты 1990 г.) [2]

Этот цикл экспериментов ставил своей целью определение характеристик топливной пыли, находящейся на поверхностях объекта.

Большинство образцов для исследований брались с помощью снятия мазков на специальные бумажные фильтры, которые практически не оставляли золы при сжигании. Мазки снимались с наиболее загрязненных, не подвергавшихся дезактивации поверхностей внутренних помещений «Укрытия», на которых доля «посторонней», т.е. не связанной с выбросом, пыли была минимальной.

После озоления фильтра получалась практически чистая проба поверхностного загрязнения. При микроскопическом исследовании отобранных образцов наблюдались частицы с черной или бурой неровной поверхностью, частицы кварца и частицы в виде металлических «капель».

Далее проводился цикл опытов по определению плотности частиц.

Первые результаты по определению плотности частиц мелкодисперсного выброса были получены по скорости осаждения частиц в тяжелой жидкости (муравьино-малоново кислый таллий, $\rho = 4,2 \text{ г/см}^3$). Результаты определения плотностей фракций частиц со средним диаметром d приведены в таблице 1.

Таблица 1. Средние значения плотностей топливосодержащих частиц

d , мкм	43,4	30,2	19,4	18,0	12,2	8,4	3,5
ρ , г/см ³	9,8	9,9	11,0	8,0	8,3	8,5	8,2

Абсолютная точность определения плотностей оценивается, как $\pm 1 \text{ г/см}^3$.

Проведенный эксперимент позволял выделять из пробы тяжелую (судя по результатам – топливную) фракцию, однако он не позволял определить плотности частиц меньшие, чем плотность седиментационной среды.

Поэтому независимо проводились опыты по измерению плотностей образцов поверхностного загрязнения прямым методом, когда объемы взвешенных порошкообразных образцов измерялись по объемам вытесненной воды.

Средняя плотность макрообразцов составила 5.5 г/см^3 . Дальнейшее разделение по плотностям проводилось при разбавлении жидкости с плотностью $4,2 \text{ г/см}^3$ водой до меньших плотностей: 2, 3 и 4 г/см^3 соответственно, далее определялись доли «плавающих» и «тонущих» фракций образцов.

В таблице 2 даны массовые доли фракций частиц с различной плотностью в макрообразцах.

Таблица 2. Массовые доли частиц с различной плотностью в макрообразцах поверхностного загрязнения

ρ , г/см ³	≤ 2	2–3	3–4	7 ± 3
% в пробе	5,2	10	11,5	75,3

В таблице 3 приведены удельные активности фракций частиц мелкодисперсного выброса (поверхностного загрязнения) с различной плотностью⁴.

11.2.3. Растворимость ГТЧ в различных жидкостях

В предыдущей Главе уже говорилось о том, что биологическая опасность горячих частиц во многом определяется их растворимостью в жидкостях.

⁴Авторы отмечают, что для Cs и Ru цифры занижены, поскольку в процессе обработки (пребывание в воде несколько суток) из образцов в водный раствор переходило около половины активности радионуклидов Cs и около 14% активности ¹⁰⁶Ru.

Таблица 3. Удельные активности фракций мелкодисперсного выброса с различной плотностью (Отобраны 1÷7 Августа 1990 г.), Бк/г

Нуклид	ρ , г/см ³			
	≤ 2	2–3	3–4	7 ± 3
¹⁴⁴ Ce	$1,7 \times 10^6$	$1,6 \times 10^6$	$4,6 \times 10^6$	$1,3 \times 10^7$
¹⁰⁶ Ru	$8,5 \times 10^4$	$3,0 \times 10^5$	$2,2 \times 10^6$	$6,9 \times 10^6$
¹³⁴ Cs	$2,7 \times 10^5$	$1,7 \times 10^6$	$2,9 \times 10^6$	$2,8 \times 10^6$
¹³⁷ Cs	$2,0 \times 10^6$	$1,4 \times 10^7$	$2,5 \times 10^7$	$2,5 \times 10^7$
¹²⁵ Sb	—	$8,6 \times 10^4$	$3,8 \times 10^5$	$7,3 \times 10^5$
¹⁵⁴ Eu	$8,5 \times 10^4$	$9,4 \times 10^4$	$1,8 \times 10^5$	$3,1 \times 10^5$
⁹⁰ Sr	$5,5 \times 10^6$	$7,4 \times 10^6$	$1,5 \times 10^7$	$3,3 \times 10^7$
²³⁸ Pu	$3,0 \times 10^4$	$4,0 \times 10^4$	$7,0 \times 10^4$	$1,5 \times 10^5$
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	$5,1 \times 10^4$	$7,5 \times 10^4$	$1,7 \times 10^5$	$4,2 \times 10^5$
²⁴¹ Am	$1,7 \times 10^4$	$3,5 \times 10^4$	$5,4 \times 10^4$	$7,8 \times 10^4$
²⁴² Cm	$1,1 \times 10^3$	$1,6 \times 10^3$	$2,2 \times 10^3$	$3,5 \times 10^3$
²⁴⁴ Cm	$4,5 \times 10^3$	$5,8 \times 10^3$	$8,3 \times 10^3$	$1,2 \times 10^4$

Следует добавить, что этот параметр важен и для решения других задач, связанных с возможностью миграции радионуклидов, содержащихся в ГТЧ.

Поэтому специалисты КИ и КЭ выполнили ряд исследований по этой проблеме.

В пионерской работе [6] в качестве выщелачивающих агентов использовались следующие растворы, имитирующие воздействие различных природных и биологических сред:

1. 1М раствор ацетата аммония, имитирующий воздействие почвенных солей;
2. 3М соляная кислота, имитирующая воздействие почвенных кислот;
3. 6М соляная кислота, для определения доли прочно фиксированных форм радионуклидов;
4. 0,1М соляная кислота, имитирующая воздействие желудочно-кишечной среды;
5. 0,8% раствор хлорида натрия, имитирующий воздействие альвеолярной ткани легких.

Для исследований использовались образцы «чистого» топлива из сохранившегося фрагмента ТВЭЛ-а, образцы мелкодисперсного выброса в виде мазков из помещений, а также горячие частицы, отобранные из грунта и графитовой крошки из внутреннего помещения блока.

Исследуемые образцы помещали в достаточно большие объемы выщелачивающих агентов и встряхивали в течение 2–3 часов.

Раствор выдерживали ночь, центрифугировали и отделяли от осадка. Операцию выщелачивания повторяли, обе вытяжки использовали для дальнейшего анализа.

Остатки образцов после выщелачивания подвергались полному растворению путем многократной обработки различными кислотами.

Полученные результаты имели достаточно большой разброс, однако указывали на то, что небольшая часть активности растворяется достаточно быстро, а затем процесс замедляется и его скорость становится в сотни раз меньшей.

Авторы связывают это с тем, что процесс перехода, в основном, определяется малой скоростью растворения урановой матрицы. Отмечалось, что при прогнозе выхода радионуклидов из частиц следует учитывать то, что большую часть матрицы образуют трудно растворимый конгломерат с элементами типа Si, Zr и т.п.

Поэтому можно было ожидать, что при более длительном действии ИЛГ ее разрушение будет протекать еще медленнее.

В дальнейшем в КИ, МНТЦ, УкрНИИСХР и в ряде других институтов проводились работы, в которых в лабораторных условиях (in vitro) определялся класс растворимости ГТЧ (F, M, S)⁵. В том числе с использованием растворов имитирующих легочную жидкость (ИЛЖ)⁶ (см., например, [5, 7–12] и др.).

В обобщающей работе [5] приводится анализ результатов исследования растворимости в ИЛЖ частиц, отобранных в 1995 г. на фильтры, при производстве сельскохозяйственных работ в 4 км от ЧАЭС. Эксперименты проводились для двух фракций частиц: (1–10) мкм и более 10 мкм.

Было показано, что «снижение содержания радионуклидов в составе твердой фазы со временем для обеих фракций удовлетворительно описывается двухэкспоненциальной зависимостью:

$$Q = A_1 \exp(-0/693t/T_1) + A_2 \exp(-0/693t/T_2)$$

где Q – содержание радионуклида в частице в момент времени t в % от исходного, T_1 и T_2 – периоды полувыведения радионуклида из состава частицы в раствор».

Характерные значения параметров T_1 и T_2 составляют, для первого – десятки часов, для второго – годы. Соответственно величина A_1 лежит в интервале от долей % до нескольких %, а A_2 – (80÷99)%. Все параметры сильно зависят от вида радионуклидов и размеров частиц.

В Выводах работы [5] говорится: «...*чернобыльские топливные частицы имеют очень низкую растворимость в имитаторе легочной жидкости. Это позволяет при рассмотрении вопроса о радиологической значимости их ингаляционного поступления в организм ограничиваться только их воздействием на легкие и не принимать в рассмотрение переход радионуклидов из состава частиц в другие органы.*

Однако степень растворения ТЧ в легочной жидкости сильно увеличивается для высших окислов урана. Поэтому для каждой конкретной аварийной ситуации необходимо знание дисперсного состава и класса растворимости ТЧ...».

⁵По скорости растворения в жидкостях организма радиоактивные материалы, поступившие из дыхательных путей, разделяют на три класса. Растворяющихся с высокой (F), средней (M) и низкой (S) скоростью.

⁶Основным компонентом этого водного раствора является хлорид натрия (8.5 г/л). В нем содержатся также гидрокарбонат натрия и другие компоненты. Свежеприготовленный раствор имеет слабощелочную среду с pH 8,5.

В исследованиях [8–9] авторы приходят к близкому заключению – «горячие» частицы могут быть квалифицированы как труднорастворимые при ингаляционном поступлении в дыхательную систему человека». Следует отметить, что эти частицы также отбирались вне объекта «Укрытие», в г. Припять (~3 км от ЧАЭС).

В ИПБ АЭС проводились и эксперименты по растворимости в ИЛЖ горячих частиц, отобранных непосредственно в помещениях объекта «Укрытие». В работе [10] из большого массива проб были отобраны аэрозольные фильтры, которые экспонировались 31.08.2005 и 01.09.2005 г. в помещении 4004/2. Измерения показали, что значительное количество ^{137}Cs – (35–50)% переходит в раствор ИЛЖ в первые 7 дней проведения эксперимента. Скорее всего, это происходит за счет растворимости конденсационных аэрозольных частиц обогащенных ^{137}Cs и обладающих более высокой растворимостью, чем топливные частицы.

В последующие периоды скорость растворения цезия значительно снижается и через 36 суток процесс растворения по-видимому регулируется диффузией из внутреннего объема крупных горячих частиц на их поверхность.

Растворимость ^{90}Sr в ИЛЖ за это время составляет – (3–5)%.

Степень растворимости ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ еще ниже – (1,0–1,5)%, а ^{241}Am – (0,3–0,5)%.

Ниже приводятся рисунки 10 и 11, взятые из работы [10]. На них представлены данные по динамике растворения радионуклидов ГТЧ в зависимости от времени экспозиции в растворе ИЛЖ (проба № 3).

Наконец, вывод, сделанный в последней (на настоящий момент) работе специалистов ИПБАЭС, посвященной этому вопросу [12] гласит:

«Проведенные эксперименты показали, что в аэрозолях, находившихся в «Укрытии» в 2005 и 2007 гг., около половины количества ^{137}Cs относилось к классу F (быстрое растворение), остальное – к классу S (медленное растворение). Переход ^{90}Sr частично относился к классу M (промежуточная скорость растворения), но в основном к классу S. ТУЭ $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am полностью попадали в класс S. Таким образом, исследованные аэрозоли, попадающие в организм в результате дыхания, можно рассматривать как труднорастворимые».

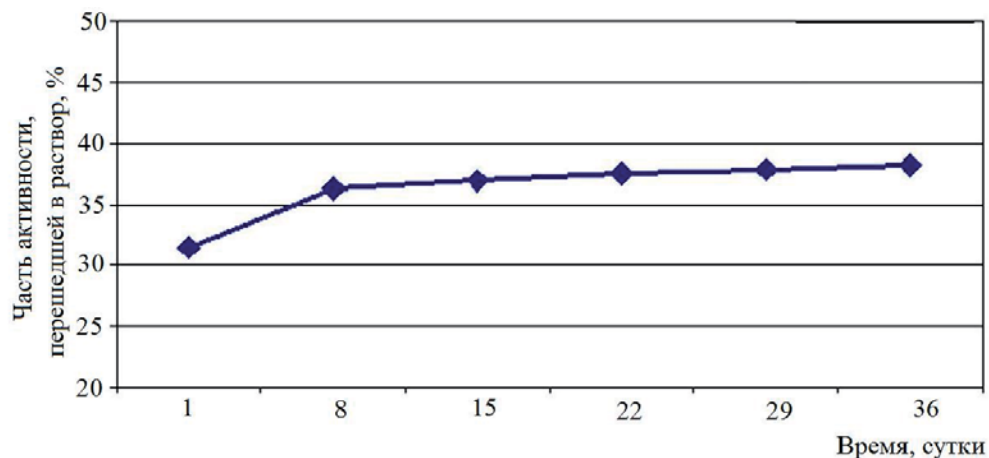


Рис. 10. Динамика растворения ^{137}Cs из ГТЧ в зависимости от времени экспозиции в растворе ИЛЖ

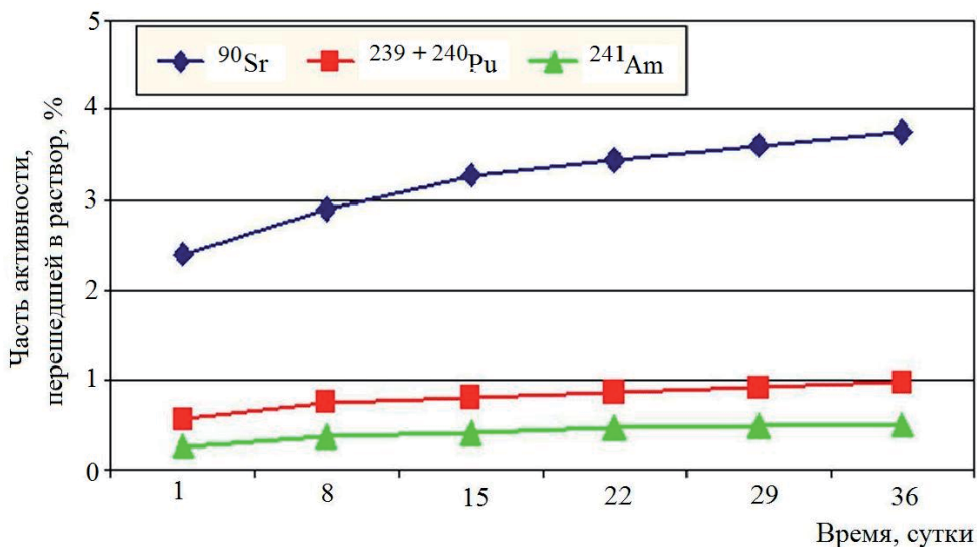


Рис. 11. Динамика растворения ^{90}Sr , $^{239} + ^{240}\text{Pu}$ и ^{241}Am из ГТЧ в зависимости от времени экспозиции в растворе ИЛЖ

11.2.4. ГТЧ – «свидетели аварии»

Изучение ГТЧ в КЭ позволило получить и интересную информацию о параметрах произошедшей аварии. Как уже говорилось выше разрушение топлива при авариях, связанных с вводом положительной реактивности (авария типа RIA), а именно такой характер носила авария на ЧАЭС, приводит к его диспергированию и образованию горячих топливных частиц. Главным действующим фактором при этом являются накопившиеся в топливе газы. Моделирование аварий типа RIA на импульсных реакторах проводилось и до, и после черновбыльской аварии.

В 70-е годы эксперименты ставились на реакторах SPERT и PBF (США) [13], в 80–90-е годы на аппаратах CABRI (Франция), NSRR (Япония) [14], ИГР (Россия-Казахстан), ГИДРА, БИГР (Россия) [15]. Перечисленные реакторы обеспечивают режимы (регулируемые или нерегулируемые) самогасящихся нейтронных вспышек с введением в испытуемый образец топлива избыточной положительной реактивности от 1β до 4β .

Полуширина импульса энерговыделения составляла в большинстве экспериментов десятки микросекунд. Исследуемый ТВЭЛ или группа ТВЭЛ-ов помещались в реактор в ампулах с водой. Поэтому эти эксперименты получили название «ампульных».

Целью исследований было определение порогового энерговыделения во время нейтронного импульса, приводящего к разрушению оболочек ТВЭЛ-ов и изучение поведения топливных таблеток в этих условиях. На рис. 12 приведена фотография ТВЭЛ-ов, разрушенных в ампульных экспериментах при последовательном увеличении нейтронной вспышки.

Для сравнения приведено и одна из фотографий ТВЭЛ-ов, обнаруженных в 4-ом блоке после аварии на ЧАЭС (см. рис. 13)



Рис. 12. Изменение формы и последовательное разрушение ТВЭЛ-ов при испытаниях на ИГР (при введении положительной реактивности)

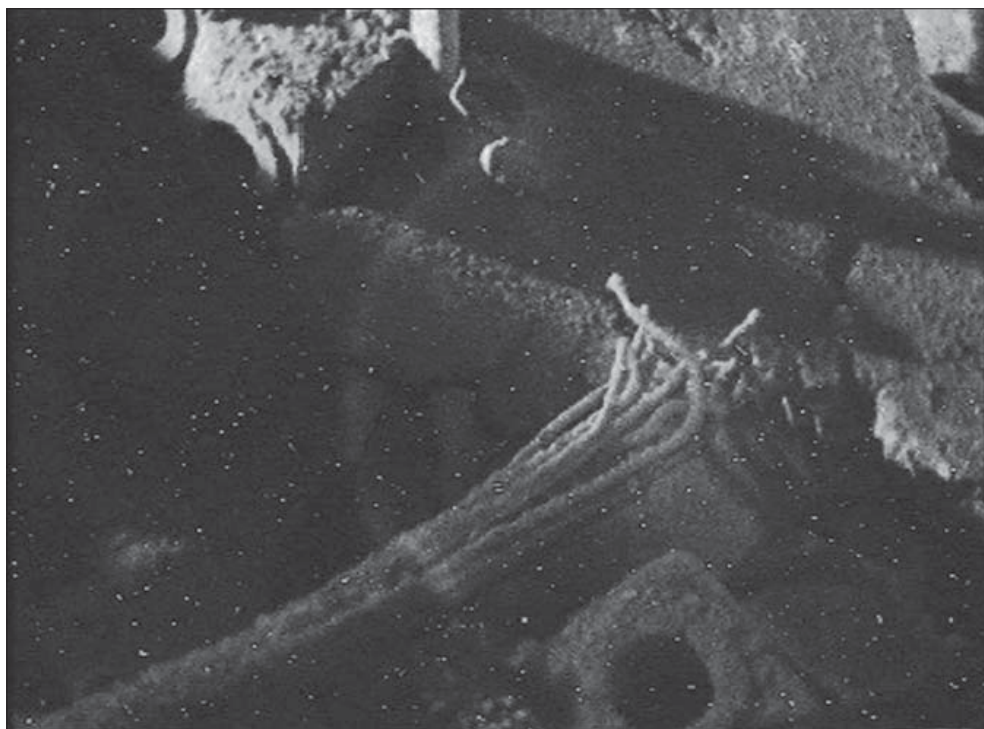


Рис. 13. Пучок разрушенных ТВЭЛ-ов в пом. 305/2 объекта «Укрытие»

Для интерпретации результатов в качестве основного параметра, определяющего сохранение целостности топлива при возрастании реактивности и мощности, была выбрана допустимая величина энтальпии – Q (кал/г топлива).

Из-за трудностей, связанных с обеспечением радиационной безопасности, большая часть экспериментов проводилась с необлученными ТВЭЛ-ами или с ТВЭЛ-ами с небольшой глубиной выгорания.

На основании совокупности проведенных экспериментов и расчетов для необлученного топлива эта величина сейчас принимается равной:

- 280 кал/г – в США;
- 230 кал/г – Япония, Европа (200 кал/г – Франция);
- 230 кал/г – Россия, топливо ВВЭР.

Наиболее близким к действительным условиям Чернобыльского реактора следует признать эксперимент на реакторе NSRR⁷ [14], где глубина выгорания исследовавшегося горючего составляла 4.6 МВт – сут/кг (У).

Это связано с тем, что существенное влияние на процесс разрушения ТВЭЛ-ов оказывает запас накопленных в процессе работы реактора в топливной матрице газообразных и летучих продуктов деления, которые приводят к образованию аномальной пористости и, следовательно, «распуханию» топлива, а также фракционированию горючего по границам зерен.

Все эти процессы приводят к тому, что для топлива со значительным выгоранием значение энтальпии, характеризующее целостность топлива, должно быть существенно уменьшено. Именно поэтому для РБМК-1000 конструктор выбирает в качестве параметра, характеризующий эту целостность величину энтальпии равную **170 кал/г** [16].

Некоторые количественные данные по росту зерна при авариях класса RIA могут быть получены из результатов работы [14]. В таблице 4 приведены средние размеры зерна в зависимости от полного энерговыделения и полуширины вспышки мощности $\Delta T \frac{1}{2}$ Начальный размер зерна – 9μ.

Таблица 4. Средний размер зерна UO_2 в зависимости от параметров вспышки.

Q , кал/г	$\Delta T \frac{1}{2}$, с	d , μ
560	0.5	30
420	0.2	40
360	0.2	30
360	0.9	15
230	0.2	10
185	0.9	70

Одним из аргументов в пользу описанного механизма разрушения чернобыльского топлива в первые моменты аварии служат увеличенный средний размер зерна – 58μ по сравнению с первоначальными зёрнами топлива – 18μ (см. рис. 14).

⁷The Nuclear Safety Research Reactor (NSRR), используемый Агентством по атомной энергии Японии, начал свою работу в 1975г. К 2006г. на нем было проведено 1280 экспериментов по изучению ядерного топлива.

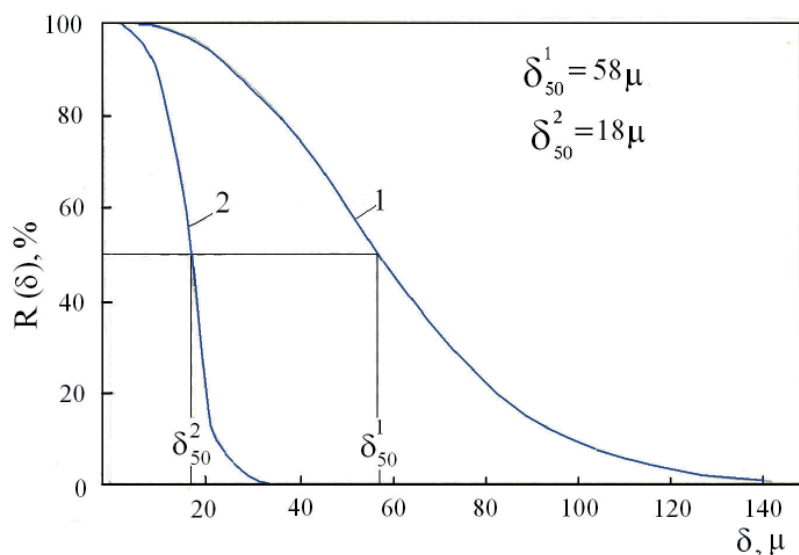


Рис. 14. Интегральные распределения частиц выброса и зерен топлива 4-го блока ЧАЭС по среднему диаметру δ . 1 – частицы выброса; 2 – зерна исходного топлива

На рис. 15 представлена зависимость экспериментальных значений среднего диаметра частиц топлива $\delta_{3/2}$ от величины средней радиальной энтальпии топлива из работы [15] и точка, соответствующая дисперсности частиц чернобыльской аварии, нанесенная на интерполирующую прямую. Здесь

$$\delta_{3/2} = \frac{\int_0^\infty \delta^3 \phi(\delta) d\delta}{\int_0^\infty \delta^2 \phi(\delta) d\delta},$$

где $\phi(\delta)$ – массовое распределение частиц по диаметру δ .

Значение $\delta_{3/2}$ для частиц чернобыльской аварии, рассчитанное по результатам работы [1] составляет 85.7 мкм, что соответствует на графике рис. 15 средней радиальной энтальпии **575 кал/г (UO_2)**.

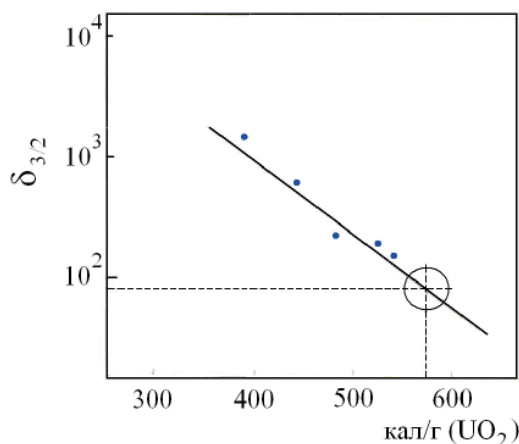


Рис. 15. Экспериментальные значения зависимости среднего диаметра частицы $\delta_{3/2}$ от средней радиальной энтальпии и точка, соответствующая параметру частиц при аварии на ЧАЭС

Это значение более чем в три раза превышает параметр, характеризующий целостность топлива, равный 170 кал/г (UO_2).

После диспергирования топливных таблеток и взаимодействию расплавленной периферии таблеток с оболочкой ТВЭЛ-ов последняя разрушилась.

А далее произошел контакт топлива с теплоносителем и стенками технологических каналов.

11.3. Дезактивация и пылеподавление при очистке помещений⁸ (см. [17])

11.3.1. Дезактивация. Жидкостная дезактивация

Следует отметить, что в силу особенностей образования и выброса радиоактивных аэрозолей при аварии на ЧАЭС проблемы, вставшие перед специалистами по дезактивации, практически не имели аналогов.

Они отличались от теоретических представлений и от опытных данных, которые были накоплены в результате многолетних работ по обезвреживанию самых разных объектов.

Традиционные методы дезактивации чаще всего оказывались не эффективными.

Например, в работе [18] говорится:

«При обработке струей воды помещений станции, стен и крыш зданий города Припяти и других населенных пунктов, автомобилей и различных объектов коэффициент дезактивации едва достигал двух (см. рис. 16).



Рис. 16. Дезактивация на территории ЧАЭС

⁸Авторы приносят глубокую благодарность И.Я. Симановской за ее консультации и замечания по материалу этого раздела.

При использовании метода орошения дезактивирующим раствором с одновременным протиранием поверхности щеткой повышался, но не намного.

При дезактивации стиркой спецодежды персонала по самому жесткому режиму коэффициент дезактивации не превышал 10, хотя для других условий радиоактивных загрязнений, в частности после ядерных взрывов, он был более ста.

Часто фиксировались случаи, когда после дезактивации вообще не наблюдалось снижения радиоактивных загрязнений, а иногда даже фиксировалось их увеличение».

При освоении загрязненных помещений внутри объекта «Укрытие» также постоянно приходилось сталкиваться с задачами, которые не имели аналогов.

В результате Чернобыльская авария явилась мощным толчком в развитии методов и средств дезактивации. Основную роль здесь сыграли специалисты Минобороны и Минсредмаша, особенно НИКИМТ.

В качестве наиболее эффективных методов для подготовки загрязненных помещений «Укрытия» к проведению буровых работ использовалась дезактивация (жидкостная и сухая⁹) и нанесение защитных полимерных покрытий различного назначения (пылеподавляющих, локализирующих, аккумулирующих).

При этом могла проводиться как полная дезактивация всего помещения, так и частичная — отдельных его поверхностей, металлоконструкций, оборудования и т.п.

Основные способы жидкостной дезактивации, применявшиеся (и применяющиеся) на объекте «Укрытие», это — способ дезактивации погружением¹⁰ и струйный метод¹¹.

Обычно дезактивирующий раствор состоял из следующих компонентов:

- растворитель (вода);
- поверхностно-активные вещества, понижающие поверхностное натяжение воды и, тем самым, увеличивающие смачивание ею поверхности;
- комплексообразующие вещества, образующие прочные комплексы с радионуклидами и облегчающие их удаление с поверхности;
- органические и неорганические кислоты и щелочи.

В таблице 5 приведены рекомендуемые дезактивирующие составы для различных типов поверхностей.

⁹Жидкостная дезактивация — это дезактивация, основанная на использовании растворов, приводящая к образованию жидких радиоактивных отходов. Основным средством воздействия на радиоактивное загрязнение при жидкостной дезактивации служит раствор химических реагентов, пара, травильных паст, расплавленных солей и т.д.

Сухая дезактивация — это дезактивация, основанная на использовании полимерных композиций. При этом в результате проведения дезактивационных работ образуются твердые радиоактивные отходы.

¹⁰Дезактивация погружением — дезактивация поверхности, заключающаяся в погружении объекта в рабочую среду. Данный способ дезактивации является наиболее простым. Этим способом дезактивируются изделия различной конфигурации и габаритных размеров: съемное оборудование, оснастка, арматура, инструмент и т.п. Недостатком способа является большой расход растворов и большие объемы жидких радиоактивных отходов.

¹¹Струйная дезактивация с раствором химических реагентов — дезактивация поверхности, включающая обработку объекта струей рабочей среды. Струйная дезактивация удаляет рыхлые и плотные отложения с металлов и защитных покрытий.

Таблица 5. Рекомендуемые дезактивирующие составы для различных типов поверхностей

Поверхности	ДЕЗ-1 ¹²	ДЕЗ-2	ДЕЗ-3	ДЕЗ-4	ДЕЗ-5
Окрашенные химически нестойкими эмалями (алкидная краска, нитроцеллюлоза, карбамид, водная эмульсия и т.д.)	×				
Инженерные конструкции (штукатурка, дерево, сталь), окрашенные щелочно-стойкими эмалями		×	×		
Нержавеющая сталь		×	×	×	
Углеродная сталь				×	×
Углеродная сталь (со следами ржавчины)					×
Инструментальная сталь		×			
Пластикат		×	×	×	
Наливные щелочностойкие полы		×			
Наливные кислотностойкие полы			×		
Титановые сплавы			×		
Алюминиевые сплавы				×	

В Чернобыле, в первые дни ликвидации последствий аварии, военными в качестве средств жидкостной дезактивации применялся состав марки ДЕЗ-2, который был специально разработан академией химзащиты для дезактивации поверхностей военной техники при взрыве атомной бомбы.

Состав себя не оправдал, и с июня 1986 г. по рекомендации НИКИМТ и ВНИПИЭТ перешли на состав ДЕЗ-3.

В дальнейшем, при дезактивации автотехники на пунктах специальной обработки (Лелев, Детятки и т.д.), использовался состав ДЕЗ-3.

Составы ДЕЗ-4 и ДЕЗ-5 применялись для дезактивации поверхностей оборудования (буровые станки, штанги и т.д.) при работе непосредственно в помещениях объекта «Укрытие».

Состав ДЕЗ-5 использовался для очистки поверхности конструкций контрфорса от старой краски и ржавчины перед нанесением новой краски.

В таблице 6 приведены данные по сравнительной оценке дезактивирующей способности растворов ДЕЗ-3 и ДЕЗ-5 при проведении работ в помещениях объекта, из которых происходило бурение скважин.

Определение эффективности моющих растворов проводили путем взятия «сухого мазка» с очищаемой поверхности до и после проведения дезактивационных работ (по данным ЦРБ ЧАЭС за период декабрь 1991 г. — март 1992 г.).

Относительно низкая эффективность дезактивации поверхности стен, по-видимому, связана с недостаточно тщательной обработкой их моющими растворами.

¹²Рецептуры составов марки ДЕЗ-1 — ДЕЗ-5 приводятся в ТУ 2381-006-78102670-2009 «Рецептуры дезактивирующие марок ДЕЗ-1, ДЕЗ-2, ДЕЗ-3, ДЕЗ-4, ДЕЗ-5 (концентраты)».

Таблица 6. Данные по сравнительной оценке дезактивирующей способности растворов ДЕЗ-3 и ДЭЗ-5

Помещение	Место взятия пробы	Снимаемая активность до обработки (частицы, см ⁻² мин ⁻¹)		Снимаемая активность после обработки (частицы, см ⁻² мин ⁻¹)		Коэффициент дезактивации (КД)		Тип раствора
		α	β	α	β	α	β	
208/10 (верх)	Пол	9700	270 000	75	12 000	130	22.5	ДЕЗ-5
208/10 (верх)	Пол	30 000	360 000	130	22 000	240	12	ДЕЗ-5
208/10 (верх)	Пол	6000	250 000	60	13 000	100	19	ДЕЗ-5
208/10 (верх)	Стена	450	49 000	5	10 000	9	5	ДЕЗ-5
208/10	Оборудование	670	60 000	6	1800	113	34	ДЕЗ-5
208/10 (низ)	Пол	23 000	330 000	6	7200	3870	46	ДЕЗ-5
208/10 (низ)	Стена	1200	250 000	260	33 000	4.6	7.7	ДЕЗ-5
208/10 (низ)	Оборудование	1800	120 000	30	7200	60	17	ДЕЗ-5
207/4	Пол		7600		1100		6.5	ДЕЗ-3
207/5	Пол		38 000		4900		7.6	ДЕЗ-3
515	Пол		6200		2200		2.8	ДЕЗ-3
207/7	Пол		32 000		1100		29	ДЕЗ-3

Опыт показал, что в постоянно-обслуживаемых помещениях даже после проведения успешной первичной дезактивации необходимо ежедневно проводить работы по повторной дезактивации поверхностей полов (рис. 17).

Дезактивацию чаще всего осуществляли ручным методом растворами ДЕЗ-2 или ДЕЗ-3. В случае необходимости (при превышении допустимого уровня загрязнения) повторную дезактивацию проводили растворами ДЕЗ-4 за 1–2 цикла.

Существенные трудности возникали при очистке тех помещений «Укрытия», в которые при взрыве непосредственно проник газопылевой выброс.

Даже многократная обработка поверхностей с использованием дезактивирующих растворов не приводила к снижению МЭД до допустимых уровней.

Так, например, в помещениях на отметке +27 м радиоактивные аэрозоли были обнаружены практически по всей глубине штукатурки и даже бетона.

В помещениях этого типа для исключения вторичного переноса проводили дезактивацию поверхностей оборудования и помещения раствором ДЕЗ-4, полностью удаляли краску с оборудования или заменяли оборудование, предварительно сняв слой штукатурки со стен и растворную стяжку с пола.



Рис. 17. Периодическая дезактивация пола на ЧАЭС

Относительно легко дезактивировались помещения, в которых радиоактивный аэрозоль, попадая либо за счет естественного оседания, либо за счет вторичного воздушного переноса, слабо фиксировался на поверхности.

Дезактивация подобных поверхностей ограничивалась пылеотсасыванием и последующей 3–4-кратной обработкой влажной ветошью, смоченной ДЕЗ-2.

Дезактивацию поверхностей оборудования и инструментов, используемых на объекте «Укрытие» проводили на специально оборудованной площадке дезактивации, расположенной на территории, прилегающей к «Укрытию».

Осуществляли ее при помощи установки типа «Вагнер» (Wagner) растворами ДЕЗ-2, ДЕЗ-3, ДЕЗ-4, ДЕЗ-5 или составами для сухой дезактивации.

В последствии на объекте «Укрытие» при дезактивации поверхностей от альфа- и бета- активных частиц пыли чаще всего использовались эти дезактивирующие составы. Более подробные данные о свойствах ДЭЗ – 1÷5 содержатся в работах [19, 20] и др.

11.3.2. Сухая дезактивация. Дезактивация с применением снимаемых защитных полимерных покрытий (см. [21–24])

Дезактивация с применением снимаемых защитных полимерных покрытий была одним из наиболее часто применявшихся на объекте «Укрытие» способов сухой дезактивации.

На загрязненную поверхность наносится полимерный состав, представляющий собой композицию, содержащую пленкообразующий полимер, ПАВ, комплексообразователи и необходимые технологические добавки.

Нанесенный состав через некоторое время высыхает и затвердевает, превращаясь в эластичную пленку, легко удаляемую вместе с загрязнением без нарушения очищаемой поверхности.

Стадии одного из испытаний полимерного состава представлены на рисунках 18–21.

Дезактивация достигается вследствие взаимодействия с радиоактивным загрязнением химических компонентов полимерного раствора с последующим включением загрязнения в твердеющую пленку, которая фиксирует и локализует загрязнения, предотвращает распространение их по поверхности и этим усиливает эффект дезактивации.

Этот способ применяют также для предварительной защиты поверхностей оборудования и помещений перед проведением операций, при которых возможно их радиоактивное загрязнение.



Рис. 18. Проверка эффективности метода дезактивации с помощью снимаемого полимерного покрытия. Помещение 604/7. Неокрашенная стена. Испытания начинаются со снятия «сухого» мазка с неокрашенной поверхности



Рис. 19. Следующий шаг – нанесение полимерного состава на неокрашенную поверхность



Рис. 20. Удаление высохшего покрытия



Рис. 21. Снятие «сухого» мазка с неокрашенной поверхности после удаления покрытия для контроля коэффициента дезактивации

Достоинства данного способа дезактивации:

- высокая эффективность дезактивационных работ;
- фиксация и локализация радиоактивных загрязнений;
- отсутствие жидких отходов;
- небольшой объем твердых отходов и простота их утилизации.

Так, при сухой полимерной дезактивации количество твердых радиоактивных отходов в ~ 1000 раз меньше, чем при жидкостной дезактивации.

Таким образом, по сравнению с технологией жидкостной дезактивации сухая полимерная дезактивация является малоотходной.

Образующиеся твердые радиоактивные отходы легко хранить и транспортировать, а обращение с ними не требует строительства специализированных коммуникаций и цехов.

При этом во многих случаях эффективность очистки, характеристикой которой является коэффициент дезактивации, который определяется как отношение величины радиоактивного загрязнения до и после дезактивации, при сухой полимерной дезактивации выше, чем при жидкостной.

Возникновение этого эффекта обусловлено тем, что в составе, нанесенном на дезактивируемую поверхность, в процессе его отверждения (высыхания) за счет улетучивания разбавителей и растворителей возрастает концентрация специальных комплексообразующих добавок, что приводит к существенному возрастанию коэффициента дезактивации.

При жидкостной дезактивации повышение исходной концентрации используемых реагентов в дезактивирующем растворе приводит к увеличению возможности коррозионного воздействия на дезактивируемую поверхность, росту вредного воздействия на окружающую среду, повышению стоимости раствора и т.д.

Увеличение же концентрации ингредиентов составов для сухой полимерной дезактивации не имеет этих недостатков, т.к. их воздействие на дезактивируемую поверхность или окружающую среду очень кратковременно (секунды, минуты).

Еще одним из важнейших достоинств сухой полимерной дезактивации, существенно увеличивающим ее эффективность, является то обстоятельство, что при ее использовании отсутствует избыточное количество жидкого раствора, которое в случае жидкостной дезактивации разгоняет (разносит) активность по различным щелям и углублениям очищаемых поверхностей.

Сухая полимерная дезактивация, наоборот, позволяет очистить различные труднодоступные места, которые практически имеются на любых конструкциях, начиная со зданий и сооружений и заканчивая приборами и машинами.

При работах по ликвидации Чернобыльской аварии в качестве полимерных связующих в покрытиях использовались поливиниловый спирт, метилополиамидная смола, поливинилацетат, поливинилбутираль, латексы и другие полимеры.

Выбор полимерной композиции определялся в зависимости от:

- типа дезактивируемой поверхности;
- базового, химического и изотопного состава загрязнений;
- технических средств для производства работ.

Применялись варианты одно- и двухстадийной технологии нанесения покрытий. В последнем случае вначале наносили десорбирующий раствор, а после его высыхания — полимерный состав, образующий снимаемое покрытие.

Дезактивировались самые различные поверхности. В том числе полированные и окрашенные металлические детали и детали покрытые ржавчиной. Очищались поверхности бетона, асфальта, битума, рубероида, сыпучих материалов (в том числе грунта, почвы, лесной подстилки и т.д.).

Широкое распространение получили такие составы для сухой дезактивации, такие как: ВА-501¹³; ВЛ-501¹⁴, АБИС¹⁵ (последний применялся, в основном, для дезактивации асфальта и рубероида).

Основные характеристики (показатели качества) перечисленных выше составов и покрытий на их основе приводятся в таблицах 7–9.

Таблица 7. Основные характеристики (показатели качества) составов марки ВА и покрытий на их основе

Наименование показателя	Значение показателя			
	ВА-501	ВА-502	ВА-503	ВА-504
1. Условная вязкость при (20 ± 2) °С по вискозиметру типа ВЗ-246 с диаметром 4 мм, с	30–150			
2. Коэффициент дезактивации, не менее для альфа-излучающих нуклидов для бета-излучающих нуклидов	1×10 ³ 1×10 ²		1×10 ² 50	
3. Время защитного действия не менее, месяцы ¹⁶	4			15

¹³Дезактивирующие составы с локализирующим и изолирующим эффектом марки ВА предназначены для дезактивации различных поверхностей, загрязненных альфа- и бета-излучающими нуклидами, также для локализации радиоактивных загрязнений на различных поверхностях и изоляции чистых поверхностей от попадания на них радиоактивных загрязнений.

Составы представляют собой водные растворы поливинилового спирта, поверхностно-активных веществ, комплексообразователей и пластификаторов.

Выпускаются по ТУ 6991-005-78102670-2009.

¹⁴Дезактивирующие составы с локализирующим и изолирующим эффектом марки ВЛ предназначены для дезактивации различных поверхностей, загрязненных альфа- и бета-излучающими нуклидами, а также для локализации радиоактивных загрязнений на различных поверхностях и изоляции чистых поверхностей от попадания на них радиоактивных загрязнений.

Составы представляют собой водно-спиртовые растворы поливинилбутираля и его модификаций, поверхностно-активных веществ, комплексообразователей и пластификаторов.

Выпускаются по ТУ 6991-004-78102670-2009.

¹⁵Состав марки АБИС представляет собой ацетоновый раствор ацетата целлюлозы, бакелитового лака, суспензионного поливинилацетата с добавлением пластификаторов, органических и неорганических кислот.

Выпускается по ТУ 6-055-4182-9-86.

¹⁶Время защитного действия покрытия интервал времени, в течение которого защитное полимерное покрытие предотвращает распространение радиоактивных загрязнений в окружающее пространство.

Таблица 8. Основные характеристики (показатели качества) составов марки ВЛ и покрытий на их основе

Наименование показателя	Значение показателя			
	ВЛ-501	ВЛ-502	ВЛ-503	ВЛ-504
1. Условная вязкость при (20 ± 2) °С по вискозиметру типа ВЗ-246 с диаметром 4 мм, с	60–180	40–80	60–80	60–80
2. Коэффициент дезактивации, не менее для альфа-излучающих нуклидов для бета-излучающих нуклидов	1×10^3 1×10^2			
3. Время защитного действия не менее, месяцы	36			

Таблица 9. Основные характеристики (показатели качества) состава марки АБИС-2-8 и покрытия на его основе

Наименование показателя	Значение
1. Коэффициент дезактивации, не менее для альфа-излучающих нуклидов для бета-излучающих нуклидов	1×10^2 50
2. Температура нанесения состава, °С	не ниже минус 5
3. Время высыхания пленки до степени 3 при температуре (20 ± 2) °С, ч, не менее	1
4. Группа горючести	Г2

В отдельных случаях, когда поверхность, на которую наносится локализирующее покрытие, представляла собой изделие сложной конфигурации (например, телевизионные камеры, автоматические передвижные тележки и т.д.), то покрытие армировалось слоем марли или стеклоткани.

Для определения времени защитного действия покрытия в стендовых условиях на подложки из коррозионностойкой стали (кружки диаметром 30 мм) наносили методом мазка радиоактивные загрязнения. Затем наливом в 2 слоя (с промежуточным высушиванием от 20 мин. до 2 часов) наносили локализирующий состав с общей толщиной покрытия около 100–120 мкм. После его высыхания с поверхности брали влажный мазок с интервалом 1 сутки, 1 неделя, 1 месяц, 2 месяца и т.д.

За время 3–7 месяцев в пределах погрешности не было зарегистрировано снижения защитного действия покрытия.

11.3.3. Технология нанесения снимаемых защитных полимерных покрытий, применявшаяся на объекте «Укрытие» [24]

Покрытия с локализирующим эффектом.

Начиная с 1988 года, пылеподавляющие составы с локализирующим эффектом наносили на поверхности оборудования и строительных конструкций в помещениях машинного зала, деаэрационной этажерки, реакторного отделе-

ния, бассейна-барботера и т.д. При этом использовались установки типа «Вагнер» (установка высокого давления) и УМП-1 (универсальная поливочная машина). За период с 1988–1991 гг. было нанесено более 990 тонн пылеподавляющих составов.

Их применение позволило существенно улучшить радиационную обстановку в таких помещениях объекта «Укрытие», как 805/3, 406/2, 405/2, 061/2 и 009/4,5 и др.

Например, аэрозольная активность воздуха в помещении 805/3 снизилась на два порядка, а активность мазка с защищенным покрытием поверхности снизилась в 50–150 раз. После нанесения 2-х слоев покрытия на основе латекса на поверхности строительных конструкций деаэрационной этажерки (отметка +43.0), снимаемая часть поверхностной загрязненности уменьшилась на 2–3 порядка. Надо отметить, что такая высокая эффективность характерна только для сильно загрязненных поверхностей.

Пылеподавляющие покрытия с аккумулярующим эффектом.

К пылеподавляющим покрытиям с аккумулярующим эффектом относятся покрытия, которые способны поглощать из контактирующей с ними воздушной среды радиоактивные загрязнения; накапливать и удерживать их в течение некоторого промежутка времени.

Применение покрытий этого типа особенно эффективно при проведении таких работ, при которых возможно образование большого количества радиоактивных аэрозолей. Например, сварочных или буровых работ, являющихся одним из основных источников аэрозольного загрязнения воздушной среды помещений. Составы с аккумулярующим эффектом наносились на стены помещений 207/4 и 5, 515/3, 427/2 318/2 и ряда др.

Наиболее широкое распространение получили составы на основе виниловых сополимеров со специальными добавками, позволяющими значительно увеличить аккумулярующую способность (коэффициент адсорбции) покрытий.

Составы наносились при помощи установки безвоздушного распыления «Вагнер» в 2–3 слоя.

Сроки службы таких покрытий 14–20 дней, после чего верхний слой покрытия возобновлялся. Всего за период с 1988 по 1991 гг., когда работы по освоению помещений бывшего 4-го энергоблока ЧАЭС проводились особенно интенсивно, было нанесено несколько тонн аккумулярующих составов.

Нейтронно-поглощающие пылеподавляющие покрытия.

На объекте «Укрытие» проводились также работы по нанесению составов, содержащих в своей рецептуре карбид бора и азотнокислый гадолиний.

Покрытия, на основе составов этого типа, помимо всех свойств локализирующих пылеподавляющих покрытий, обладают способностью активно поглощать нейтроны.

Для помещений с высоким уровнем радиации была разработана безлюдная технология по нанесению составов для подавления потоков тепловых нейтронов и увеличения запаса отрицательной реактивности ТСМ. Данная технология применялась в помещении 012/13-16 (верхний этаж бассейна-барботера), ПРК, а также при подавлении роста нейтронных потоков в помещении 304/3

в июне 1990 года. Всего было нанесено 5.5 тонны нейтронно-поглощающих составов.

11 3.4. Аэрозольные средства дезактивации [17], [24]

Для повышения эффективности химического метода дезактивации поверхностей во многих случаях дезактивирующие растворы применялись в виде дисперсных систем (пены). Предварительный перевод моющих препаратов в диспергированное состояние значительно повышает их эффективность. Это особенно важно при создании автономной технологии сухой дезактивации.

Из автономных средств нанесения дезактивирующих растворов наиболее перспективным оказалось использование аэрозольных баллонов.

Способ дезактивации различных поверхностей от радиоактивного загрязнения при помощи аэрозольных баллонов позволяет проводить дезактивацию поверхностей оперативно, непосредственно в момент загрязнения радиоактивными изотопами.

Применение этого метода не требует специальной подводки электроэнергии, воздуха и т.д., что особенно важно, и могут практически мгновенно применяться в условиях внезапно распространившейся активности для дезактивации небольших поверхностей, мелких предметов, кожных покровов, особенно при повреждении резиновых перчаток и других средств защиты.

НИКИМТ совместно с п/о «Латвбытхим» (г. Рига) были созданы аэрозольные упаковки «Радез-Д», «Радез-П», «Радез-СД», «Радез-СИ», «Радез-БП»¹⁸. Использовались следующие составы:

- «Радез-П»¹⁹ — для дезактивации поверхностей оборудования и инструментов,
- «Радез-Д»¹² — для дезактивации кожных покровов,
- «Радез-СИ»²⁰ — для изоляции чистых поверхностей с помощью полимерных пленок,
- «Радез-СД»¹³ — для сухой полимерной дезактивации загрязненных поверхностей, и
- «Радез-БП»¹³ — для защиты кожи рук от загрязнений (биологические перчатки).

На основе аэрозольных упаковок с применением поливинилбутирала создана автономная технология сухой дезактивации поверхностей от радиоактивных загрязнений с помощью полимерных покрытий.

Наиболее широкое применение на объекте «Укрытие» нашел «Радез-Д» *(было применено более миллиона упаковок!)*.

¹⁷Возможно написание — Раддес

¹⁸В настоящее время эти средства дезактивации на «Укрытии» не используются, так как на Украине отсутствует их производство.

¹⁹ТУ 6-15-1331-81 «Средства дезактивации «Радез-Д» и «Радез-П» в аэрозольной упаковке».

²⁰Отчет по НИР «Разработать рецептуры и технологию производства средств специального назначения в аэрозольной упаковке» по теме 21.171.7.2., СКБ химизации «Союзбытхим», г. Рига, 1984 г., 18 с.

11.3.5. Схема принятия решений по проведению дезактивационных работ и организации защиты персонала

Как показал опыт, важным фактором уменьшения коллективной дозы и финансовых затрат является заранее спланированная и оптимизированная последовательность выполнения работ по пылеподавлению, дезактивации и мерам защиты персонала.

Для их проведения оказалось полезным использовать базовую схему принятия решений, подобную той, что приводится ниже на рис. 22.

Из-за специфики проводимых работ в нее вносились изменения, со временем она совершенствовалась, изменялась и трансформировалась, однако основной подход к последовательности действий сохранялся.

11.4. Образование РАУ при проведении буровых работ

Как уже говорилось выше, почти всегда подготовительные работы на «Укрытии» и просто осмотр помещений, связанный с передвижением персонала сопровождался вторичным подъемом радиоактивной пыли. В качестве количественной характеристики такого пылеподъема используют обычно коэффициент дефляции — K :

$$K \text{ (м}^{-1}\text{)} = \frac{\text{воздушная концентрация; } C \text{ (мг} \times \text{м}^{-3}\text{)}}{\text{поверхностная концентрация; } S \text{ (мг} \times \text{м}^{-2}\text{)}}$$

Предварительная дезактивация и покрытие запыленных поверхностей в помещениях специальными локализирующими составами позволяло в сотни раз уменьшить величину K .

Для иллюстрации этого приведем следующий пример.

Разведывательная группа проходила по «грязным» лестницам на верхних отметках «Укрытия», одновременно отбирая представительные пробы поверхностного загрязнения. После ее возвращения была измерена активность, находящаяся на респираторах «Лепесток-200» членов этой группы.

В предположении, что скорость дыхания человека есть величина относительно постоянная, респиратор рассматривался как пробоотборник аэрозолей, аспирированный известным за данное время количеством воздуха.

Из этих данных, были получены следующие значения коэффициентов дефляции K :

$$K_{\text{Ce-144}} = (1,0 \pm 0,3) \times 10^{-3} \text{ м}^{-1} \text{ и}$$

$$K_{\text{Cs-137}} = (1,4 \pm 0,5) \times 10^{-3} \text{ м}^{-1} [25].$$

Данный результат является усредненным для трех помещений и шести респираторов сотрудников. Некоторое превышение коэффициента дефляции для ^{137}Cs связано, по-видимому, с присутствием цезия в составе более «подвижных» частиц.

После этого все помещения были обработаны путем нанесения специального покрытия с локализирующим эффектом.

После обработки значения K (полученные тем же способом) составляли

$$K'_{\text{Ce-144}} = (1,9 \pm 0,3) \times 10^{-5} \text{ м}^{-1} \text{ и}$$

$$K'_{\text{Cs-137}} = (8,5 \pm 1,0) \times 10^{-6} \text{ м}^{-1}.$$

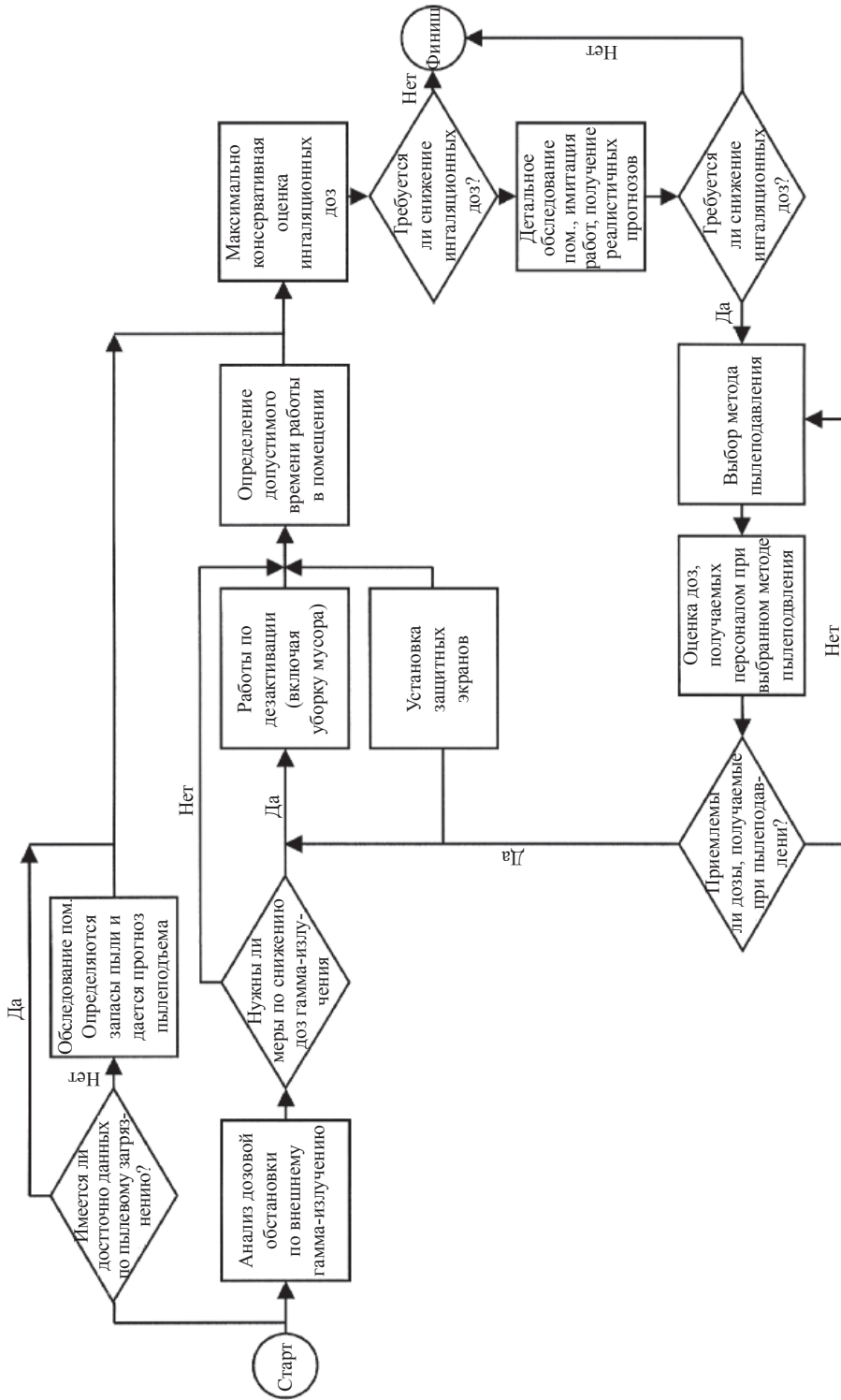


Рис. 22. Схема принятия решений по проведению дезактивационных работ и организации защиты персонала в помещениях объекта «Укрытие» [24]

Таким образом применение пылеподавляющего состава приводит к снижению коэффициентов вторичного пылеподъема над обработанными поверхностями на два порядка.

Помещения для проведения бурения не только тщательно дезактивировались и на их стены наносились составы для улавливания аэрозолей. Во многих из этих помещений устанавливались специальные большие планшеты (экраны) с нанесенным составом.

Сам процесс бурения находился под постоянным контролем специалистов НИО КЭ.

Сразу же было установлено, что после начала бурения, несмотря на все принятые меры, из-за вибрации и механического воздействия на загрязненные поверхности уровень аэрозольной активности значительно повышался.

При выключенных буровых станках концентрации суммы α -активных аэрозолей находились, как правило, на уровне $0,03 \text{ Бк/м}^3$. С возобновлением бурения количество активности в воздухе быстро возрастало на 1–2 порядка величины. Это иллюстрируют графики на рис. 23 [24].

При достижении контрольных уровней бурение прекращалось и вновь проводились меры по вторичной дезактивации помещений, до тех пор пока дозиметрические службы не давали разрешения на продолжения работ.

Из приведенных графиков видно, что такие многократные циклы дезактивации со временем (к июлю) привели к некоторому снижению образования РАУ при бурении.

В 1988–90 гг. произошло несколько инцидентов, во время которых в обслуживаемых помещениях при бурении активность РАУ неожиданно возрастала в сотни раз, намного превышая установленные контрольные уровни.

В ряде случаев эта активность достигала тысяч ДК_A .

Впервые с такой радиационной аварией сотрудники КЭ столкнулись в мае 1988 г. ([26]).

В это время проводилось бурение скважины в бетонном массиве опорной плиты реактора и работающие не ожидали каких-либо неожиданностей. Было еще неизвестно, что развитие «китайского синдрома» привело к проплавлению плиты в ряде мест и ТСМ глубоко проникли в ее структуру.

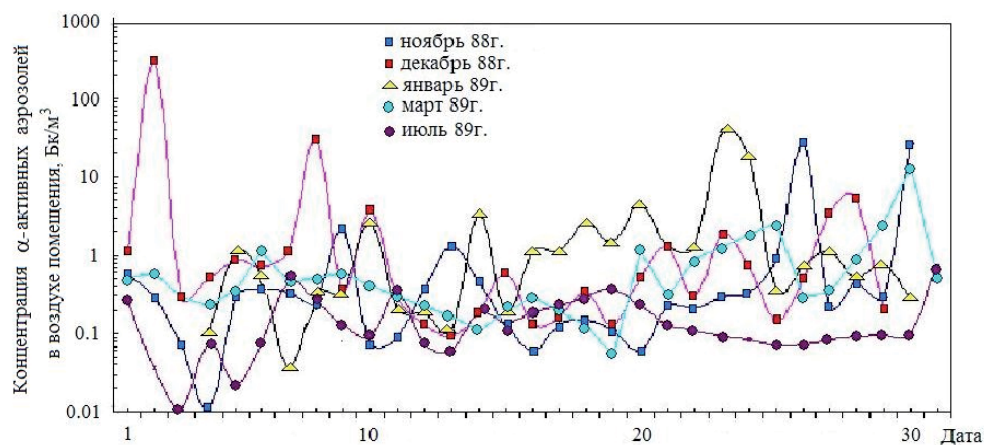


Рис. 23. Концентрация аэрозолей α -излучающих нуклидов при бурении скважин в помещении 207/4

В такую «ловушку» попал бур. Охлаждающая буровой инструмент вода вошла в соприкосновение с ТСМ, температура которых составляла сотни °С, и начала быстро испаряться, разрушая окружающее вещество, превращая его в пыль.

Произошел паровой взрыв, который вырвал превентор из скважины.

Радиоактивную пыль потоки пара и воздуха выбросили наружу.

На счастье, люди находились близко к выходу из помещения и успели за несколько секунд выйти из него и загерметизировать дверь. Никто не пострадал.

Однако, для проведения дезактивации помещения и оборудования было потрачено около двух недель.

В дальнейшем любое бурение сопровождалось постоянными измерениями температуры материалов, которых достигал бур.

Большое количество пыли, образующейся в процессе буровых работ, и ее отложение на полу, стенах, оборудовании сказывалось на аэрозольной обстановке при многих других видах деятельности в бурильных и смежных помещениях.

В этом плане показательны результаты пробоотборов аэрозолей, выполненных в конце мая 1989 г. в помещении 208/10 [24]. Здесь в течение двух дней по 30 мин резали металлическую платформу, на которой располагался буровой станок.

Данные о концентрациях α -активных аэрозолей представлены на рис. 24. Как видно, с началом работ концентрации резко возрастали почти на два порядка величины, через час после прекращения работ они существенно снижались, а через 8 ч возвращались к исходному уровню.

Не останавливаясь более на частных примерах отметим, что опыт, накопленный при обеспечении радиационной безопасности при работах в загрязненных помещениях объекта «Укрытие», позволяет перечислить (в общем виде) необходимые мероприятия, которые позволили успешно провести бурение исследовательских скважин.

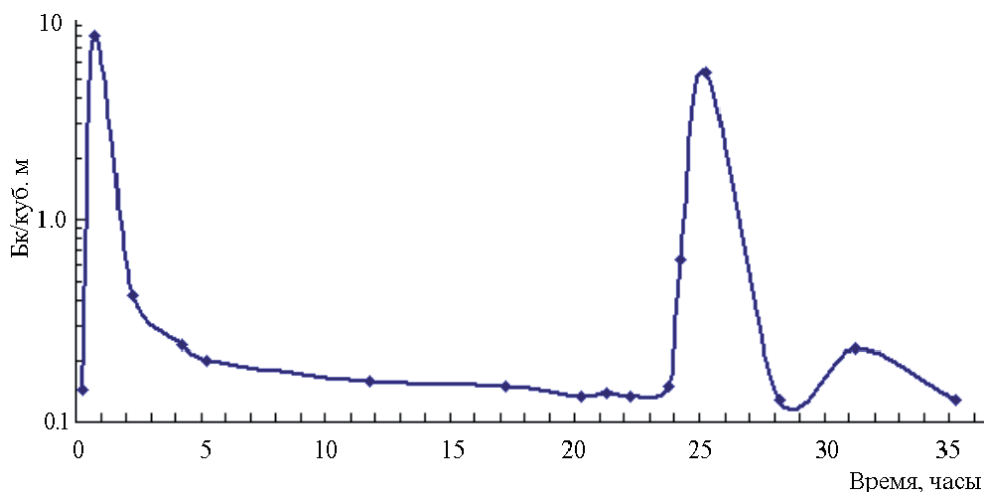


Рис. 24. Концентрация аэрозолей α -излучающих нуклидов при резке металла в помещении 208/1 объекта «Укрытие» в мае 1989 г.

Многократная повторная дезактивация.

Дезактивация (жидкостная или сухая) поверхностей помещений, металлоконструкций и т.д. Необходимо отметить, что проводилась дезактивация как всего помещения (полная дезактивация), так и отдельных поверхностей (частичная дезактивация).

Нанесение пылеподавляющих покрытий с локализирующим эффектом.

В этом случае пылеподавляющие наносились на все пылящие поверхности (полная локализация) или на отдельные поверхности помещений, оборудования (частичная локализация), что зависело от конкретных условий проведения работ.

Нанесение аккумулирующих покрытий с локализирующим эффектом.

Покрытия этого типа наносились или на все поверхности помещения; или на специальные планшеты (экраны) с целью создания «выгородок», изолирующих место проведения особо опасных в отношении образования РАУ работ от остальных помещений.

Кроме того, с целью исключения (уменьшения) образования РАУ аэрозолей при передвижении большого количества людей (строительные рабочие, обслуживающий персонал) по достаточно загрязненным участкам к месту проведения сварочных или других работ, когда нецелесообразно проводить дезактивацию всего помещения, практиковалась настилка специальных дорожек из стеклоткани, «нетканки» и т.д. с нанесенным на них аккумулирующим покрытием.

Это позволило предотвратить (во всяком случае, значительно снизить) количество образующихся РАУ.

Нанесение специальных локализирующих покрытий непосредственно на места (поверхности) проведения сварочных (резка) работ.

Эти покрытия отвечали требованиям по пожаро — взрывобезопасности и препятствовали попаданию в воздушную среду помещений РАУ с загрязненной радионуклидами рабочей поверхности.

Нанесение специальных пылеосаждающих составов.

Специальные пылеосаждающие составы применялись как для смачивания пылящих материалов (песок, почва, техногенный слой и т.д.), так и для осаждения пыли из воздушной среды помещений «Укрытия» или окружающей среды.

Благодаря введению специальных добавок эффективность пылеосаждающих составов была в 3-5 раз выше, чем, например, у водных растворов таких широко применяемых поверхностноактивных веществ, как жидкое мыло ОП-7 и ОП-10, сульфонол и т.д.

Нанесение изолирующих защитных полимерных покрытий.

Покрытия этого типа применялись в тех случаях, когда работы проводились в помещениях или местах, дезактивация которых невозможна или нецелесообразна, но необходима изоляция от загрязнения применяемого оборудования. Изолирующие покрытия наносили на поверхности до начала выполнения такого типа работ. Затем эти покрытия снимались с защищаемых поверхностей.

Перечисленные мероприятия в дальнейшем использовались при всех крупных работах, проводимых в помещениях объекта «Укрытия» в том числе и при выполнении стабилизации строительных конструкций в 2004–2007 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатов С.А., Боровой А.А., Дубасов Ю.В., Ломоносов В.В. Формы и характеристики частиц топливного выброса Чернобыльской аварии. Атомная Энергия, т. 69, вып. 1, 1990, с. 36–40.
2. Богатов С.А., Боровой А.А. О некоторых свойствах топливосодержащих частиц, образовавшихся при аварии на Чернобыльской АЭС, и особенностях формирования топливного выброса. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова 5444/3, Москва, 1991, 30 с.
3. Баев А.С., Богатов С.А., Быховская Л.И., Лебедева Л.И., Обухова Л.А., Тетерин Ю.А. Расчетно-экспериментальное определение дозовых нагрузок на дыхательную систему при ингаляции «горячих частиц» для персонала, принимавшего участие в работах по ЛПА на ЧАЭС. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова, ИАЭ-5484/14, Москва – 1992.
4. Боровой А.А., Левина Л.А., Олейник С.В., Улумбеков Р.Ф., Федотов А.А., Херувимов А.Н. Низкофоновый жидкосцинтилляционный α -, β -спектрометр. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова, ИАЭ-4981/2, Москва, 1989, 21 с.
5. Кашпаров В.А. Оценка и прогнозирование радиоэкологической обстановки при радиационных авариях с выбросом частиц облученного топлива (на примере аварии на Чернобыльской АЭС). Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук. Киев, 1999, 389 с.
6. Богатов С.А., Боровой А.А., Дворецкий В.И. и др. Исследование устойчивости наиболее радиологически опасных нуклидов в различных формах топливного выброса. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова, ИАЭ-5022/3, Москва, 1990, 17 с.
7. Кашпаров В.А., Йошенко В.И., Зварич С.И. и др. Оценка растворимости чернобыльских радиоактивных аэрозолей при ингаляции. Радиохимия, т. 39, вып. 1, 1997, с. 77–79.
8. Garger E.K., Sazhenyk A.D., Odintsov A.A. et al. Solubility of airborne radioactive fuel particles from the Chernobyl reactor and implication to dose. Radiat. Environ. Biophys., 2004, Vol. 43. – p. 43–49.
9. Гаргер Е.К., Саженюк А.Д., Одинцов А.А. и др. Оценка констант скорости растворения in vitro радиоактивных топливных частиц. Радиационная биология. Радиоэкология, 2004, т. 44, с. 229–235.
10. Изучение физико-химических свойств ядерно-опасных делящихся материалов объекта «Укрытие», влияющих на степень ядерной, радиационной и радиоэкологической безопасности объекта «Укрытие». Отчет ИПБ АЭС НАН Украины № 3970, Чернобыль, 2007, 248.

11. Одинцов А.А., Огородников Б.И. Растворимость радиоактивных аэрозолей объекта «Укрытие». Препринт ИПБ АЭС НАН Украины 08-2, Чернобыль, 2008, 16 с.
12. Одинцов А.А., Огородников Б.И. Изучение растворимости аэрозолей объекта «Укрытие» в жидкостях различного химического состава. В сборнике «Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля», Вип. 15, 2011, с. 85–95.
13. Mac-Donald P.E., Seiffert S.L., Martinson Z.R. et al. Assessment of Light-Water Reactor Fuel Damage During a Reactivity-Initiated Accident. Nucl. Safety, v. 21(5), 1980, p. 582–602.
14. Tsuruta T., Ochiai M., Saito S. Fuel Fragmentation and Mechanical Energy Conversion Ratio at Rapid Deposition of High Energy in LWR Fuel. Nucl. Sci. and Techn., v. 22(9), 1985, p. 742–75.4.
15. Егорова Л.А., Павшук В.А., Асмолов В.Г. и др. Анализ результатов ампульных динамических испытаний модельных ТВЭЛ-ов типа ВВЭР на реакторах ИГР и ГИДРА. Внутренний отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1986.
16. Адамов Е.О., Черкашов Ю.М. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. М.: ГУП НИКИЭТ, 2006 г.
17. Симановская И.Я. и др. Разработка основных направлений по созданию новых и совершенствованию существующих средств и технологий дезактивации объектов окружающей среды. Отчет по НИР. Договор по п. 10.2.6 ЕТП 2001 г. НИОКР МЧС России, г.Москва, 2001, 123 с.
18. Зимон А.Д., Пикалов В.К. Дезактивация. Москва, ИздАтб, 1994, 336 с.
19. ЗАДАНИЕ 10 Обращение с пылью. Анализ технологий по пылеподавлению, используемых на объекте «Укрытие». Doc. Ref. TN/00104.
20. Средства дезактивации. Составы для жидкостной дезактивации. <http://ecochimmed.com/article/a-7.html>.
21. ГОСТ 19465-90. Покрытия полимерные защитные для улучшения радиационной обстановки. Термины и определения. М., Изд. стандартов, 1992, с. 9.
22. ГОСТ Р 51037-97. Покрытия полимерные защитные изолирующие, локализирующие, пылеподавляющие и дезактивирующие. Общие технические требования. М., Изд. стандартов, 1997, с. 12.
23. Алешин А.М., Егоров Б.Н., Симановская И.Я. Применение полимерных покрытий для улучшения радиационной обстановки при эксплуатации объекта «Укрытие». Доклады Всероссийской научно-практической конференции. «Радиоэкологические, медицинские и социально-экономические последствия аварии на ЧАЭС. Реабилитация территории и населения». М., 1995 г.
24. Отчет по Задаче 1 «Сбор и анализ данных (Подзадачи 1÷3 и Подзадача 4)» SIP AOS 01 1 DKA 01 01 и SIP AOS 01 1 DKA 02 01. Консорциум КИ и НИИ РЗ, 2004 г., 148 с.
25. Боровой А.А., Херувимов А.Н., Богатов С.А. Изучение эволюции топливного загрязнения объекта «Укрытие» и промплощадки ЧАЭС. Отчет МНТЦ «Укрытие» Арх. № 1551, 1990 г., Чернобыль.
26. Боровой А.А. Мой Чернобыль. Новый мир № 3, 1996 г., с. 132–180.

12. ВЫБРОС АЭРОЗОЛЕЙ ИЗ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

12.1. Методы измерения выброса аэрозолей из «Укрытия»

12.1.1. Вентиляционная система объекта

Опасения того, что «Укрытие» может стать опасным источником радиоактивных аэрозолей нашли свое отражение при проектировании и строительстве объекта. В результате на базе имевшейся в 4-ом блоке фильтровальной станции (частично разрушенной при аварии) была устроена вентиляционная система, которая позволяла организовать выброс поступающего из «Укрытия» воздуха через общую для 3-го и 4-го блоков вентиляционную трубу (ВТ-2) (рис. 1).

Эта система имеет две ветви.

По первой (использующей естественную тягу) поток воздуха выходит из центрального зала 4-го блока, проходит по воздуховоду в пом. 2016/2, минуя байпасную задвижку, в пом. 4004/1 где смешивается с воздухом, выходящим из 3-го блока, и через пом. 7001 попадает в вентиляционную трубу.

После байпасной задвижки в воздуховод врезаны трубки для отбора проб воздуха.

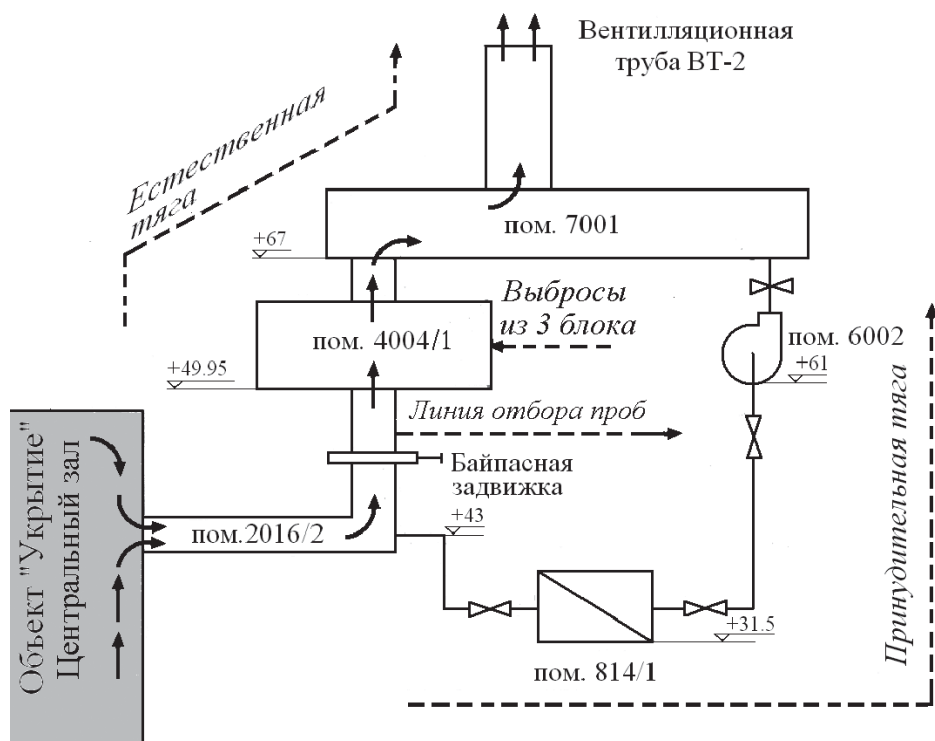


Рис. 1. Схема вентиляционной системы объекта «Укрытие»

Эти трубы, имеют длину 35м, внутренний диаметр 15мм и заканчиваются в помещении 2015/2, где размещены блок детектирования аэрозолей – прибор РКС 2-02 «Калина»¹.

Поток воздуха из ЦЗ по этой ветви обеспечивается за счет естественной тяги в трубе БТ-2 (ее верхний срез находится на высоте 150 м).

Вторая (принудительная) ветвь начинается из забетонированного короба в помещении 2016/2. Далее воздух поступает в помещение 814/1 на отметке +31,5 м, где размещаются ячейки с фильтрами. По проекту очищенный поток должны вытягивать семь вентиляторов и сбрасывать его в помещение 7001 и затем в вентиляционную трубу. Проектная производительность этих вентиляторов – 220 000 м³/ч

Насколько вообще спроектированная вентиляционная система способна защитить окружающую среду от выхода аэрозолей из «Укрытия»?

Ответ на этот вопрос был получен в ходе работ КЭ в 1988–89 гг. Было показано, что основной поток воздуха, выходит из объекта не через вентиляционную систему и не через предусмотренные технологические отверстия, а через многочисленные неплотности («щели»), оставшиеся при монтаже конструкций «Укрытия». По оценкам разведывательных групп общая площадь щелей в 1989 г. превышала 1000 м² (рис. 2).

В этом случае необходимости включать принудительную ветвь вентиляции, нет.

Таким образом, подтвердилось предложение ВНИИНМ и НИФХИ, о котором говорилось выше (раздел 9.2) – использовать только естественную конвекцию, оставив принудительную вентиляцию в качестве резервной.

12.1.2. Организованные и неорганизованные выбросы

Выбросы радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в окружающую среду можно разделить на две основные группы (см. [1]).

Неорганизованные выбросы – выбросы радиоактивных аэрозолей из «Укрытия» в окружающую среду через технологические отверстия и неплотности легкой кровли и стен объекта.

Эта группа выбросов определяется расположением и площадью «щелей» и технологических отверстий в конструкциях объекта и расходом воздуха через них, который, в свою очередь, зависит от множества условий – температуры, давления, влажности, скорости и направления ветра и т.п.

Организованные выбросы – выбросы радиоактивных аэрозолей из центрального зала «Укрытия» в окружающую среду через систему вытяжной вентиляции и трубу БТ-2. Их контроль осуществляется путем измерения объёмной активности газоаэрозольного выброса через «байпас» вытяжной вентиляционной системы и последующего расчета суммарной активности газоаэрозольного выброса.

¹В комплект РКС 2-02 «Калина», используемый в «Укрытии», входят: измерительный пульт; блоки детектирования; пробоотборная линия с эжектором, отсечными фильтрами, расходомерными устройствами и др. Измерение концентрации радиоактивных аэрозолей производят путем их осаждения на фильтры. По истечении заданного времени экспозиции проводят измерения β- и γ-активности и γ-спектрометрический анализ фильтров.



Рис. 2. «Щели» в кровле «Укрытия», через которые из объекта выходит воздух, а внутрь проникают атмосферные осадки

Мониторинг неорганизованных выбросов.

Система мониторинга неорганизованных выбросов была разработана и внедрена КЭ в 1990 г. С этого года наблюдения проводились непрерывно (с 1992 г. осуществляются персоналом ОЯРБ МНТЦ (ИПБ АЭС) (см., например, [1–5]).

Для выбора точек контроля были исследованы наиболее вероятные пути выноса аэрозолей. Особое внимание уделялось воздушным потокам, проходящим в «Укрытии» через места основных скоплений ТСМ – реакторное пространство и развал реактора в центральном зале. В результате проведенных работ было решено использовать технологические люки 7, 10, 13 и 15 на легкой кровле «Укрытия» (см. рис. 3)².

Непосредственно над люками были установлены планшетодержатели, каждый из которых был укомплектован двумя вертикальными планшетами, расположенными под прямым углом друг к другу, и двумя горизонтальными (рис. 4).

²Сначала планшеты были установлены над люками 7, 10, 31 и 38. Позднее, в конце 2001 г., два из них были перенесены (см. рис. 3).



Рис. 3. Расположение планшетов на легкой кровле «Укрытия» (начиная с конца 2001 г.)



Рис. 4. Планшетодержатель с одним вертикальным и двумя (верхним и нижним) горизонтальными планшетами

Планшеты (листы марлевой ткани, натянутой на раму размером 700×700 мм) перед установкой пропитывались специальным составом — смесью нефтяных масел (литол-24 и масло-разбавитель). Составы сохраняют удерживающую способность в течение времени экспозиции планшетов (≤ 1 месяц) и резко уменьшают проскок аэрозолей через фильтр.

Между нижним и верхним горизонтальными планшетами расположен железный лист, благодаря этому нижний планшет собирает аэрозоли, выбрасываемые из люков в крыше. Верхний горизонтальный и два вертикальных планшета служат для оценки «фона» — загрязненности воздушного пространства РАУ в районе установки планшетов.

Таким образом определяется объемная активность альфа — излучателей (^{240}Pu , ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^{241}Am) и бета — излучателей (^{137}Cs , $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, ^{241}Pu) в выходящем из люков воздухе.

Смена планшетов (рис. 5) проводится с периодичностью не менее 1 раза в месяц.

Оценить полный выброс радиоактивных аэрозолей из щелей и отверстий объекта достаточно трудно.

Такой параметр, как суммарная площадь щелей и до, и после проведения мероприятий по герметизации «Укрытия» был известен с точностью не лучшей, чем 30%.

Скорости воздушных потоков, проходящих через разные щели, могут очень сильно отличаться (вплоть до знака). Поэтому на основе измерений с планшетами делаются лишь верхние оценки выброса при самых консервативных предположениях³. Существенно большую точность имеют относительные результаты.



Рис. 5. Сотрудник КЭ меняет планшет на кровле «Укрытия»

³Так, после работ по дополнительной герметизации объекта (с целью уменьшения количества воды, проникающей в «Укрытие») суммарная площадь отверстий на верхних отметках «Укрытия» при оценке интегрального выброса принимается $\sim 120 \text{ м}^2$ (начиная с 2000 г.).

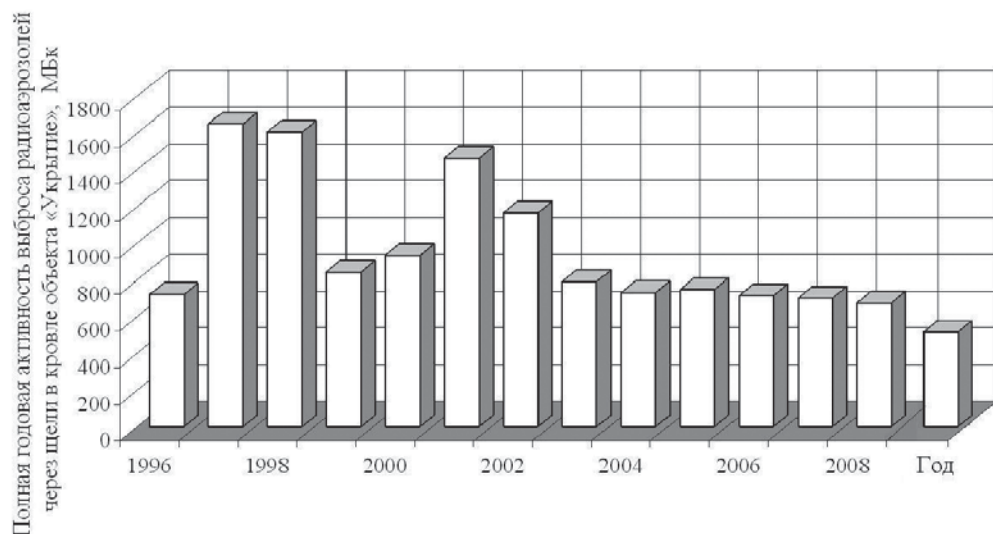


Рис. 6. Верхняя оценка неорганизованного выброса РАУ из объекта «Укрытие» в 1996–2008 гг.

Полученные в 1996–2008 гг. данные по динамике выброса (за каждый год) приведены на рис. 6 [5–7].

Из приведенной диаграммы следует, что в большинстве из 14 представленных лет наблюдений неорганизованный выброс аэрозолей колебался в пределах $\pm 20\%$ от среднего и только в 1997–1998 гг. и в 2001–2002 гг. сильно увеличивался.

В литературе (например, [1], [8] и др.) это объясняется возрастанием пылеподъема при проведении работ в помещениях и на кровле «Укрытия».

Следует отметить то, что суммарная активность годового аэрозольного выброса из объекта составляет всего несколько процентов от допустимого выброса для обычного блока АЭС мощностью 1000 МВт.

Мониторинг организованных выбросов (подробнее см. [1], [8]).

К началу двухтысячных годов представительность первоначальной схемы измерений РАУ с помощью отвода потока воздуха через длинные трубки (см. рис. 1) стала подвергаться все большим нареканиям. Наконец, экспериментально было показано, что в используемой для отбора трубке может наблюдаться значительное осаждение частиц. На аналитический фильтр, расположенный в помещении 2015/2, аэрозольные частицы крупнее 5 мкм вообще не поступают, а размером от 2 до 5 мкм — не более половины.

В то же время наблюдения, выполненные непосредственно в «Байпасе» в 2003–2006 гг., установили, что величины АМАД аэрозолей-носителей продуктов Чернобыльской аварии, как правило, превышают 1 мкм и в среднем составляют 3,8 мкм.

Поэтому наряду с продолжением регламентных измерений с помощью «Калины», проводимых ЧАЭС, сотрудники ОЯРБ начали проводить наблюдения за радиоактивными аэрозолями, выбрасываемыми через «Байпас» в атмосферу, с помощью отбора проб переносной воздухоудвкой (рис. 7) периодически размещаемой внутри самого вентиляционного канала.



Рис. 7. Размещение воздуходувки в «Байпасе»

Несмотря на указанные недостатки регламентных измерений, данные по организованному выбросу позволяют отслеживать относительные изменения концентрации аэрозолей, связанных с пылеподъемом и пылеобразованием в объекте «Укрытие».

На рис. 8 приведена информация по динамике организованного выброса долгоживущих радионуклидов, выносимых из «Укрытия», за период 1994–2005 гг.

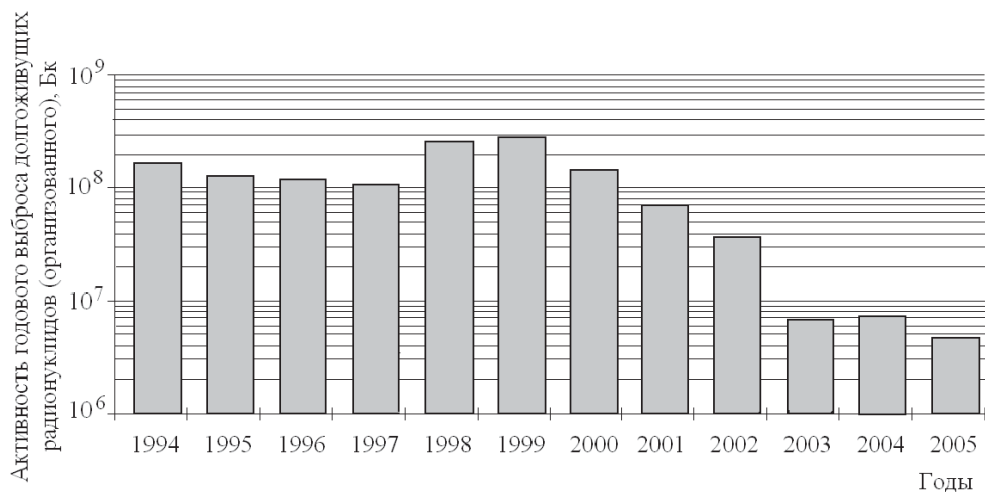


Рис. 8. Динамика организованного выброса долгоживущих радионуклидов через ВТ-2 в 1994–2005 гг.

Некоторые выводы (см., также, [9, 10]).

При статистически значимых изменениях выброса радиоактивных аэрозолей из «Укрытия» наблюдается хорошая корреляция между организованными и неорганизованными выбросами. Пример такой корреляции приведен на рис. 9 [1].

Отсюда следует, что:

- основной источник формирования аэрозолей для этих систем один и тот же — внутренние помещения объекта «Укрытия»;
- рассматриваемые системы мониторинга верно отображают относительную динамику выброса РАУ;

Опыт многолетних исследований показывает, что интенсивность выноса РАУ определяется действием суммы природных и техногенных факторов, в том числе:

- интенсивностью и периодичностью выпадения атмосферных осадков;
- метеоусловиями на промплощадке (температура, влажность, направление и скорость ветра);
- разностью температур внутри и снаружи объекта (см. рис. 10);
- интенсивностью процессов конденсации и испарения влаги внутри «Укрытия»;
- частотой подачи пылеподавляющих растворов в подкровельное пространство;
- объемом и составом пылеподавляющих растворов;
- характером и интенсивностью выполняемых на «Укрытии» работ.

Полученные результаты показали, что чем суше внутри блока, тем интенсивнее вынос радионуклидов и наоборот, чем больше воды из того или другого источника поступает в «Укрытие», тем чище воздух внутри и меньше вынос радионуклидов в окружающую среду.

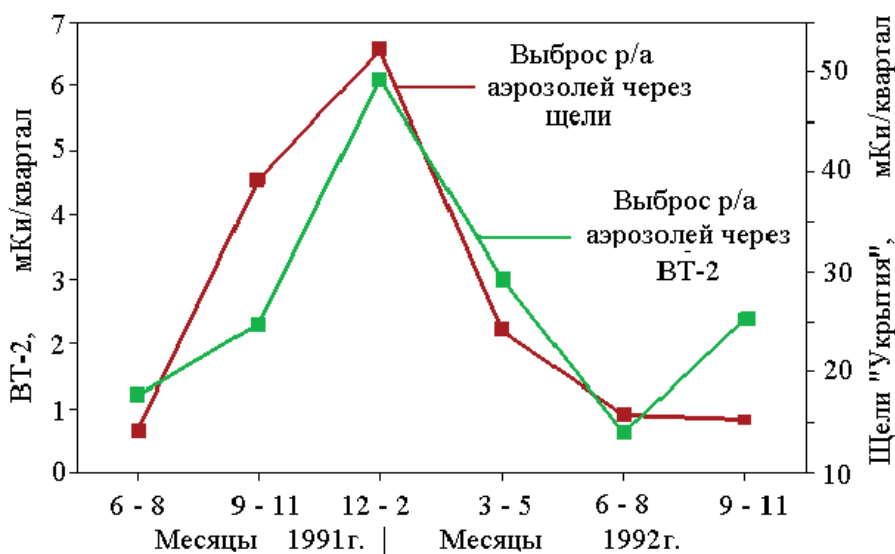


Рис. 9. Сравнение динамики выброса РАУ через ВТ-2 и через щели объекта

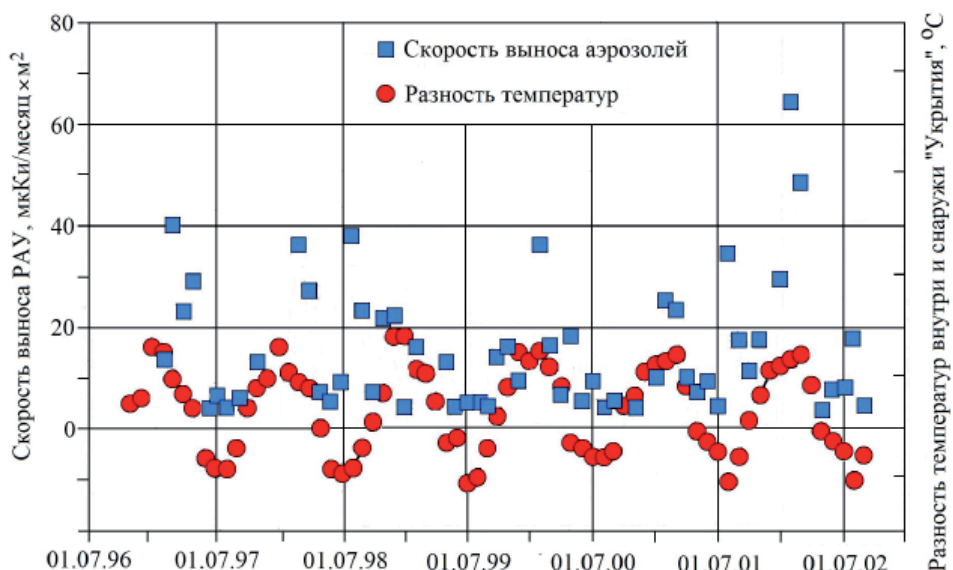


Рис. 10. Динамика неорганизованного выноса РАУ (β -активных) и разность температур внутри и снаружи «Укрытия» [10]

Приведенные выше природные и техногенные факторы, естественно, маскируют зависимость выброса от собственного состояния ТСМ. Однако, любое, сколько-нибудь сильное изменение этого состояния, например, начавшееся быстрое разрушение ЛТСМ, несомненно, было бы замечено.

12.2. Система пылеподавления

12.2.1. Создание системы пылеподавления

В 1989 г. результаты исследований «Укрытия» с помощью скважин и разведывательных групп, позволили сделать вывод о том, что этот объект все еще представляет значительную опасность.

В первую очередь речь шла о радиационной опасности.

Несмотря на проводимые работы по укреплению ряда строительных конструкций (см. выше) часть из них (западная стена по оси «50», опоры балки «Мамонт» и др.) все еще могла потерять устойчивость, как постепенно разрушаясь, так, и одновременно — при землетрясении или урагане.

Обрушение этих конструкций или их частей вызвало бы выброс большого количества радиоактивной пыли, прежде всего, из развала реактора.

Поэтому было решено как можно скорее принять превентивные меры (возможно избыточные), которые позволили бы максимально снизить опасность такого выброса из «Укрытия». В ходе обсуждения этих мер руководство КЭ (И.Н. Камбулов и др.) предложило создать под кровлей «Укрытия» стационарную систему пылеподавления. Ее пуск состоялся в конце 1989 г. [1]. В воздушное пространство над ЦЗ через люки в легкой кровле и проходки в трубном накате были опущены 14 форсунок, которые позволили проводить периодическое распыление специальных жидких составов (см. рис. 11–13).

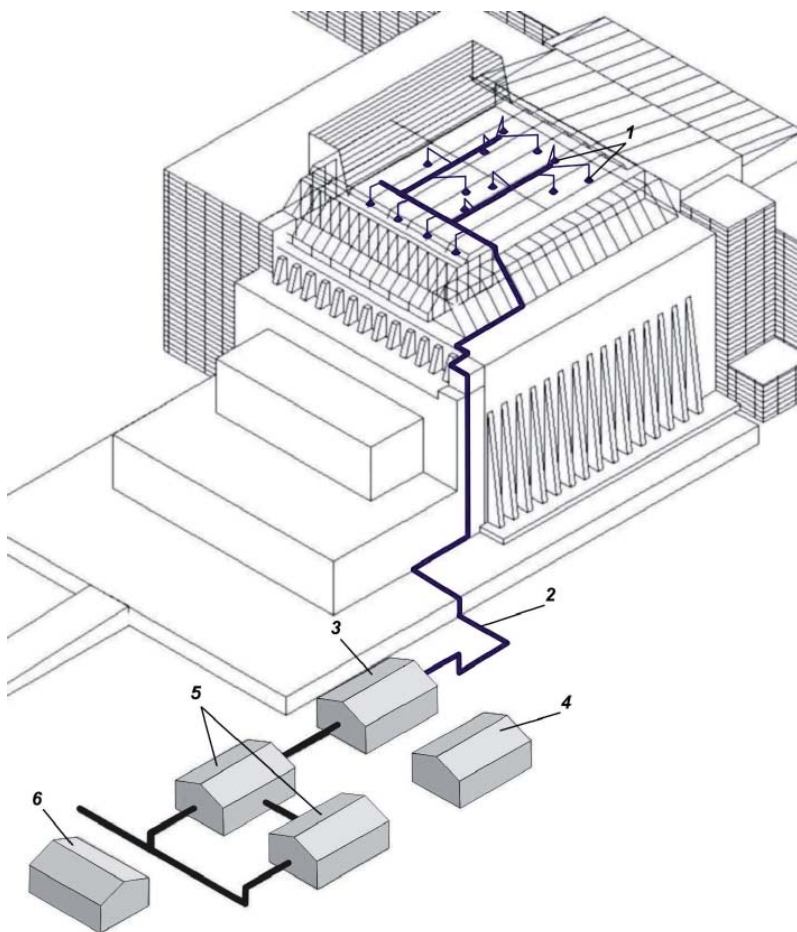


Рис. 11. Схема стационарной системы пылеподавления – СПП (1989 г.): 1 – форсунки, закрепленные над развалом в ЦЗ; 2 – напорный коллектор; 3 – насосное отделение; 4 – операторская; 5 – реакторы (помещение для емкостей смесителей); 6 – склад химреагентов

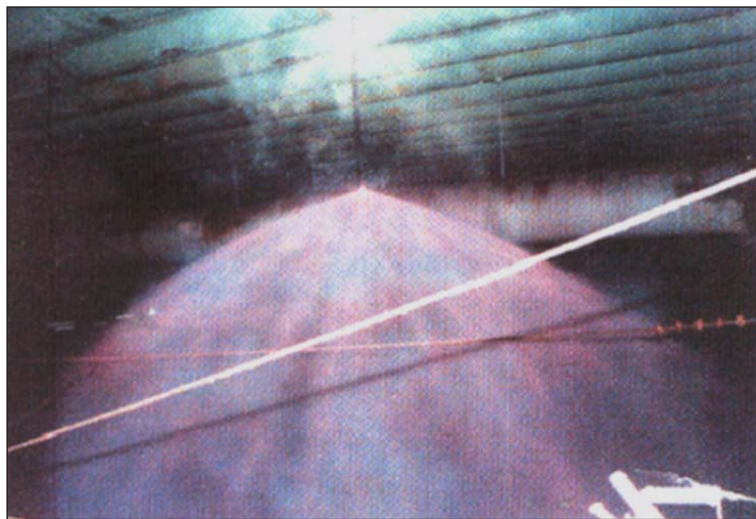


Рис. 12. Пылеподавляющий «факел» СПП над развалом в ЦЗ



Рис. 13. Размещение помещений для системы пылеподавления, с северо-западной стороны «Укрытия»

Таким образом, смачивалась и связывалась пыль на поверхности развала. В дальнейшем жидкость высыхала, создавая поверхностную пленку, препятствующую пылеобразованию. Пленка обладала высокой радиационной и химической стойкостью. Она относилась к классу пожаро – взрывобезопасных и экологически безопасных материалов.

Пылеподавляющий состав приготавливался в емкостях-смесителях и подавался по напорному коллектору насосами, установленными в специальных помещениях, расположенных на бетонной площадке с северо-запада объекта (рис. 11, 13).

Управление системой пылеподавления производится из операторского помещения, расположенного также на этой площадке.

Для определения эффективности работы СПП при вводе системы в эксплуатацию в 1989 были проведены измерения путем взятия кислотного мазка с поверхности образцов-свидетелей, размещенных в ЦЗ. Мазки брались до и после проведения пылеподавления [11]. Данные измерений приведены в таблице 1

Как следует из данных Таблицы 1, снимаемая составляющая поверхностного загрязнения, которая, в основном, и способствует распространению аэрозольных загрязнений, уменьшилась на 2–3 порядка.

Таблица 1. Сравнительная оценка взятия кислотных мазков с поверхности образцов-свидетелей

№ образца	Активность кислотного мазка с поверхности образца			
	До нанесения покрытия ($A_{исх}$)		После нанесения покрытия ($A_{кон}$)	
	Распадов, см ⁻² мин ⁻¹ (β-излучатели)	Распадов, см ⁻² мин ⁻¹ (α-излучатели)	Распадов, см ⁻² мин ⁻¹ (β-излучатели)	Распадов, см ⁻² мин ⁻¹ (α-излучатели)
1	2.7×10 ⁵	8.6×10 ⁴	1.1×10 ²	8.4×10 ¹
2	2.9×10 ⁶	9.0×10 ⁴	5.0×10 ³	1.6×10 ²
3	3.0×10 ⁶	8.0×10 ⁴	7.0×10 ³	2.0×10 ²
4	2.8×10 ⁵	9.0×10 ³	1.8×10 ²	7.0×10 ¹
5	9.0×10 ⁶	9.5×10 ⁴	7.5×10 ³	2.2×10 ²

Резкое уменьшение концентрации радиоактивных аэрозолей в локальной зоне «Укрытия» после начала работы СПП (см. рис. 14) подтвердило полученные результаты и явилось убедительным доказательством эффективности нового созданного барьера безопасности.

12.2.2. Выполнение СПП дополнительной функции – повышения ядерной безопасности объекта

В центральный зал и другие верхние помещения 4-го блока при аварии были выброшены многочисленные фрагменты активной зоны и значительная часть топливной пыли. В результате взаимодействия ядерного топлива с окружающими материалами, в том числе и сброшенными с вертолетов, в ЦЗ, с большой вероятностью, образовалась лава (см. раздел 7.3.1).

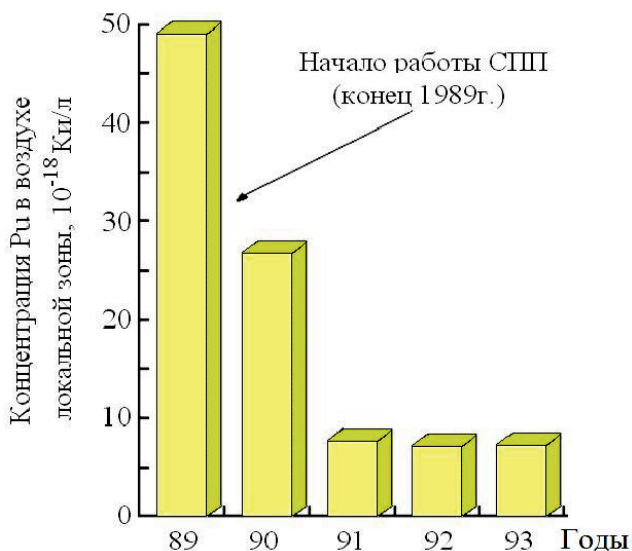


Рис. 14. Среднегодовая концентрация плутония в аэрозолях на промплощадке объекта «Укрытие»

Информация о ядерном топливе, находящемся в ЦЗ под многослойным слоем строительных и сброшенных с вертолетов материалов, крайне ограничена. Нет и достоверных данных о существовании там барьеров безопасности, препятствующих развитию СЦР.

Поэтому ЦЗ (по классификации «Анализа текущей безопасности...» [1]) отнесен к тем помещениям, в которых при попадании замедлителя (воды) нельзя полностью исключить возникновение СЦР.

При пылеподавлении в развал попадает дополнительное количество воды.

И хотя ее было на порядок меньше, чем проникающей в «Укрытие» при атмосферных осадках, вода эта может распространяться различными путями. В результате нет гарантии в том, что пылеподавление отрицательно не скажется на подкритичности топливных скоплений.

Поэтому при создании СПП было предусмотрено, введение в состав распыляемых растворов нейтронно-поглощающих веществ. Это должно было компенсировать негативное влияние воды при проведении пылеподавлений и приводить к дополнительному уменьшению $K_{эфф}$ для скоплений ТСМ.

В качестве нейтронно-поглощающей добавки был выбран азотнокислый гадолиний.

Эффективность этой меры может быть оценена на основании данных, приведенных в виде графика на рис. 15.

На нем представлены результаты расчетов величины K_{∞} для смеси окиси урана с водой для различных концентраций UO_2 , выполненные германским институтом Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH [12] (аналогичные результаты были получены в «Курчатовском институте» [13] и [14]).

Расчеты проводились с помощью программы SCALE-4 с использованием 27-ми групповой библиотеки на базе ENDF/BIV.

При расчетах гомогенная структура была выбрана из тех соображений, что образование в ЦЗ при взрыве сколько-нибудь упорядоченной крупной структуры АЗФ маловероятно.

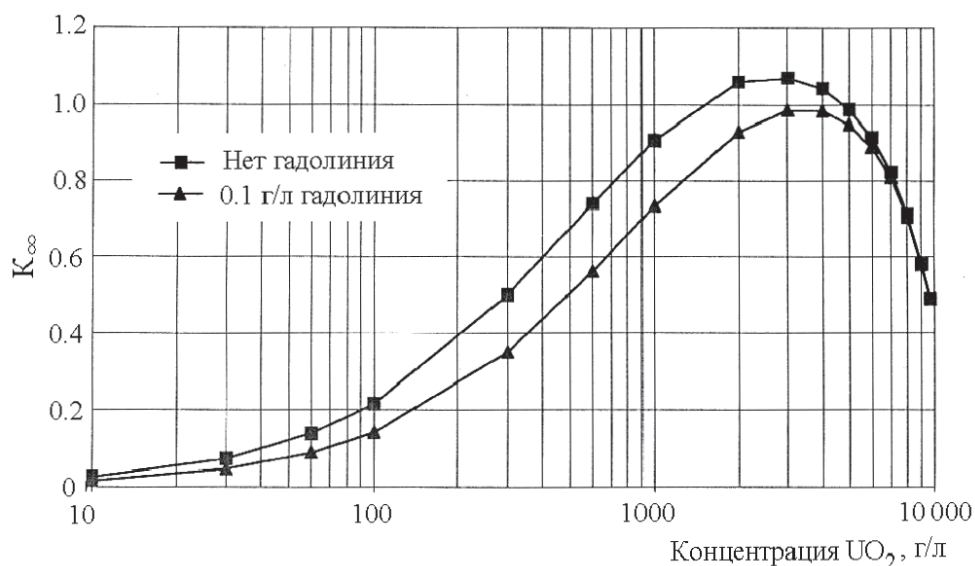


Рис. 15. K_∞ для смеси окиси урана с водой для различных концентраций UO_2 [12]

Из графика видно, что при концентрации гадолиния в воде равной 0.1 г/литр ($\sim 10^{-2}\%$) при любых смесях воды и топлива (для среднего выгорания топлива 11 МВт $\times$ сутки/кг (U)) цепная реакция невозможна.

Согласно регламенту концентрация гадолиния в промывочном растворе при использовании СПП составляла 0.1% (1 г/литр) азотнокислого гадолиния.

Порядковое превышение концентрации вводимого Gd над расчетной было выбрано из консервативных соображений.

Главное из них — возможность сорбции гадолиния при прохождении больших слоев разрушенных конструкционных материалов.

Действительно, материалы, находящиеся в ЦЗ, в том числе и ТСМ, могут частично задерживать нейтронный поглотитель, а очищенный от него раствор будет проникать на нижние отметки «Укрытия» и может попадать в скопления топлива.

Исследования показали, что такой процесс действительно имеет место, но полного очищения воды от Gd не наблюдалось.

Косвенным указанием на эффективность введения гадолиния в состав промывочных растворов служит и тот факт, что никаких нейтронных аномалий, коррелирующих с сеансами пылеподавления в областях контролируемых скоплений ТСМ, в течение всей эксплуатации СПП не наблюдалось.

12.2.3. Модернизация системы пылеподавления

Постепенно, в ходе эксплуатации становилось все более очевидным, что СПП далеко не полностью использует возможности пылеподавления в подкровельном пространстве «Укрытия». Эффективная площадь нанесения специальных составов составляла всего $\sim 1/3$ от общей площади развала (см. рис. 16), а состав самих растворов нуждался в оптимизации.

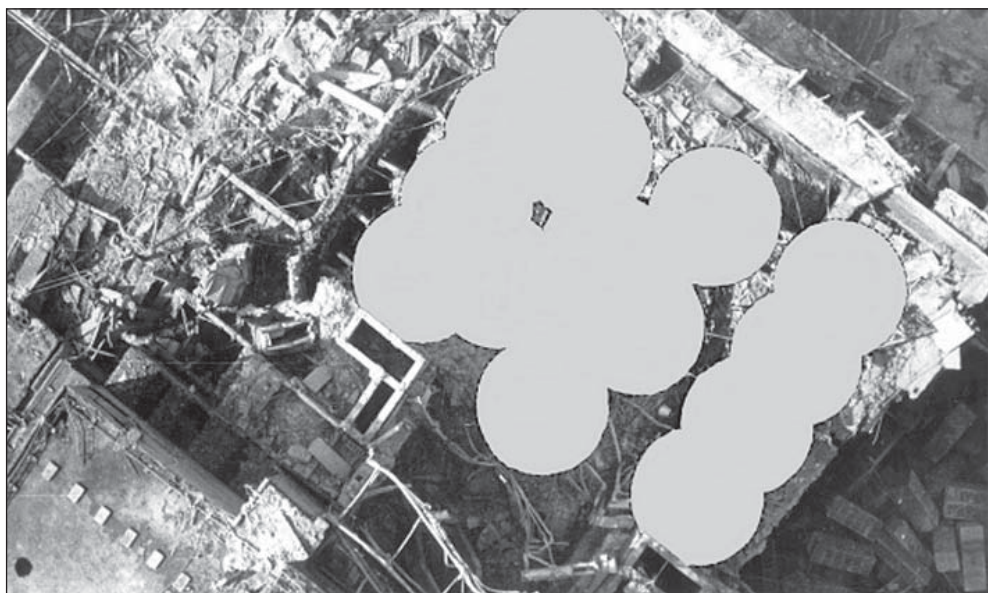


Рис. 16. Проекция факелов форсунок системы СПП в центральном зале

Поэтому после начала реализации Плана осуществления мероприятий на объекте «Укрытие» (SIP) встал вопрос о модернизации СПП (см. [11]).

Действительно, при проведении масштабных мероприятий, таких, как работы по стабилизации «Укрытия» и создание нового безопасного конфаймента, повышение безопасности работы персонала напрямую зависит от снижения концентрации радиоактивных аэрозолей, источником которых является «Укрытие».

Модернизация СПП была проведена в 2003–2004 гг. (см. [15, 16]).

Она включала монтаж двух дополнительных коллекторов (№ 2 и № 3) и форсунок по периферии подкровельного пространства, что позволило осуществлять нанесение пылеподавляющих покрытий на ранее не обрабатывавшиеся западную, южную и восточную зоны.

В результате обработке подвергается поверхность, лежащая в осях «40–53» – рядах «Б–С» (см. рис. 17–18).

В остальном, модернизированная установка максимально возможным образом использует имевшееся техническое оборудование, методы и технологические схемы работы СПП.

Предварительные испытания МСПП, проведенные в декабре 2003 г., показали, что в процессе пылеподавления происходит и подъем пыли с обрабатываемых поверхностей.

В результате было зарегистрировано кратковременное увеличение концентрации РАУ в некоторых помещениях объекта.

И, хотя оно не превысило установленных контрольных уровней, разработчики внесли изменения в состав пылеподавляющих растворов и в регламент их нанесения. Это позволило минимизировать эффект пылеподъема при работе МСПП.

В дальнейшем, в 2004–2005 гг. в период опытно-промышленной эксплуатации МСПП был выполнен целый комплекс исследовательских работ. Он позволил оценить эффективность работы МСПП и ее влияние на радиацион-

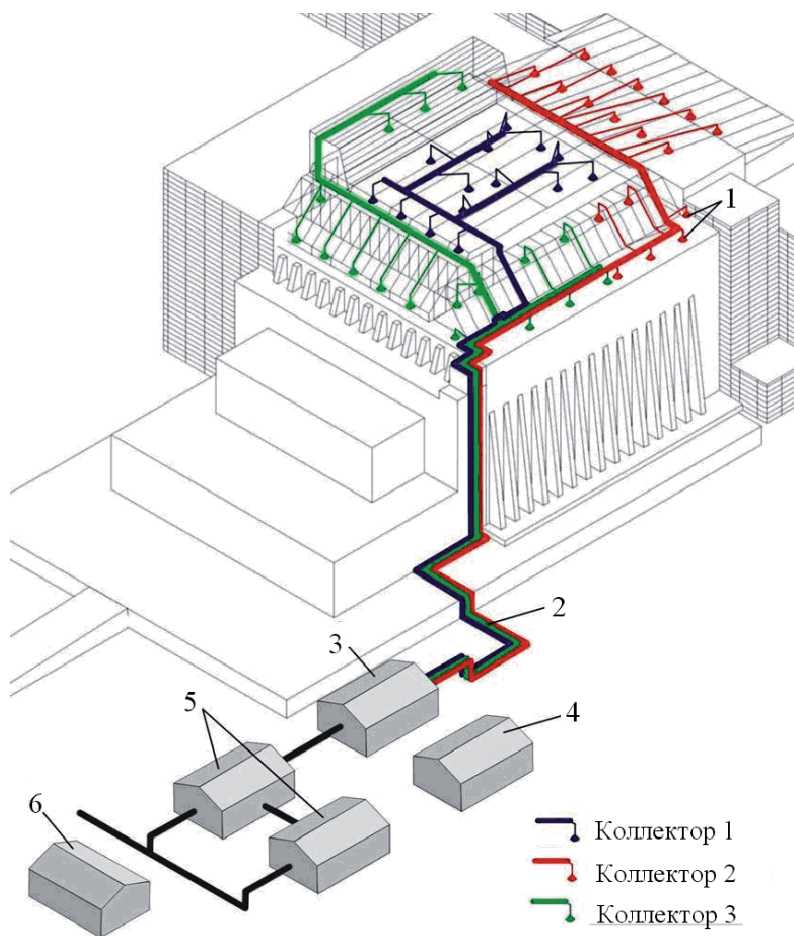


Рис. 17. Схема модернизированной системы пылеподавления — МСПП: 1 — форсунки, закрепленные над развалом ЦЗ; 2 — напорный коллектор; 3 — насосное отделение; 4 — операторская; 5 — реакторы (помещение для емкостей смесителей); 6 — склад химреагентов

ную обстановку внутри объекта «Укрытие» и окружающую среду при различных режимах работы.

В ходе испытаний были внесены также некоторые изменения в конструкцию МСПП.

В целом, испытания подтвердили соответствие МСПП техническим требованиям и возможность выполнения системой запланированных функций безопасности при нормальной эксплуатации, в процессе преобразования объекта «Укрытие» и при аварийных ситуациях

Регламент работы установки, разработанный ИПБ АЭС и КИ, рекомендует нанесение защитного полимерного покрытия осуществлять при подаче не 5 тонн пылеподавляющего состава одним коллектором за один сеанс. Для того, чтобы нанесенное полимерное покрытие успело высохнуть (затвердеть), или осуществить пропитку пылящего субстрата, интервал между сеансами пылеподавления на одном коллекторе должен быть не менее двух суток.

После сеанса пылеподавления проводится промывка каждого коллектора и форсунок раствором 0,1% азотнокислого гадолиния.

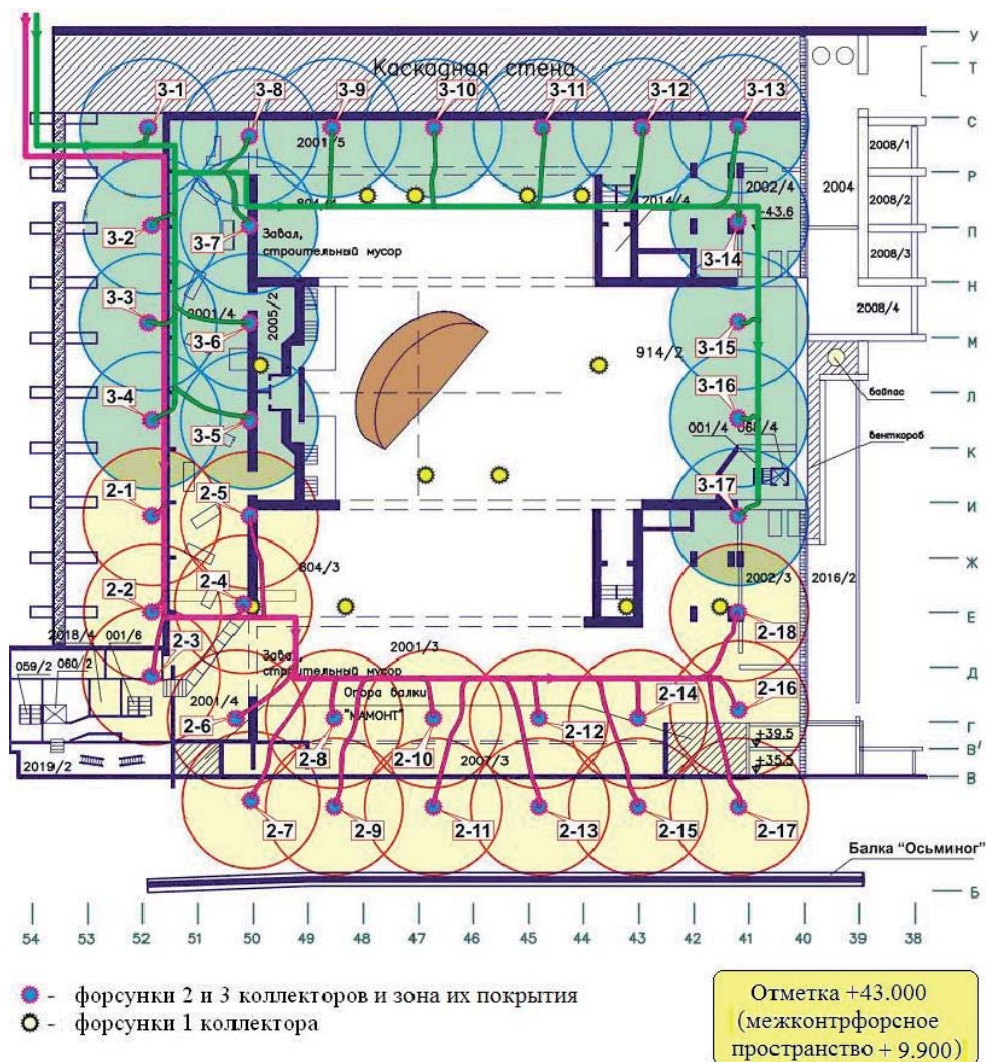


Рис. 18. Схема расположения коллекторов, форсунок МСПП и проекций факелов форсунок (для 2 и 3 коллекторов)

Модернизация достигается путем дополнительного распыления пылеподавляющего состава в: южной зоне между рядами Б–Д; северной зоне между рядами Р–С; западной зоне между осями 45–53; восточной зоне между осями 42–40

На рис. 19. приведена в графическом виде рекомендуемая последовательность проведения пусков одним из коллекторов.

В заключение раздела приведем таблицу 2 с некоторыми характеристиками МСПП.

12.2.4. Пылеподавляющие составы и защитные полимерные покрытия на их основе, применяемые при работе МСПП

В период опытно-промышленной эксплуатации при проведении испытаний МСПП использовалось для нанесения двух типов покрытий — аккумулирующего и локализирующего (рис. 21, 22).

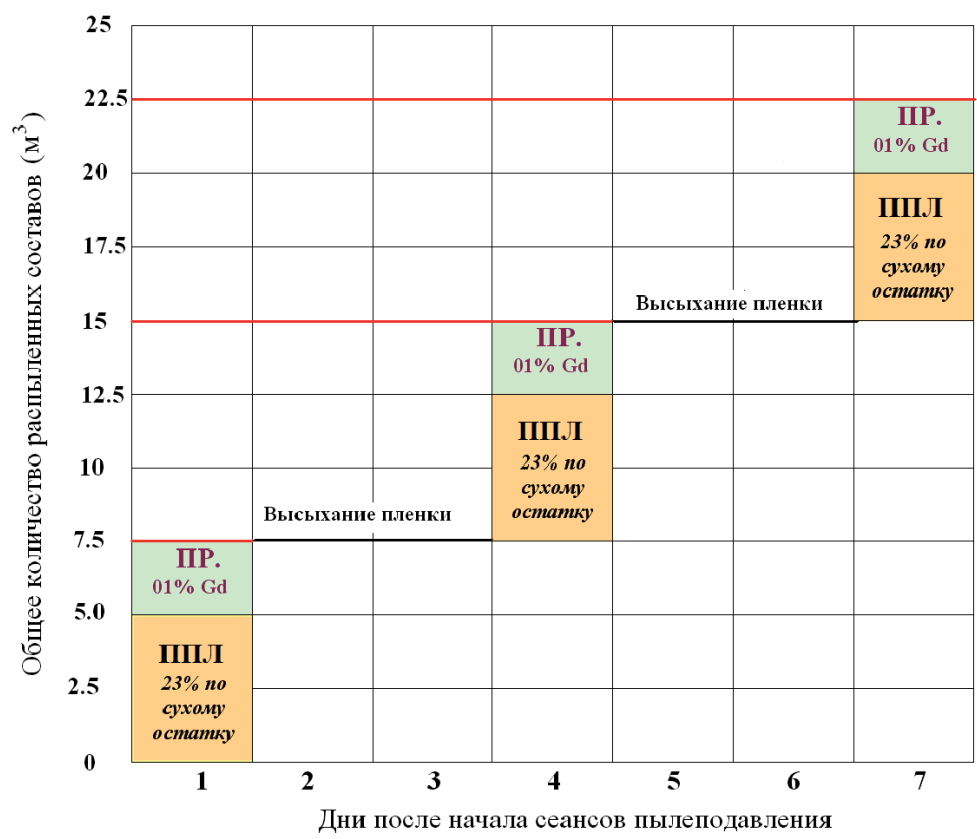


Рис. 19. Последовательность проведения пусков одним из коллекторов. Обозначения: ППЛ – локализирующий пылеподавляющий состав. ПР – промывочный раствор



Рис. 20. Сотрудники КИ и ОЯРБ после отбора проб в ЦЗ (испытания МСПП, 2005 г.)

Таблица 2. Общие технические характеристики МСПП

Характеристика	Численное значение
Рабочий объем пылеподавляющих составов	$6 \times 5,0 \text{ м}^3 = 30 \text{ м}^3$
Рабочий объем нейтронпоглощающего раствора (0,1% раствор 6-ти водного азотнокислого гадолиния)	$2 \times 5,6 \text{ м}^3$
Оперативная готовность установки	10 мин
Производительность распыления ППС	$10^5 \text{ м}^3/\text{ч}$
Координаты зоны распыла	оси 40–53, ряды Б–Т
Общее количество распылителей	49
Время перезарядки установки после срабатывания	24 ч
Условная вязкость пылеподавляющего состава при 25 °С	~15 с

В дальнейшем, на период промышленной эксплуатации, было решено исключить использование аккумулирующего состава, как при нормальной эксплуатации, так и в качестве аварийного.

После проведения пылеподавления для очистки трубопроводов и оборудования МСПП от остатков полимеризующегося пылеподавляющего состава система промывается специальным (промывочным) раствором. В состав промывочного раствора вводится нейтроннопоглощающее вещество.

Выбор наиболее оптимальных для условий объекта «Укрытие» пылеподавляющих составов и режимов их нанесения осуществлялся разработчиками, основываясь на данных нормативной документации [17–19], научно-технической литературы [20–23] и отчетной документации [24].

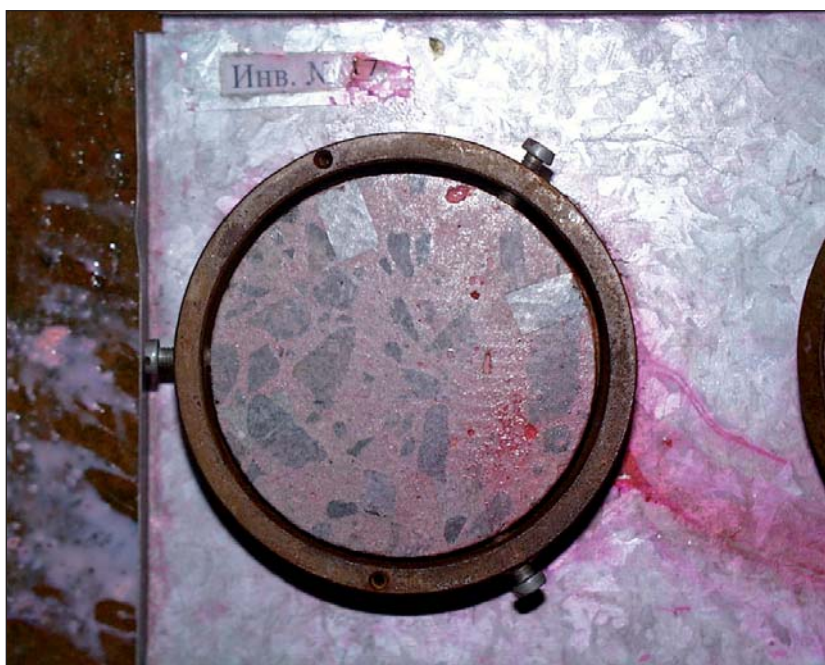


Рис. 21. Внешний вид локализирующего полимерного покрытия на бетонном керне



Рис. 22. Зафиксированная пылеподавляющим составом осыпь в южной части подкровельного пространства

Согласно документу [17], пылеподавляющие составы и покрытия на их основе должны отвечать следующим основным требованиям:

- выдерживать эквивалентную дозу облучения до 10 рад (гамма- и альфа-излучения);
- состав и покрытие на его основе должны отвечать требованиям пожаро- и взрывобезопасности;
- при деструкции (термической, радиационной) покрытие не должно выделять вредных примесей в окружающую среду (в том числе и при проведении технологических операций по удалению ТСМ);
- не оказывать коррозионного воздействия на металлические и бетонные поверхности;
- водоразбавимый или водорастворимый состав должен сохранять свои эксплуатационные и технологические характеристики при температуре окружающего воздуха от 5 до 40 °С;
- покрытие должно обладать водо-, атмосферо- и химстойкостью в течение всего срока эксплуатации (не менее 12 месяцев);
- покрытие должно выдерживать кратковременное воздействие температур до 100 °С;
- составы должны представлять собой одно- (двух-) компонентную композицию;
- жизнеспособность готовых к употреблению композиции должна составлять не менее 12 месяцев;
- свойства состава должны позволять его распыление при помощи установки МСПП.

Наконец, необходимо учитывать стоимость сырья или композиции.

Была выполнена сравнительная оценка свойств пылеподавляющих составов, которые использовались на «Укрытии» и наносились установкой СПП. Ее результаты приведены в отчете [24].

В дальнейшем, при проведении работ по модернизации СПП с целью выбора наиболее перспективного состава и отработки оптимальных режимов его нанесения в стендовых условиях (максимально приближенных к условиям эксплуатации МСПП), было проведено дополнительное тестирование пылеподавляющих составов еще 4-х марок.

Методика и результаты тестирования приведены в работе [25].

Работа по тестированию показала, что наиболее перспективным составом для применения в условиях ОУ являются составы марок АК-510 и АК-511 на основе силоксан-акрилатного связующего марки КЭ-1336.

На эти составы были оформлены технические условия Украины [26].

Рецептуры пылеподавляющих составов и пылеосаждающего состава для заправки одного реактора-смесителя приведены в табл. 3.

Таблица 3. Рецептуры пылеподавляющих составов для заправки одного реактора МСПП

№ п.п.	Наименование компонента	№№ рецептуры		
		№ 1	№ 2	№ 3
1.	Вода (ГОСТ 2874-82), кг	4450	2500	4975
2.	Концентрат состава пылеподавляющего полимерного защитного марки АК-510, АК-511, (ТУ У 24.6-25661375-001-2004, /ТУ 952850 2004) кг	550	2500	—
3.	Кислота олеиновая техническая. Технические условия (ГОСТ 7580-91), кг	30	—	—
4.	Спирт этиловый. Марка А ГОСТ 17299-78 (РВО ГОСТ 5962-67), кг	25	—	—
5	Поверхностно активное вещество ОП-7 или ОП-10, кг	—	—	25

Технологическое наименование пылеподавляющих составов по рецептуре:

- состав, приготовленный по рецептуре № 1 — аккумулярующий состав⁴;
- состав, приготовленный по рецептуре № 2 — локализирующий состав⁵;
- раствор, приготовленный по рецептуре № 3 — пылеосаждающий раствор⁶.

12.2.5. Исследования защитного пленочного покрытия в 2009 г. [27]

В сентябре—декабре 2009 г. специалисты ИПБ АЭС провели дополнительные исследования для определения характеристик защитного пленочного покрытия подкровельного пространства объекта «Укрытие», создаваемого МСПП.

⁴Аккумулярующий состав использовался на стадии опытно-промышленной эксплуатации при проведении испытаний МСПП.

⁵Рекомендован в условиях нормальной эксплуатации.

⁶Рекомендован к применению в случае значительного пылеподъема.

Экспериментальные исследования включали:

- оценку снимаемого загрязнения поверхностей на верхних отметках в объекте «Укрытие»;
- отбор образцов-свидетелей в подкровельном пространстве объекта «Укрытие», визуальный осмотр покрытия и фотосъемки;
- определение характеристик полимерного покрытия на образцах при помощи оптического и сканирующего электронного микроскопов;
- измерения толщины защитного полимерного покрытия на металлических поверхностях электромагнитным методом и др.

Всего в подкровельном пространстве объекта «Укрытие» отобрано 20 образцов — шесть в межконтрфорсном пространстве и 14 в районе западной опоры балки «Мамонт».

Визуальный анализ состояния защитного полимерного покрытия проводился на основе наблюдений и фотосъемки локализирующего покрытия непосредственно в центральном зале и межконтрфорсном пространстве объекта «Укрытие» (рис. 23).

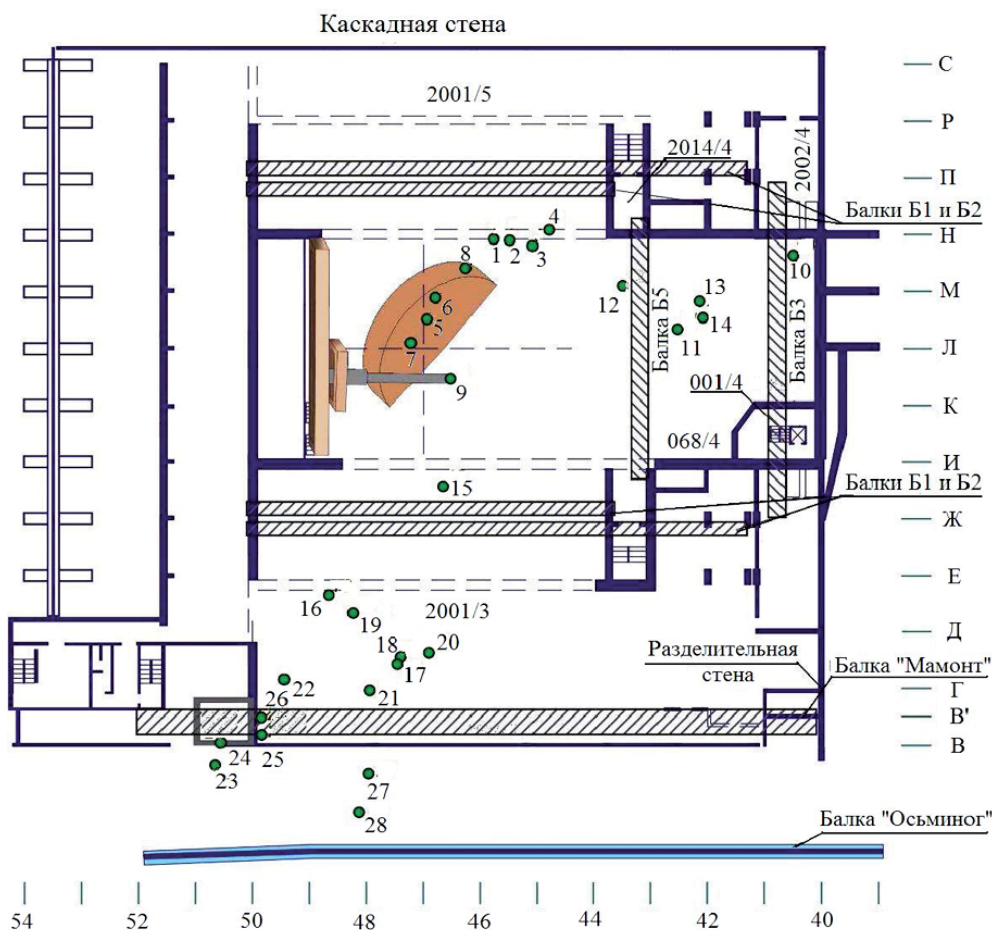


Рис. 23. Расположение мест фотосъемки пленочного покрытия, образовавшегося при работе МСПП. Съемка велась в 2007–2009 гг.

Приведем выводы этой работы.

«Созданное защитное полимерное покрытие хорошо выполняет локализирующую функцию и надежно закрепляет радиоактивную пыль. Оно обладает необходимой радиационной и атмосферостойкостью.

Полимерное покрытие эластично и при механическом разрушении не образует осколков, что важно при демонтаже и аварийных ситуациях.

При достижении минимальной технологической толщины (более 150 мкм) полимерное покрытие защищает от коррозии и разрушения бетонные и металлическое конструкции (это повышает устойчивость всего сооружения и резко сокращает генерацию «новой» радиоактивной пыли)».

12.2.6. Дальнейшее использование МСПП

В настоящее время (2012г.) срок службы МСПП точно не определен.

Согласно «Концептуальному проекту НБК» (см. [28]), при проведении мероприятий по преобразованию объекта «Укрытие» МСПП может быть использована (после соответствующей реконструкции) вплоть до ввода в эксплуатацию нового безопасного конфаймента.

В дальнейшем, при частичной разборке нестабильных конструкций «Укрытия» предполагается, что она будет демонтирована, а ее функции перейдут к мобильной системе пылеподавления.

12.3 Радиационная авария

12.3.1. Первые оценки опасности обрушения верхних конструкций «Укрытия»

11 октября 1986 года Правительственная комиссия приняла документ — «Вывод о надежности и долговечности конструкций покрытия, а также радиационной безопасности реакторного отделения блока № 4 Чернобыльской АЭС».

В нем говорится о сроках службы «Укрытия». В частности о надежности старых (см. рис. 24) конструкций 4-го блока:

«В связи с тем, что укрытие реакторного отделения строится на разрушенных конструкциях и в условиях высокой радиационной обстановки, а также, учитывая сложность установки конструкций и контроля их положения, не имеем возможности получить достоверные данные об их несущей способности».

В этом же документе сказано и о конструкциях, возведенных при строительстве (см. рис. 24):

«Учитывая низкую скорость коррозии в условиях работы конструкций при выполненных защитных покрытиях можно считать обеспеченным срок их службы: из труб 30–40 лет, из балок — 30 лет».

Уже говорилось, что первостепенными задачами КЭ стали задачи определения надежности конструкций объекта, оценки опасности последствий, которые могут возникнуть при его разрушении и выработка контрмер, позволяющих минимизировать такие последствия.

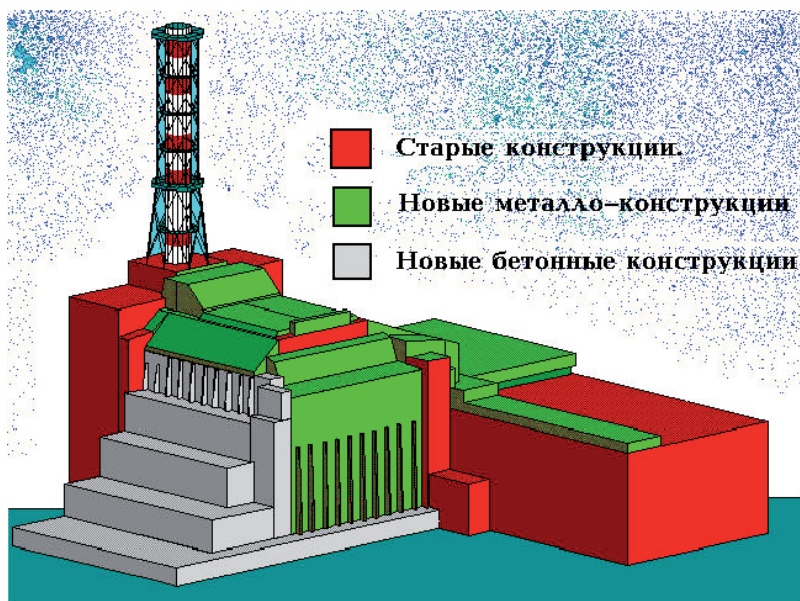


Рис. 24. Старые и новые конструкции, вошедшие в состав объекта «Укрытие»

И первые исследования, проведенные КЭ в 1988 г., показали, что в результате деградационных причин или при экстремальных внешних воздействиях, таких, как землетрясение (≥ 5 баллов) или ураган, нельзя исключить возможности обрушения старых, поврежденных взрывом и пожаром конструкций блока.

На некоторые из них опирались новые верхние конструкции «Укрытия», которые также могли упасть.

Насколько опасна могла быть такая радиационная авария?

Для оценки ее последствий и выработки технических и организационных контрмер было необходимо иметь достаточно детальную информацию о свойствах пылевого загрязнения в помещениях «Укрытия» и реалистические сценарии процесса разрушения и падения конструкций. Информация эта вначале имела самый общий характер, но постепенно уточнялась и детализировалась по мере накопления результатов исследований КЭ.

Параллельно исследованиям на объекте велась работа по укреплению поврежденных конструкций (см. раздел 10.1) и проводились превентивные меры по снижению возможного выброса пыли при возможных обрушениях (см. раздел 11.2).

Это также приводило к изменению оценок вероятности возникновения и последствий радиационных аварий.

В течение первых лет наибольшее опасение вызывал сценарий радиационной аварии, связанной с обрушением по деградационным причинам балок Б1 и Б2.

Это обрушение могло повлечь за собой падение других верхних конструкций «Укрытия», вызвать так называемый «коллапс», сопровождающийся выбросом радиоактивной пыли (см. рис. 25).

Выводы, к которым пришли специалисты трех независимых групп из КИ и ИБРАЭ (Россия, 1992 г.), GRS (Германия, 1994 г.), ИРЭП (Беларусь, 1992 г.),

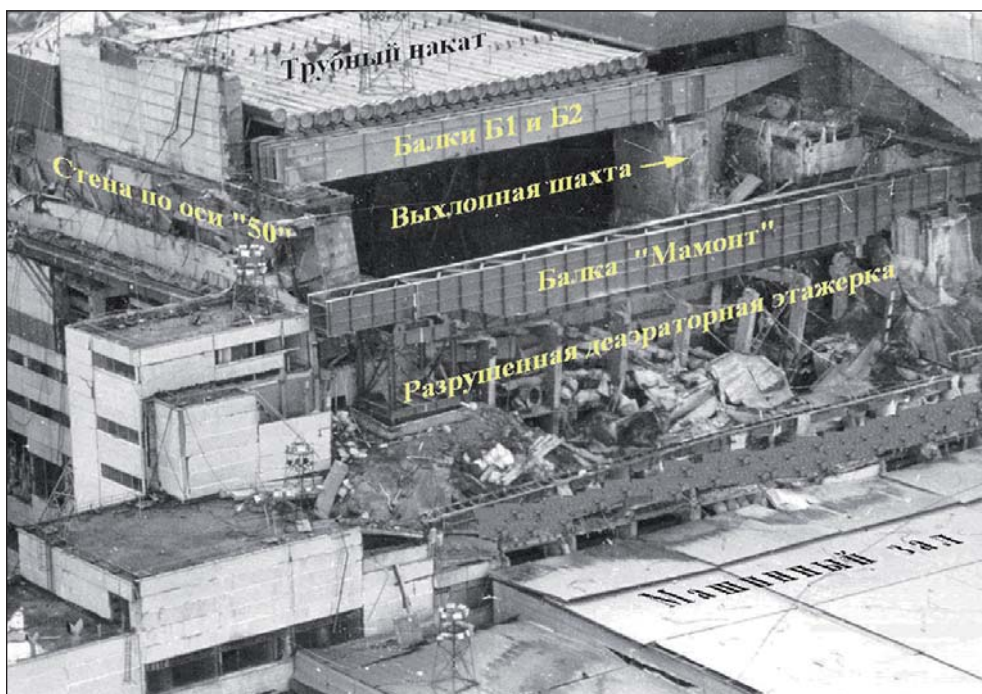


Рис. 25. Основные балки, поддерживающие кровлю «Укрытия» и трубный накат. Балки Б1 и Б2 опираются на полуразрушенную стену по оси «50» и пострадавшие при аварии вентиляционные шахты (См. также Часть 1, Гл. 2, рис. 4). Их падение может вызвать «коллапс» верхней части «Укрытия»

обобщенные в первой редакции «Анализа текущей безопасности...» (см. [29, 30]), сводились к следующему.

- При малой скорости ветра и на небольших расстояниях от «Укрытия» ингаляционные дозы, получаемые при прохождении радиоактивного облака, возникшего при обрушении, являются крайне высокими и на два порядка превышают ПДД для персонала.

- При этом нельзя исключить отдельные поздние летальные исходы для людей, занятых на промплощадке ЧАЭС.

- Дозы от ингаляции снижаются ниже ПДД на расстояниях менее 10 км. За пределами 30 км зоны ингаляция не является опасной для населения.

- Влияние дождя на их величину несущественно.

- Ингаляционные дозы обусловлены в основном долгоживущими трансурановыми элементами, поэтому выбор времени аварии в пределах нескольких лет не существен.

- Дозы от излучения почвы (рис. 26), загрязненной при аварии, (при времени пребывания 30 рабочих дней) являются на порядок меньшими по сравнению с ингаляционными и также уменьшаются при удалении от объекта.

К моменту выпуска следующей версии «Анализа...» [1] (2001 г.) ситуация существенным образом изменилась.

Во-первых, узел балок Б1 и Б2 был частично укреплен (рис. 27). Надо было переходить к рассмотрению надежности других конструкций.

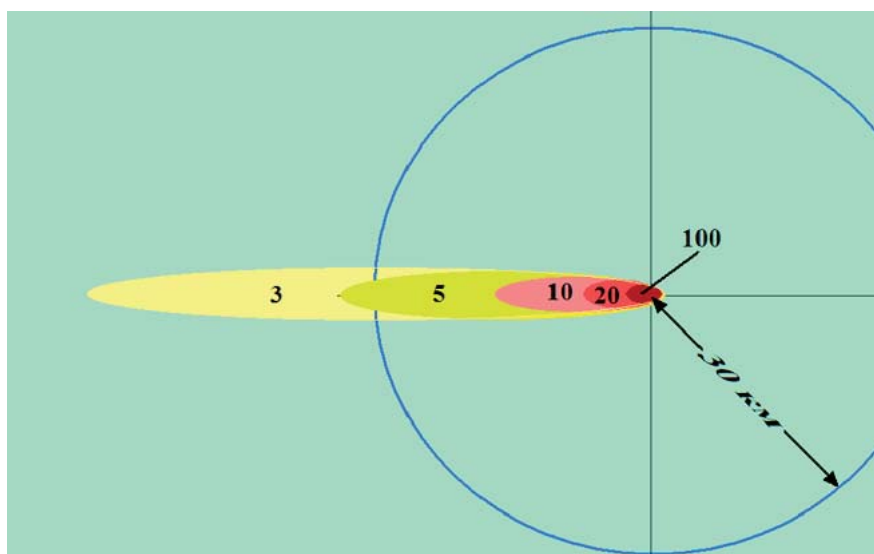


Рис. 26. Загрязнение территории (Ки/км²) при гипотетической аварии на объекте «Укрытие», связанной с обрушением кровельных конструкций

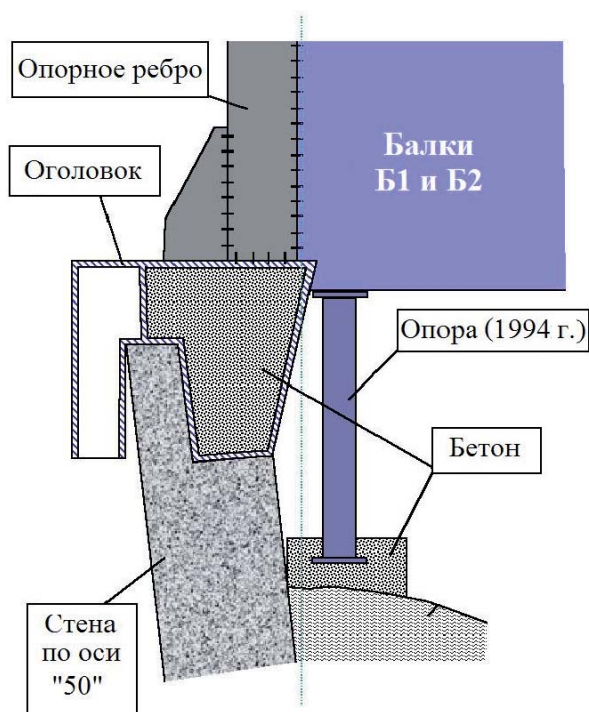


Рис. 27. Укрепление опор балок Б1-Б2 в узлах 50/Ж и 50/П (1999 г.)

Во-вторых, благодаря работам, выполненным КИ, ЧАЭС и МНТЦ в 1996–1999 гг. [31–33], удалось собрать новый экспериментальный материал по количеству, аэродинамическим характеристикам пыли, её адгезии и т.п.

Эти данные оказали существенное влияние на модель расположения пыли и оценки ее возможного вовлечения в пылевое облако при обрушении конструкций.

В-третьих, в работах [34–35] была предложена и развита аэродинамическая модель «Укрытия» и для нее адаптированы расчетные методы для определения формирования и распространения пылевого загрязнения.

Рассмотрим результаты этих работ более подробно.

12.3.2. Сценарий обрушения строительных конструкций («Анализ...2001 г.» [1])

После укрепления опор балок Б1-Б2 в узлах 50/Ж и 50/П (рис. 27) вероятность их обрушения уменьшилась и на первый план, по оценкам, сделанным в 1998 г., вышло разрушение западной стены с прилегающим каркасом (оси 49–51) и последующее обрушение конструкций на верхних отметках «Укрытия».

Иницилирующим событиям здесь могло стать землетрясение с интенсивностью ~4.5 балла и направлением воздействия «запад-восток» или «север-юг».

Предполагаемые последствия таких сейсмических воздействий следующие.

При разрушении западной стены по оси 50:

- обрушится верхняя часть (до отм. 12) западной стены с прилегающим каркасом (оси 49–51');
 - обрушится опирающееся на нее западное покрытие между контрфорсной стеной и стеной по оси 50 (горизонтальные щиты и Г-образные западные «клюшки»);
 - сойдут с опор западные концы блоков балок Б1-Б2 (западная контрфорсная стена выдержит воздействие)⁷;
 - полное падение в ЦЗ отдельных труб покрытия маловероятно, так как длина труб значительно больше расстояния между блоками балок Б2. Скорее всего один из концов какой-то трубы (или несколько труб) может упасть на завалы ЦЗ;
 - элементы конструкций, прилегающих к западной стене в осях 49–51' а также элементы покрытия между контрфорсной стеной и стеной объекта «Укрытие» по оси 50 образуют завал в пространстве между объектом и контрфорсной стеной;
 - южные щиты (все или некоторые) обрушаться, так как их южные концы (опоры) сойдут с балки «Мамонт» (рис. 28);
 - северные «клюшки» наклонятся в сторону ЦЗ, часть из них обрушится, так как их северные концы сойдут с опор на северной контрфорсной стене (рис. 29).

Зонами потенциального пылеобразования являются зоны 1, 2, 3, 4 (рис. 30).

12.3.3. Исследования топливной пыли на поверхности развала ([31–33])

В 1997–1998 гг. группой сотрудников КИ, МНТЦ и ЧАЭС под руководством С.А. Богатова был проведен цикл исследований количества и свойств радиоактивной пыли в пространстве под кровлями объекта «Укрытие». Всего

⁷Расчеты показывали, что плоского падения блока балок Б2 вместе с опирающимися на него трубным накатом и блоками легкой кровли не будет, так как восточные оконечности блоков балок Б1 и Б2, сместившись, все же будут опираться на стены выхлопных шахт.



Рис. 28. Зона пылеобразования при падении южных щитов



Рис. 29. Зона пылеобразования при падении северных «клюшек»

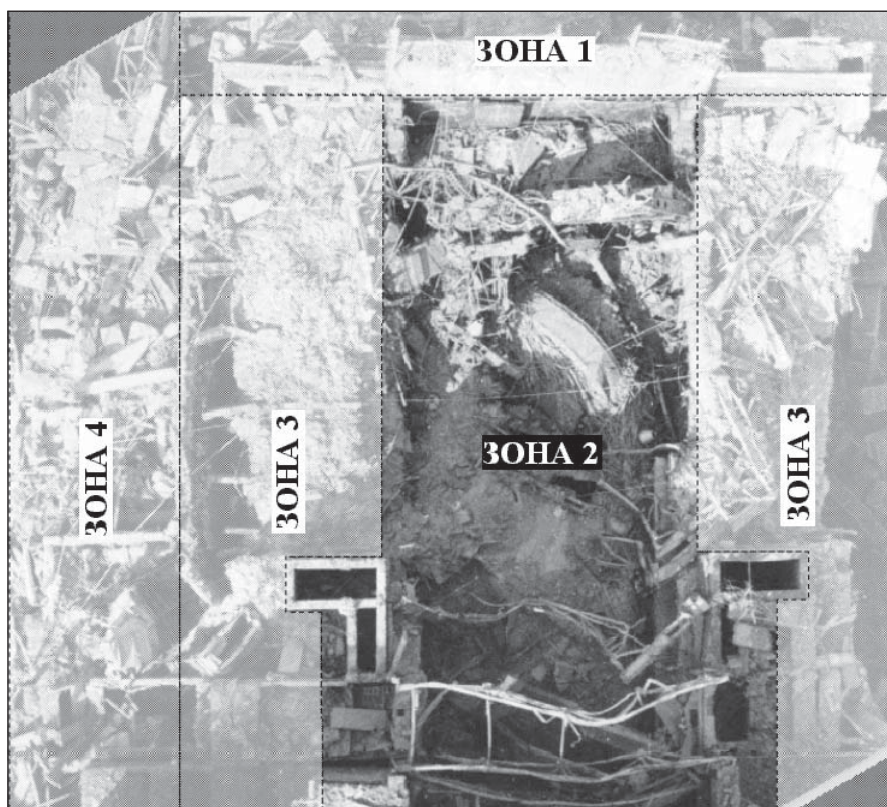


Рис. 30. Зоны потенциального пылеобразования при обрушении кровельных конструкций «Укрытия»

было отобрано 88 образцов, включая 38 образцов, собранных в центральном зале. Рис. 31 дает представление о топографии развала, а на рис. 32 указаны места отбора проб.

Исследования касались следующих свойств пылевого загрязнения.

Доля снимаемой активности.

С помощью отбора спиртовых мазков определялось нефиксированное (снимаемое) поверхностное загрязнение⁸. Эффективность этой процедуры определялась анализами повторно взятых с той же площади мазков.

Они показали, что на первом мазке остается от 10 до 80% снимаемой поверхностной активности при среднем значении — 50%.

Для оценки доли фиксированного (не снимаемого на спиртовой мазок) загрязнения рядом с местами взятия нескольких мазков отбирались образцы, представлявшие собой фрагменты бетона из развала.

В лабораторных условиях при помощи выщелачивания из поверхности образцов извлекалась практически вся активность и находившееся на ней ядерное топливо.

Данные по доле снимаемого загрязнения по радионуклидам цезия, америция, плутония, стронция и урану приведена в таблице 4 [32].

⁸В качестве шаблона использовалось проволочное кольцо с внутренним диаметром 8 см ($S = 50.3 \text{ см}^2$).

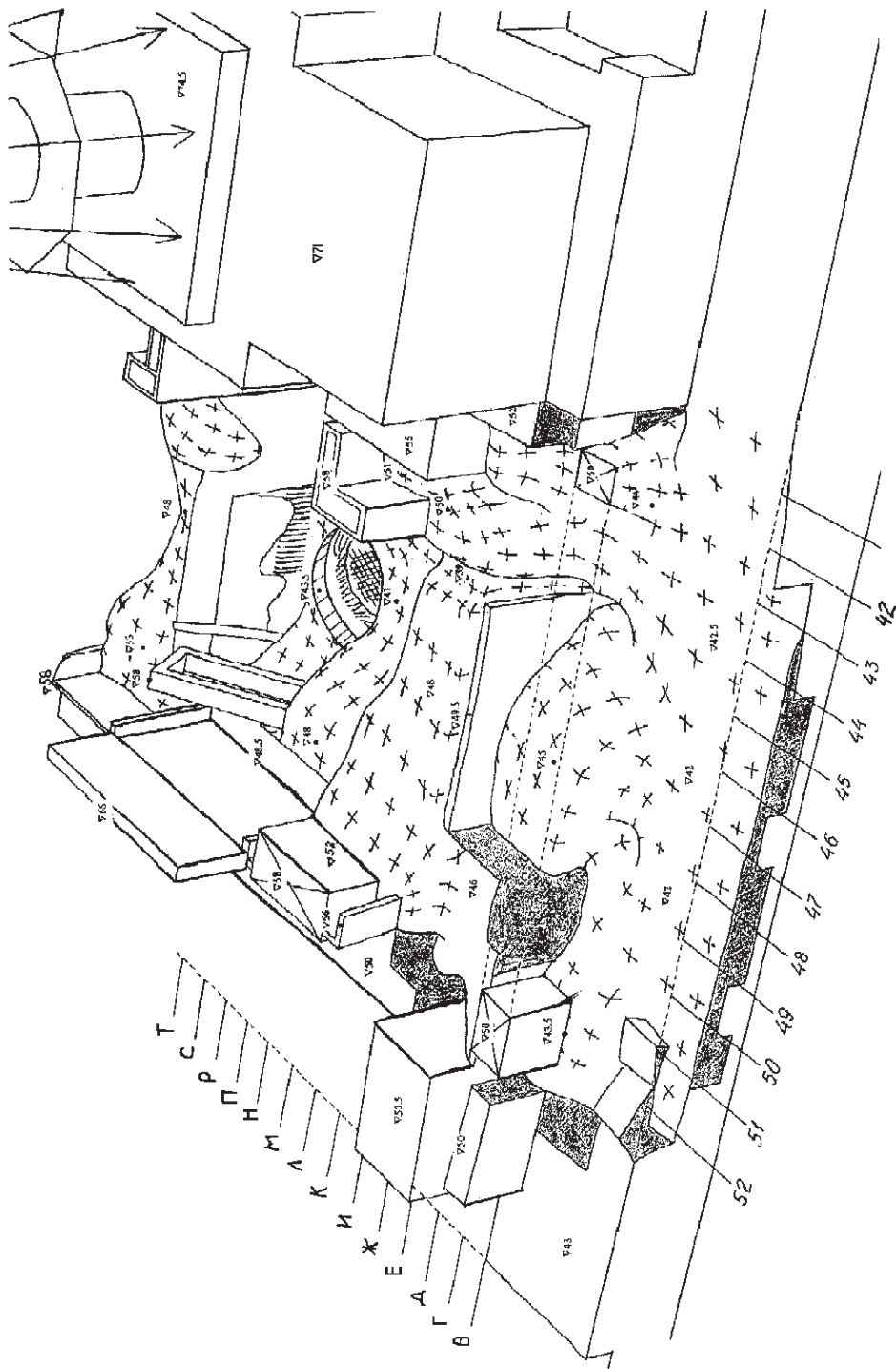


Рис. 31. Схема поверхности развала в ЦЗ. Под кровлей «Укрытия» находятся «холмы» материалов, покрытых топливной пылью

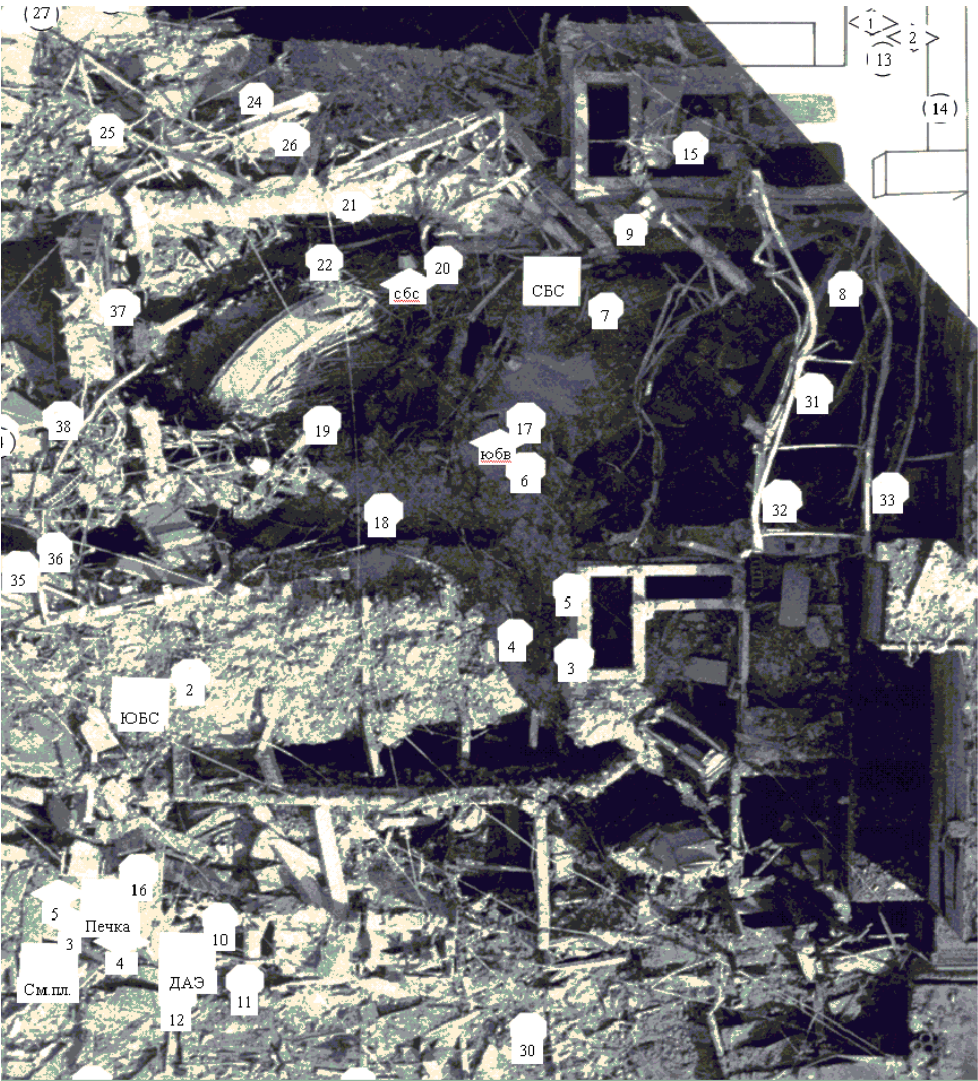


Рис. 32. Места отбора образцов в центральном зале (места отбора с помощью мазка отмечены цифрами на белой вставке)

Таблица 4. Отношение полного и снимаемого на спиртовой мазок загрязнения для образцов, отобранных в подкровельном пространстве объекта «Укрытие»

Элемент	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	²³⁸ Pu	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	⁹⁰ Sr	U
Отношение полного загрязнения к снимаемому	38	41	56	52	22	45
Среднее	42 ± 11					

На основании проведенных исследований был сделан вывод, что доля снимаемой активности составляет ~2%.

Определение радионуклидного состава частиц пылевого загрязнения.

В отбиравшихся образцах определялись активности гамма излучающих нуклидов, ⁹⁰Sr, трансурановых элементов, содержание урана и масса снятой пыли.

Результаты сравнения для радиологически наиболее опасных нуклидов с расчетными значениями [30] приводятся в таблице 5 [32].

Таблица 5. Средние по всем образцам удельные (по урану) активности пыли из «развала» и их сравнение с расчетными значениями (на июнь – июль 1997 г.).

Радионуклид	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	²³⁸⁺²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	⁹⁰ Sr
Средняя удельная активность, Бк/г(U)	1.4×10 ⁹ (1.3×10 ⁹)*	1.4×10 ⁷ (5.8×10 ⁶)	2.1×10 ⁷ (1.1×10 ⁷)	5.6×10 ⁸ (2.3×10 ⁸)
Активность в топливе, Бк/г(U)	1.1×10 ⁹	1.3×10 ⁷	1.9×10 ⁷	9.2×10 ⁸

*В скобках дано среднеквадратичное отклонение.

По отношению к базовому составу топлива в изученных образцах пыли наблюдается значительное обеднение по стронцию-90. Сравнение этого значения с результатами 1989–90 гг. позволяет предположить, что за это время происходил смыв стронция-90.

Определение аэродинамических характеристик частиц пылевого загрязнения.

При отборе мазков с поверхностей развала проводился и отбор макрообразцов – обломков бетона, кусков ткани (парашюты, мешки засыпки, теплоизоляция...), фрагментов графита и битумного покрытия крыши, металла и т.п. Все они складывались в один полиэтиленовый контейнер. После набора достаточного количества образцов проводился эксперимент по искусственному пылеподъему и анализу сдуваемой пыли с помощью импактора. Для этого к одному из торцов контейнера подсоединялся компрессор, нагнетающий в него воздух. К другому торцу подсоединялся импактор.

В процессе экспериментов проводилось встряхивание образцов в контейнере, обеспечивавшее интенсивный пылеподъем. С помощью этих измерений были получены распределения активности по фракциям пылевых частиц с различными аэродинамическими диаметрами (таблица 6).

Таблица 6. Распределение активности по фракциям пылевых частиц с различными аэродинамическими диаметрами, %

Диапазон размеров, мкм	>14	14–8	8–4.3	4.3–2	2–1.2	1.2–0.5	<0.5
¹⁵⁴ Eu	29	38	22	6	3	1	1
¹³⁴ Cs	21	32	26	12	5	2	2
¹³⁷ Cs	20	32	27	11	6	2	2
²⁴¹ Am	31	36	22	6	3	1	1
⁶⁰ Co	18	27	29	13	8	2.5	2.5
²³⁸ Pu	25	38	25	8	2	1	1
²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	25	37	26	8	2	1	1
⁹⁰ Sr	21	34	22	18	2	1	2
U	14	42	34	4	4	1	1

Из таблицы видно, что медианные (по активности основных радионуклидов) значения аэродинамических диаметров пылевых частиц лежат в диапазоне 6...9 мкм.

Массовое распределение пылевых частиц смещено в сторону несколько больших размеров.

Интенсивность переноса пыли в естественных условиях изучалась с помощью установленных на поверхности развала адсорбирующих планшетов.

Определение интегрального запаса топливной пыли на поверхности развала и ее количества, способного к вторичному подъему.

Эти важнейшие характеристики для оценки пылевого выброса при радиационной аварии были получены в работах [31–34].

Для этого были проведены оценки средней плотности топливного загрязнения поверхности «развала», определена его площадь и сделаны выводы о количестве пыли, способной к подъему при обрушении конструкций кровли «Укрытия».

Что касается средней плотности топлива на поверхности «развала», то для ее оценки привлекались не только данные, полученные в работах 1997–1999 гг. (см. выше), но и результаты проведенных в 1986–1997 гг. исследований, из которых было возможно получить эту информацию (см. таблицу 7) [32].

С учетом площади горизонтальной проекции поверхности всего развала, способной к генерации пыли ~5500 м² [31], интегральный запас топливной пыли на этой поверхности составит около 5 тонн (по урану), из которых около 100 кг могут быть отнесены к снимаемому загрязнению.

12.3.4. Последствия радиационной аварии («Анализ ... 2001 г.» [1])

Как уже говорилось, в работах [33–35] была предложена и развита аэродинамическая модель «Укрытия» и для нее адаптированы расчетные методы для определения формирования и распространения пылевого загрязнения.

Параметры этой модели и результаты расчетов представлены в редакции «Анализа ... 2001 г.» [1].

Поскольку дальнейшие работы по стабилизации строительных конструкций коренным образом изменили представление о возможности радиационной аварии, связанной с их обрушением (они будут рассмотрены в последующих частях этой работы), остановимся только на основных полученных выводах.

«Падение всей массы кровельных конструкций объекта «Укрытие» приводит к колебаниям поверхности «развала» с максимальным значением ускорения примерно 75 м/с². Однако, условие преодоления частицами ламинарного пограничного слоя существенно ограничивает пылеподъем по механизму «подскока» частиц.

Преодолеть пограничный слой способны лишь частицы с аэродинамическими диаметрами свыше 300 мкм, которые практически сразу же выбывают из облака и осаждаются.

Таблица 7. Обобщенные результаты по определению плотности топливного загрязнения поверхности «развала» под кровлей объекта «Укрытие»

Год проведения исследований	Метод	Оценка плотности поверхностного загрязнения, сделанная по результатам работы (для горизонтальной проекции поверхности)
1986	Вертолетная аэрогамма — съемка с помощью коллимированного спектрометра [36] (см., также, Часть 1, раздел 1.5).	Плотность поверхностного топливного загрязнения $< 50 \text{ кг/м}^2$
1988	Вертолетная аэрогамма-съемка с помощью коллимированного спектрометра [37, 38] (см., также, Часть 1, раздел 1.5).	Оценка количества топливной пыли, находящейся на крышах барабанов-сепараторов и деаэрационной этажерки дала значение около 1000 кг. Соответствующая плотность поверхностного топливного загрязнения составляет около 0.3 кг/м^2
1989— 1990	Измерения МЭД в подкровельном пространстве с помощью вертикальных континуальных дозиметрических шнуров [39] (см., также, Часть 1, раздел 6.1).	В помещении бывшего центрального зала (помещение 914) в виде топливной пыли могут находиться 2—5 т топлива. Соответствующая плотность поверхностного топливного загрязнения составляет около 2.5 кг/м^2
1991	Измерения МЭД в подкровельном пространстве с помощью горизонтальных континуальных дозиметрических шнуров [40] (см., также, Часть 1, раздел 6.1).	Количество топливной пыли в координатах (41-44; Ж-Н) оценивается в 450 кг. Соответствующая плотность поверхностного топливного загрязнения составляет около 0.8 кг/м^2
1991	Сканирование поверхности схемы «Е» коллимированным детектором [41] (см., также, Часть 1, раздел 6.2).	Плотность поверхностного топливного загрязнения оценивается в $(0.02\text{--}0.7) \text{ кг/м}^2$
1997	Пересчет значений МЭД в экранированных местах «развала» по дозовым коэффициентам работы [42]	Плотность поверхностного топливного загрязнения $0.07\text{--}0.08 \text{ кг/м}^2$
Оцененное значение	0.9 кг/м^2	

Поэтому основным механизмом пылеподъема является «сдув» частиц с загрязненных поверхностей. При данном механизме грубодисперсная фракция частиц поднимается легче, чем мелкодисперсная и спектр размеров поднятых частиц отличается от спектра размеров частиц на поверхности.

Эффект «старения» загрязнения приводит к более прочной фиксации частиц на поверхности с течением времени. Если для «свежего» загрязнения процент сдува пыли воздушными потоками несколько десятков метров в секунду составляет около 60%, то для «старого» загрязнения в условиях «Укрытия» он не более 40%.

Основной пылеподъем при обрушении кровельных конструкций происходит при плоском падении щитов северного и южного покрытий на крыши бывших северного и южного барабан-сепараторов.

Пылеподъем при обрушении западного участка оценить трудно, однако из качественных соображений он не превышает пылеподъема при плоском падении кровельных конструкций.

Пылеподъем за счет вибрации поверхностей после удара и «сдув» частиц с центральных областей «развала» в расчетах не учитывался, как несущественный. Он компенсируется консервативным характером рассмотрения пылеподъема по первому механизму.

Реалистичные (с сохранением неизбежной степени консерватизма) оценки массы поднятой при падении кровельных конструкций пыли составляют:

- ***общая масса инертной пыли..... 3,5 тонны;***
- ***общая масса «топливной» пыли..... 8 кг(U);***
- ***масса ингаляционной фракции «топливной» пыли..... 3 кг(U)⁹.***

Результаты рассмотрения формирования и распространения пылевого облака показывают следующее.

Поднятые пылевые частицы вовлекаются в область разряжения за падающими кровельными конструкциями. Характерное значение скорости воздушных потоков в области разряжения составит около 10 м/с.

Данное значение скорости является достаточным, чтобы «перемешать» поднятые частицы в турбулентном следе, образуемом за падающими конструкциями.

Сохранившиеся стены «Укрытия», и массивные упавшие конструкции типа блока балок Б2, нагромождение «клюшек», щитов и труб будут препятствовать быстрому распространению облака и оно, по видимому, «термализуется», т.е. скорости воздушных потоков и пылевых частиц станут равными скоростям воздуха в стабильном состоянии объекта.

Пыль поднимется над зонами пылеобразования на высоту около 11 м. Начальный объем пылевого облака составляет примерно $5,5 \cdot 10^4 \text{ м}^3$.

Учитывая, что предполагаемая масса всей поднятой пыли составляет 3,5 тонны, массовая концентрация пыли в облаке составит $3,5 \cdot 10^6 / 5,5 \cdot 10^4 \approx 64 \text{ г/м}^3$.

Дальнейшая судьба облака будет определяться его гравитационным осаждением и выносом за пределы объекта за счет естественной вентиляции подкровельного пространства.

При ожидаемой концентрации пыли в облаке — 64 г/м^3 ожидается достаточно быстрое осаждение пыли. Минимальное значение постоянной осаждения пыли оценивается как $0,04 \text{ с}^{-1}$.

Вентиляция объекта «Укрытие» обусловлена перепадом давления внутри и снаружи здания. Перепад давления может быть вызван двумя компонентами — ветровым напором и разностью температур внутри и снаружи здания.

⁹Вопрос о массе топливной пыли, способной к воздушному подъему при обрушении, является дискуссионным. Оценки свойств пыли сделаны на основании ограниченного числа проб и исследованных поверхностей, для расчетов привлекается существенно упрощенная механическая модель. Поэтому утверждение о том, что общая масса ингаляционной фракции топливных частиц, вовлеченных в облако, составит 3 кг, по оценкам экспертов имеет порядковую точность.

Постоянная интенсивности воздухообмена в «открытом» после обрушения «развале» составит по оценкам $\lambda \approx 0,19 \text{ с}^{-1}$. Из «открытого» подкровельного пространства за счет естественной вентиляции будут выноситься около $10\,000 \text{ м}^3$ воздуха в секунду, скорость восходящих воздушных потоков на уровне верхних отметок сохранившихся конструкций составит примерно 2 м/с .

Сразу после формирования пылевого облака в подкровельном пространстве расход пыли будет определяться осаждением (на разрушенные конструкции) и выносом за пределы здания «Укрытия» за счет естественной вентиляции.

Примерно 20% пыли осядет в пределах объекта, а характерное время выхода пыли за пределы подкровельного пространства составит около 4 с.

Исходя из зависимостей температуры внутри и снаружи «Укрытия», в период декабрь—февраль (3 месяца в году) температура на поверхности «развалов» отрицательна, и пылевой вынос при обрушении минимален вследствие «примерзания» пыли к поверхности.

В период март—июль (5 месяцев в году) за счет тепловой инерции объекта температура подкровельного пространства равна или меньше температуры окружающего воздуха, и вентилируемость подкровельного пространства минимальна (не исключено, что будет происходить, наоборот, «всасывание» воздуха в объект).

Таким образом, наиболее «опасными» месяцами с точки зрения пылевого выноса при обрушении являются август—октябрь.

Данный период составляет всего 3 месяца из 12, что следует учесть при определении вероятностей постулируемых исходных событий, ведущих к разрушениям объекта.

Поднятое облако имеет значительное пылесодержание и будет существенно тяжелее воздуха.

Подъем облака будет замедляться со временем, за счет начальной скорости всплывания облако поднимется на максимальную высоту около 100 м за время около 20 с .

Расчет распределения концентрации примеси в приземном слое воздуха проводился по рекомендациям ОНД-86 (см. [35]).

Данная методика позволяет рассчитывать максимальные концентрации (для всех погодных условий при данном источнике) и в ней проводится наиболее корректный учет эффектов образования ветровых теней, что существенно для «Укрытия», являющегося «низким» источником.

Распределение поля концентраций аэрозоля при аварийном выбросе из объекта приведено на рис. 33.

Распределение приведено в относительных единицах. Условная концентрация «1» соответствует ингаляции $4,4 \cdot 10^{-7} \text{ г}$ «топливной» пыли за достаточно длительное пребывание в зоне выброса без средств индивидуальной защиты органов дыхания.

Максимальная плотность выпадений топливной пыли после прохождения облака составит приблизительно $8,4 \cdot 10^{-5} \text{ г/м}^2$.

Динамические параметры распространения и осаждения облака определялись в рамках камерной модели.

Пылевое облако будет частично оседать обратно на поверхности «развала», а частично, за счет естественной вентиляции, выноситься за пределы объекта в область аэродинамической тени с постоянной времени $0,19 \text{ с}^{-1}$.

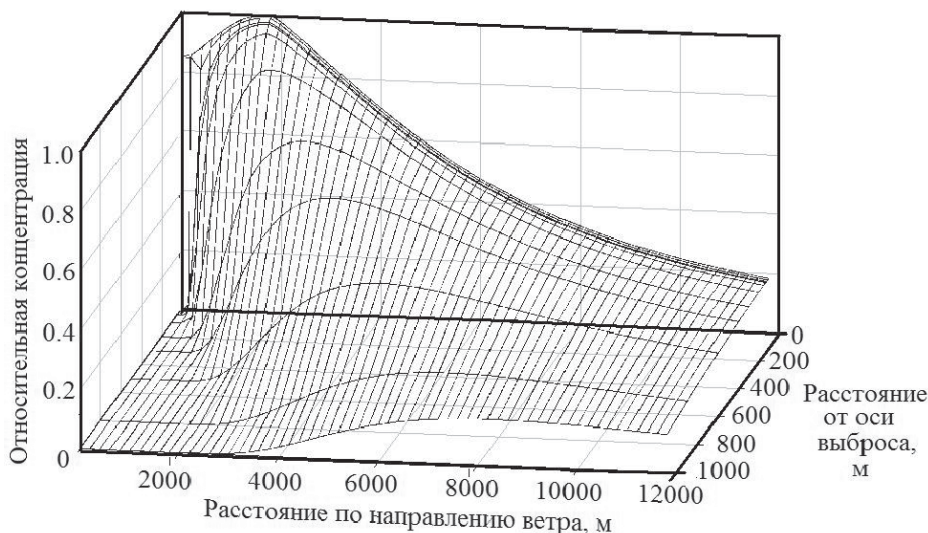


Рис. 33. Распределение аэрозоля в приземном слое воздуха при обрушении кровельных конструкций объекта «Укрытие»

Из области тени примесь попадает в окружающее пространство за счет турбулентности воздушных потоков с постоянной времени $0,04 \text{ с}^{-1}$.

Зависимость концентрации примеси от времени для области аэродинамической тени приведена на рис. 34.

Время существования повышенных концентраций примеси в области тени составляет 10–20 секунд.

Ожидаемое поступление наиболее радиологически опасных нуклидов (при максимальном значении массы ингалированного топлива $4,4 \times 10^{-7} \text{ г}$) приведено в таблице 8.

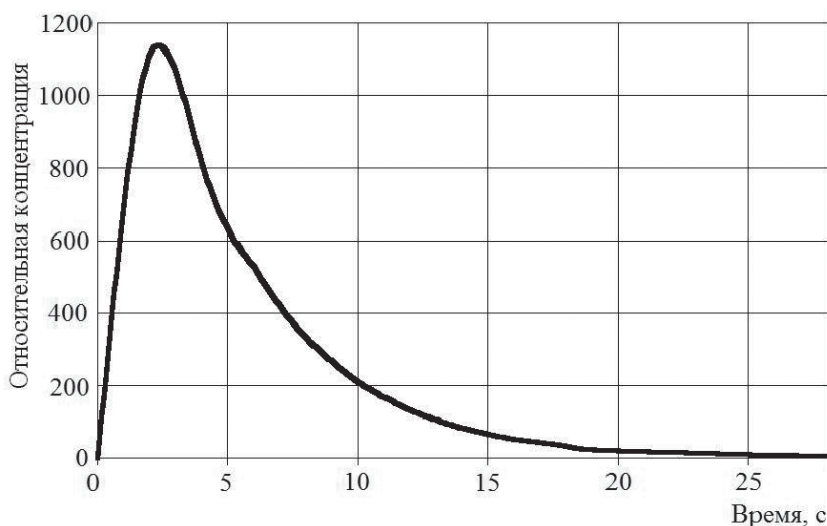


Рис. 34. Зависимость концентрации примеси от времени для области аэродинамической тени

Таблица 8. Ожидаемое поступление наиболее радиологически опасных нуклидов ингаляционным путем на промплощадке «Укрытия» при обрушении кровельных конструкций (на начало 2000 г.)

Нуклид	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴¹ Am
Поступление, Бк	570	380	3,1	2,2	3,6	220	7
Предел годового поступления, Бк*	2,2·10 ⁵	2,0·10 ⁴	22	20	20	1,1·10 ³	24

*Нормы радиационной безопасности НРБ-99.

Максимальное поступление радионуклидов на много ниже предела годового поступления.

Автор работы [34] полагает, что «с учетом методической точности расчетных подходов можно утверждать, что выброс топливной пыли респираторных размеров приведет к эффективной дозе для персонала менее 20 мЗв».

Долговременные последствия обрушения оказываются более опасными.

В «Анализе...» [1] отмечается, что постоянный вторичный пылеподъем с образовавшегося радиоактивного следа и открытой поверхности «развала» объекта «Укрытие» может привести к возрастанию концентрации трансурановых элементов в приземном слое воздуха до нескольких допустимых концентраций, что потребует специальных мер по фиксации пыли и применения средств индивидуальной защиты органов дыхания (см. таблицу 9).

Таблица 9. Ожидаемые концентрации трансурановых элементов около объекта «Укрытие» за счет однократного вторичного подъема топливной пыли с открытой поверхности «развала» [1]

Радионуклид	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴¹ Am
Воздушная концентрация, Бк/м ³	0,006	0,005	0,008	0,46	0,015
В ед. допустимой объемной концентрации радионуклида в воздухе рабочей зоны	0,2	0,17	0,27	0,46	0,5

Как уже говорилось, подготовка мероприятий по стабилизации строительных конструкций, которая проводилась в рамках программы SIP, потребовала проведения нового анализа прочности строительных конструкций объекта «Укрытие» и уточненных расчетов вероятности и последствий возможных радиационных аварий.

Выполненные МНТЦ и НИИСК расчеты [43] (см. таблицу 10) также опирались на информацию о свойствах пылевого загрязнения, полученную КЭ и модели, использованные в описанных выше работах.

12.3.5. Сколько всего топливной пыли в объекте «Укрытие»

В предыдущем разделе говорилось, что с учетом площади горизонтальной проекции поверхности всего развала, способной к генерации пыли ~5500 м² [31], интегральный запас топливной пыли на этой поверхности составит около 5 тонн (по урану).

Таблица 10. Оценки вероятности разрушения конструкций «Укрытия», выполненные перед проведением мероприятий по стабилизации

Зоны и конструкции, для которых необходима стабилизация	Вероятность разрушения, 1/год	Вид нагрузки, определяющей необходимость стабилизации
Западная зона Стена по оси 50 с прилегающим каркасом	$1,3 \times 10^{-1}$	Сейсмика ¹⁰
Западная контрфорсная стена	1×10^{-4}	
Южная зона Деаэрационная этажерка	$1,3 \times 10^{-1}$	Сейсмика
Северная зона Северная контрфорсная стена	$1,4 \times 10^{-2}$	Экстремальный ветер
Западная опора балки «Мамонт»	$1,3 \times 10^{-1}$	Сейсмика
Восточная опора балки «Мамонт»	$1,3 \times 10^{-1}$	Сейсмика

Остается открытым вопрос — сколько топливной пыли находится в глубине развала. Скорее всего эта пыль не может войти в состав пылевого облака при обрушении верхних конструкций, но она выбрасывалась на верхние отметки 4-го блока во время активной стадии аварии и оказалась перемешанной с выброшенными во время взрыва и сброшенными с вертолетов материалами. Можно только предположить, что масса топливной пыли в глубине развала существенно больше, чем на его поверхности.

При обсуждении этого вопроса экспертами КИ в 2001 г. назывались значения (10÷15) т.

Несколько раз делались попытки оценить количество пыли в помещениях объекта «Укрытие», находящихся вне развала реактора (см., например, [44, 45]).

Последняя (на конец 2011 г.) такая оценка была проведена в работе [46].

В ней рассматриваются 46 помещений объекта на отметках от +49.000 до +9.700, в которых присутствует наиболее значительное количество пыли. Принимается, что плотность поверхностного топливного загрязнения для них такая же, как для площади плоской проекции поверхности «развала» — (0,7÷0,9) кг/м² по урану

Суммарная площадь пола рассматриваемых помещений около 3880 м².

Тогда максимальное количество топливной пыли в них составит 2,7–3,5 т.

В работе также отмечается, что эти помещения (за исключением пом. 505/4) не находятся в зоне непосредственного воздействия системы пылеподавления. Поэтому вся масса этой пыли может быть потенциально способна к вторичному пылеподъему.

Далее в [46] утверждается, что:

«Представленные выше результаты, дают основание заключить, что значение 30 т для максимального количества топливной пыли, заявленное в работе [1], является неоправданно завышенным. Анализ имеющейся информации позволяет дать только порядковую оценку — в границах «Укрытия» находится около 10т топливной пыли (по урану)».

¹⁰Сейсмика 6 баллов и нагрузки для кратковременной стабилизации.

Действительно, 5 т на поверхности развала, ~3 т в наиболее загрязненных помещениях и ~2 т во всех остальных (а их сотни) помещениях.

Но при этом не учитывается количество топливной пыли, находящейся в глубине развала и в скоплениях ЛТСМ.

Поэтому, достаточно консервативное значение — около 30 тонн (по урану) [1] для оценки общей массы топлива, находящейся в виде пыли в объекте «Укрытие», представляется разумным (см. раздел 8.3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отв. исполнитель Боровой А.А., Отчет МНТЦ «Укрытие», № 3836, 2001 г. Чернобыль.
 2. Боровой А.А., Евстратенко А.С., Криницын А.П. и др. Динамика радиационной обстановки на объекте «Укрытие». В сборнике «Объект «Укрытие»-10лет», основные результаты научных исследований, Национальная Академия Наук Украины, Чернобыль 1996 г., стр. 100–111.
 3. Боровой А.А., Богатов С.А., Пазухин Э.М. Современное состояние объекта «Укрытие» и его влияние на окружающую среду. Радиохимия, 1999 г., т. 41, № 4, с. 368–378.
 4. Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К. и др. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2007 г. В сборнике «Проблемы безопасности атомных электростанций i Чернобиля», Вип. 9, 2008, с. 48–53.
 5. Отчеты по состоянию безопасности объекта «Укрытие». ГСП ЧАЭС, 1994–2006 гг.
 6. Контроль неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие». Заключительный отчет ИПБ АЭС по договору № 249/07, Чернобыль, 65 с.
 7. 20 лет Чернобыльской катастрофы, взгляд в будущее. Национальный доклад Украины. Киев, Аттика, 2006, 233 с.
 8. Огородников Б.И., Пазухин Э.М., Ключников А.А. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие». 1986–2006 гг., Чернобыль 2008, НАН Украины, ИПБ АЭС, 455 с.
 9. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П., Ключников А.А. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС Москва, Наука, 2010, 240 с.
 10. Боровой А.А., Краснов В.А., Павлюченко Н.И. и др. Контроль неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие». «Проблемы Чернобиля», вып. 12, 2003, с. 126–141.
 11. Богатов С.А., Евстратенко А.С., Симановская И.Я. Повышение радиационной безопасности объекта «Укрытие» путем расширения системы пылеподавления. Препринт МНТЦ «Укрытие», 2001 г.
 12. Gmal B., Moser E.F., Pretzsch G., Quade U. Supporting Investigations and Analyses for the Technical Safety Evaluation of further Protection Means at the Destroyed Chernobyl Reactor, Unit 4, Project SR 2075/8-1 Task 1 «Analysis and Evaluation of the Technical Basis of the Nuclear Safety of the Object Shelter».
- Criticality Behavior of the Fuel-Containing Masses inside the Object Shelter of the Chernobyl NPP, Unit 4. Report of Gesellschaft fur Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. April 1997 Contract-No: 85 982, p. 44.

13. Бродкин Э.Б. Проведение расчетов и корректировка расчетных критпараметров для различных типов ТСМ, находящихся в помещениях «Укрытия». Отчет по 3 этапу х/д 115, пункт 2.1.7. технического задания ИНИН УО ВЛ, Москва 1993, 8 с.
14. Боровой А.А. Оценка состояния ядерной безопасности объекта «Укрытие» и последствия гипотетического ядерного инцидента на объекте «Укрытие», Препринт ИАЭ-6283/3, Москва 2003, 36 с.
15. Рабочий проект МСПП (SIP 05-4-008-279-016-ПЗ, SIP UKN 01 10GEN 02 043, SIP UNK 03 10 RSR 03 000).
16. Техническое решение о вводе в опытно-промышленную эксплуатацию МСПП. № 11 от 11.04.2004 г.
17. ГОСТ Р 51037-97 (бывш. ГОСТ 27496-87). Покрытия полимерные защитные изолирующие, локализирующие, локализирующие пылеподавляющие и дезактивирующие. Общие технические требования.
18. ГОСТ 26078-84. Покрытия полимерные защитные для улучшения радиационной обстановки. Оценка качества.
19. ОСТ 95 10562-2001. Покрытия полимерные защитные для атомных станций. Ч. 1. Снимаемые защитные полимерные покрытия, Общие требования, применение, выбор.
20. Отчет НИКИМТ по теме «Работа отделения НИКИМТ в составе КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова». ОНИ-1011-19, 1989.
21. Зимон А.Д., Пикалов В.К. Дезактивация. М. Издат, 1994, 336 с.
22. Чернобыль. Пять трудных лет: Сборник материалов. Москва, Издат, 1992, 381 с.
23. Егоров Б.Н., Симановская И.Я. Применение полимерных покрытий для улучшения радиационной обстановки при эксплуатации объекта «Укрытие». Доклады Всесоюзной научно-практической конференции «Радиоэкологические, медицинские и социально-экономические последствия аварии на ЧАЭС. Реабилитация территорий и населения», М., 1995.
24. TN00/106. Задание 10 Обращение с пылью. Технология обращения с пылью и рекомендации по пылеподавлению.
25. Отчет по тестированию пылеподавляющих составов. Контракт SIP 05-4-008. Документ SIP UN10410 DTR 00 000 от 22.01.2004, г. Киев, 2004, 66 с.
26. ТУ У 24-6-25661375-001-2004 (ТУ 95-2850-2004). Составы пылеподавляющие полимерные защитные.
27. Краснов В.А. , Павлюченко Н.И. , Щербин В.Н. Определение характеристик образцов защитного пленочного покрытия подкровельного пространства объекта «Укрытие». Проблемы безопасности атомных электростанций и чернобыля, вып. 13, 2010, с. 136–141.
28. Концептуальный Проект (ТЭО) Нового Безопасного Конфайнмента. Проектные критерии и требования к НБК. SIP-P-TM-21-330-DC-101-01. ГСП ЧАЭС. 2003 г. 144с.
29. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отчет МНТЦ «Укрытие», № 3601, Чернобыль, 1996 г., 272 с.
30. The Shelter current safety analysis and situation development forecasts (update version). A. Borovoi et. all, Tasis, European Commission, 1998, 103 p.

31. Получение экспериментальных данных для определения современного состояния пылевого загрязнения и проведение количественных оценок последствий радиационной аварии на объекте «Укрытие». Отчет по второму этапу договора 78/96. Ответственный исполнитель С.А. Богатов. ТО ОУ № 1432, Чернобыль, 1997.
32. Богатов С.А. Оценка запасов и определение свойств пылевого загрязнения в подкровельном пространстве объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие» 00-2, Чернобыль, 2000, 16 с.
33. Богатов С.А. Оценка количества пыли, способного ко вторичному подъему при обрушении кровельных конструкций объекта «Укрытие». Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова 6210/1, Москва, 2000, 25 с.
34. Богатов С.А. Оценка радиологических последствий аварии, связанной с обрушением кровельных конструкций объекта «Укрытие». Препринт ИБРАЭ РАН 2001-06, Москва, 2001, 29 с.
35. Богатов С.А. Применение рекомендаций ОНД-86 для расчетов воздушного пространства примеси за пределы объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие» 00-3, Чернобыль, 2000, 19 с.
36. Римский-Корсаков А.А. и др. Исследование выброса аварийного реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС. Отчет РИ им. В.Г. Хлопина № 14396. Ленинград, 1986. 23 с.
37. Борисов Г.И., Яшин А.М. Измерение интенсивности моноэнергетического гамма-излучения объекта «Укрытие» в вертикальном направлении с использованием полевой полупроводниковой спектрометрии. ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования (теория и эксперимент), 1991, Вып. 5(13), С. 134.
38. Борисов Г.И., Бутурлин В.И., Кулаков В.М. и др. Методы полевой полупроводниковой спектрометрии при анализе аварийных ситуаций на объектах с источниками ионизирующих излучений. Препринт Института атомной энергии им. И.В. Курчатова 5512/2 Москва, 1992, 28 с.
39. Usatyj A.F. Generalized results of determination of distributions of major gamma radiation sources in the central hall of the Sarcophagus, recorded by dosimetric cords using EPR sensors In: «Sarcophagus Safety'94». The State of Chernobyl Nuclear Power Plant Unit 4. Proceedings of an International Symposium. Zeleney Mys, Ukraine, 14–18 March 1994. – p. 185–195.
40. Расчетно-аналитические оценки по общему распределению топливных масс в «Укрытии» и предложения по дальнейшему проведению работ по долговременному захоронению топлива. Часть I. Проведение расчетно-аналитических оценок расположения ТСМ на верхних отметках разрушенного блока. Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова № 50.05/69, Москва, 1991.
41. Душин В.И., Петров В.Ф., Плескачевский Л.А. и др. Локализация источников интенсивного гамма-излучения и оценка количества топлива в центральном зале 4-го блока ЧАЭС. Отчет НПО РИ им. В.Г. Хлопина, КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова, НПО ЧАЭС. Чернобыль, 1992 г., 58 с.
42. Радиационно-физические характеристики топлива 4-го энергоблока ЧАЭС и оценка их погрешностей. Отчет НИО КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова № 11.07-06, Чернобыль, 1989, 12 с.
43. Рабочий проект по стабилизационным мероприятиям. Общая пояснительная записка SIP K 02 01 000 EXN 001 03. ПОМ на ОУ. WBS A02 90510, Ред. 03. CFC. 2003 г.

44. Техническое обоснование радиационной безопасности объекта «Укрытие» (ТОРБ). Отчет КЭ при ИАЭ им. И.В.Курчатова, N11.07/311 от 18.12.91 г., 270 с.
45. Подготовка и экспертная оценка исходных материалов для новой редакции ТОРБ объекта «Укрытие». МГП «Экспертиза», Отчет 09/39 от 22.12.92, 163 стр., Москва.
46. Исследование влияния изменений свойств топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» на его ядерную, радиационную и радиоэкологическую безопасность. Анализ процессов образования и поведения лавообразных топливосодержащих материалов при аварии на ЧАЭС. Заключительный отчет ИПБ АЭС Том 1 № 4003, 2011, С. 125.

13. РАДИОАКТИВНЫЕ АЭРОЗОЛИ НА ПЛОЩАДКЕ ОБЪЕКТА

13.1. Влияние РАУ на загрязнение воздуха на площадке «Укрытия»

В Главе 10 рассказывалось о том, что мониторинг аэрозольной активности на площадке ЧАЭС проводился с первых дней после аварии. Его главная цель состояла в обеспечении безопасности работавших людей. Кроме того, он позволял следить за выбросами активности из разрушенного блока, а во время строительства и после создания «Укрытия» — за выбросами из этого объекта.

По мере выполнения мер по дезактивации территории и зданий, распада короткоживущих радионуклидов, возведения стен и кровли «Укрытия» радиационная обстановка в локальной зоне кардинально улучшилась (см., например, раздел 1.2).

Если при начале строительства «Укрытия» объемные активности аэрозолей около аварийного энергоблока были весьма высокими (см. рис. 1), то в октябре–ноябре их объемная активность снизилась более чем на порядок [1].

К началу работ КЭ (1988 г.) перед ее специалистами встала задача продолжить мониторинг аэрозольной активности в локальной зоне «Укрытия».

К 1990 г. окончательно сложилась система контроля загрязнения воздуха, которая затем выполняла свои функции более 20 лет [2].

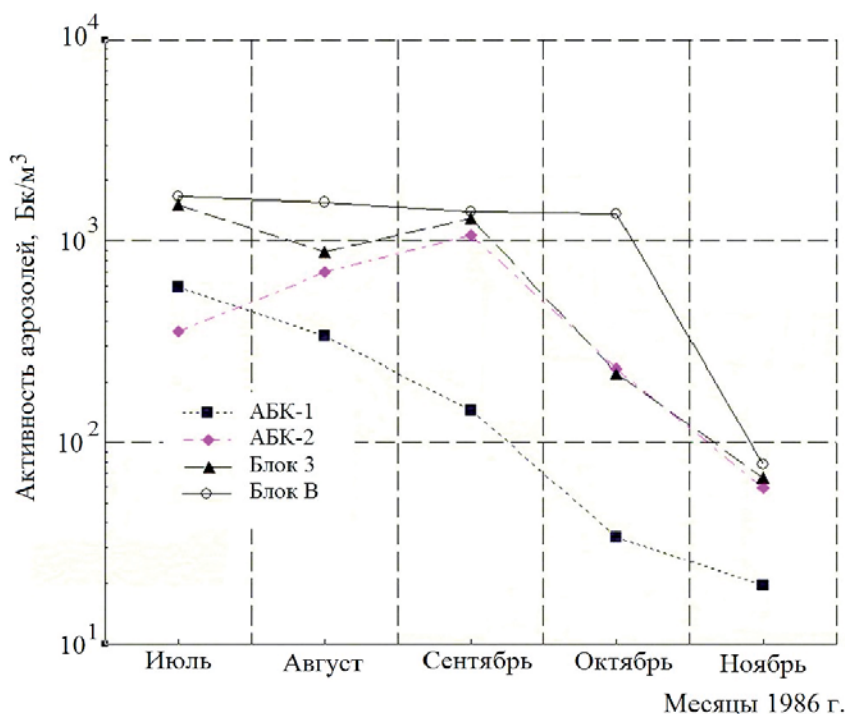


Рис. 1. Среднемесячные концентрации гамма — излучающих аэрозолей. Пробы отобраны в июле–ноябре 1986 г. около АБК-1, АБК-2, блока «В» на отм. +12,5 м и в транспортном коридоре 3-го блока ЧАЭС

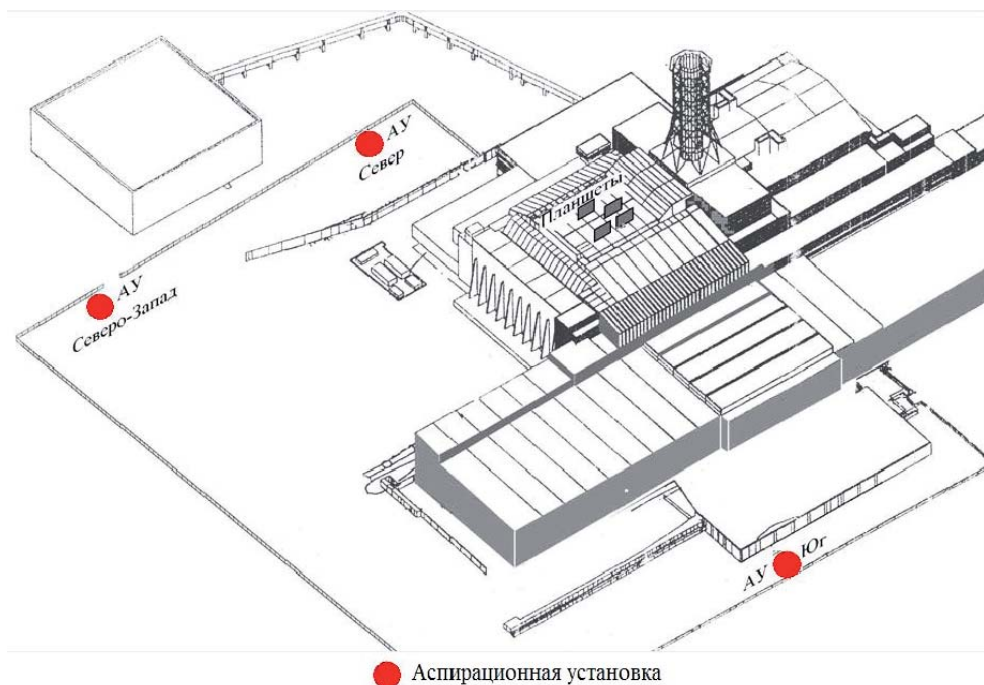


Рис. 2. Система контроля загрязнения воздуха на площадке объекта, созданная КЭ

Систематические исследования проводились сначала персоналом Комплексной экспедиции при ИАЭ им. И.В. Курчатова, а начиная с 1992 г. – сотрудниками ОЯРБ и ЧАЭС (см. [1–4]). Позднее к ним подключились и другие организации¹.

Для этого по периметру локальной зоны «Укрытия» (на расстоянии 60–100 м от него) были установлены калиброванные аспирационные (фильтровальные) установки² (см. рис. 2).

В качестве материала фильтров использовался фильтрующий материал ФПП-15-1,5 площадью около 0,8 м². Время экспозиции фильтров составляло 10–17 суток, при этом каждая установка в зависимости от времени экспозиции прокачивала через фильтры 120–250 тыс. м³ воздуха.

Материал размещали на сетчатом барабане, располагающемся на высоте 1 м от земли и защищенном козырьком от прямого попадания дождя и снега (см. рис. 3).

После окончания экспозиции фильтры упаковывались в герметические пластиковые мешки и транспортировались в лабораторию в г. Чернобыле.

Лабораторные исследования осажденных на фильтрах аэрозолей включали гамма – спектрометрические измерения, при этом количественно определялись активности $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{155}Eu , Pu и ^{241}Am ³.

¹В настоящем разделе будут рассмотрены, в основном, результаты, полученные КЭ-ОЯРБ.

²Первоначально в локальной зоне «Укрытия» по периметру забора были установлены 4 аспирационные установки. С 1996 г. их осталось 3 (см. рис. 2).

³Активность (А) α -излучающих радионуклидов можно определить с помощью расчетных коэффициентов корреляции.



Рис. 3. Одна из аспирационных установок в локальной зоне «Укрытия»

Как связаны между собой концентрации РАУ в локальной зоне «Укрытия» ($C_{лз.}$) и в помещениях объекта (C_y)?

Какая часть радиоактивных аэрозолей в воздухе локальной зоны определяется текущим выбросом из «Укрытия»?

Ответы на эти вопросы можно дать лишь на качественном уровне.

Дело в том, что загрязнение воздуха в местах расположения аспирационных установок определяется целым рядом природных и техногенных факторов:

- интенсивностью выноса радиоактивных аэрозолей из «Укрытия»;
- метеоусловиями (направление и скорость ветра⁴, интенсивность и периодичность выпадения атмосферных осадков, температура и т.);
- характером и интенсивностью выполняемых в локальной зоне работ⁵;

Так, в периоды выпадения атмосферных осадков даже при высокой интенсивности выноса уровень загрязнения воздуха остается относительно низким.

И, наоборот, в сухую и ветреную погоду при низкой интенсивности выноса уровень загрязнения воздуха в локальной зоне часто оказывался высоким в результате вторичного пылеподъема с поверхности промплощадки.

Вместе с тем, опыт многолетних наблюдений показывает, что существует сильная корреляция между СЛЗ. и СУ.

Приведем два примера.

1. 4 января 1993 года в 8:25 на отметке +31.50 в помещении 805/3 (южное помещение воздуховодов вытяжной вентиляции) объекта «Укрытие» (рис. 4) от электролампы загорелась кладка, состоящая из деревянных шпал и изоляция кабеля.

⁴По данным многолетних наблюдений преобладающее направление ветра на площадке ЧАЭС:

- северо-западное (в теплый период года);
- юго-восточное и юго-западное (в холодный период года).

Среднегодовая скорость ветра — 4.2 м/с.

⁵Как показывает опыт, этот фактор часто являлся определяющим. Так «одна из наиболее высоких за первый 10-летний период наблюдений концентраций ^{137}Cs (60 мБк/м³), наблюдалась в районе южной установки. Произошло это в период с 24 марта по 3 апреля 1998 г. Оказалось, что в это время здесь демонтировали и дезактивировали подъемный кран «Демаг», с помощью которого в 1986 г. вели сооружение «Саркофага» [1].

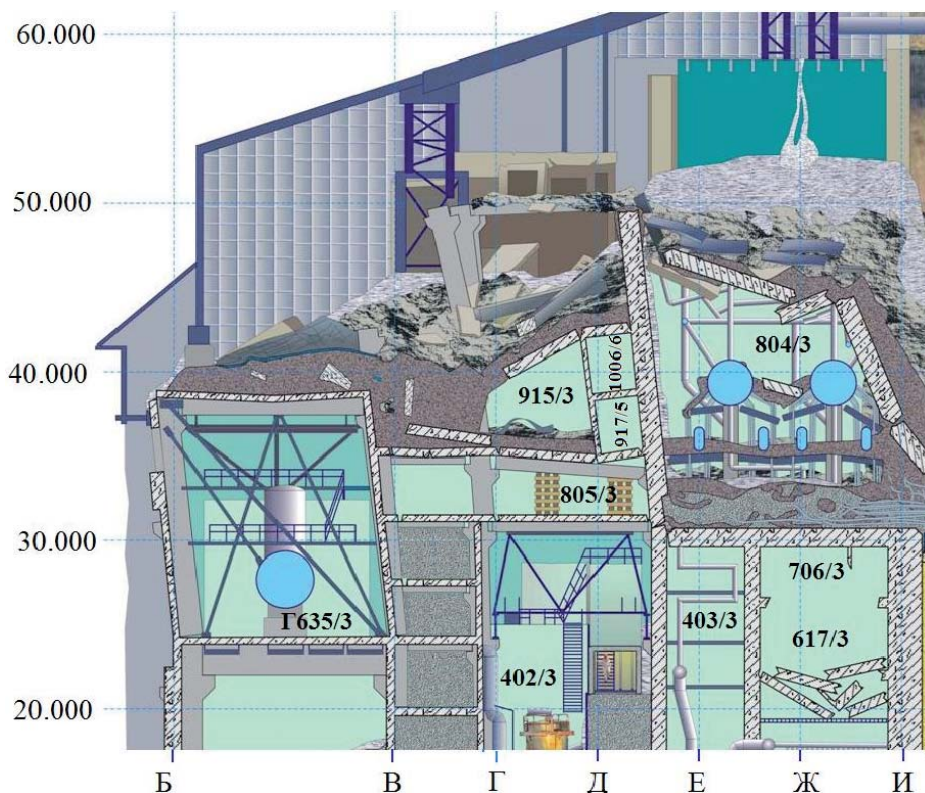


Рис. 4. Фрагмент разреза объекта «Укрытие» по оси 46. На нем показаны шпальные кладки в пом. 805/3

Горевшие материалы были сильно загрязнены радиоактивностью [3].

По оценкам, пожар продолжался ~6 часов, он был замечен не сразу, но быстро ликвидирован.

Результаты контроля загрязненности воздуха изотопами плутония и амерция (наиболее токсичные α -аэрозоли), полученные с помощью аспирационных установок в воздухе промплощадки «Укрытия», показали следующее:

- с южной стороны объекта увеличения концентрации радионуклидов в воздухе во время пожара, зафиксировано не было;
- с северной стороны наблюдалось незначительное увеличение $C_{лз.}$;
- с северо-западной стороны зафиксировано существенное увеличение $C_{лз.}$ (рис. 5).

Такой разброс результатов объясняется направлением ветра в момент пожара.

Приведенные данные показывают, что даже относительно небольшое возгорание в объекте, сопровождающееся увеличением аэрозольной активности, было зарегистрировано в локальной зоне.

2. Во время цикла экспозиции фильтров, продолжавшегося с 17 декабря 2003 г. по 12 января 2004 г., в локальной зоне было зафиксировано значительное возрастание СЛЗ.

Причиной этого стали пробные испытания модернизированной системы пылеподавления (24–25 декабря 2003 г.), установленной под кровлей «Укрытия».

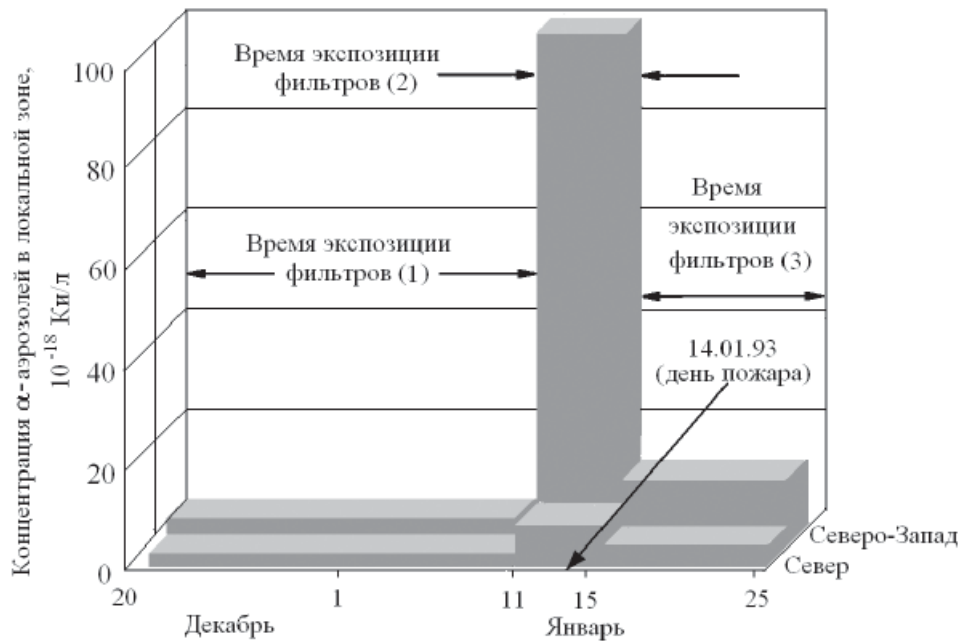


Рис. 5. Концентрация альфа – активных аэрозолей в локальной зоне. Время экспозиции фильтров: до (1), во время (2) и после (3) пожара внутри «Укрытия»

Из-за недостаточно отработанной методики эти испытания вызвали значительный подъем пыли на верхних отметках объекта и сопровождались увеличением выброса РАУ через щели и венттрубу, что было зафиксировано соответствующими наблюдениями.

Результаты измерений активности цезия в воздухе локальной зоны в период работы модернизированной системы представлены на рис. 6.

Для сравнения здесь же приведены данные по предыдущему и последующему периодам наблюдений. Из рисунка видно, что в период испытаний объемная активность изотопа ^{137}Cs в северо-западной части локальной зоны возросла в 2 раза, в северной в 5 раз, а в южной почти в 8 раз.

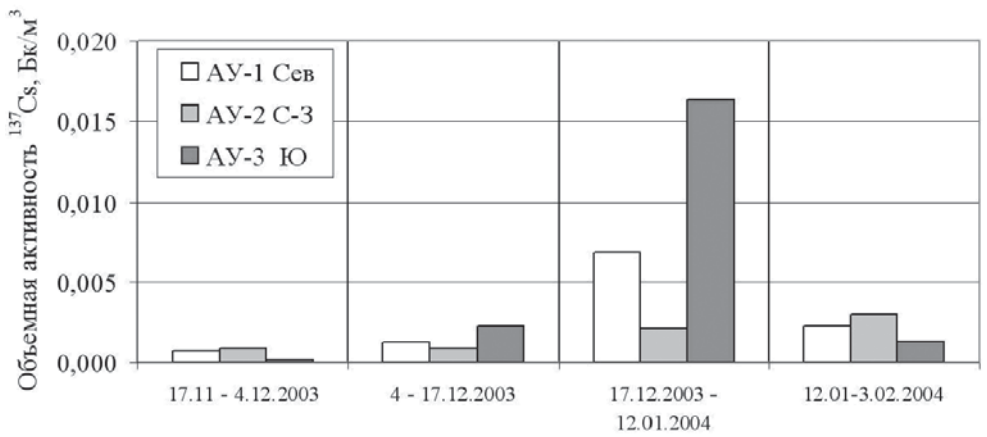


Рис. 6. Объемная активность изотопа ^{137}Cs в локальной зоне объекта «Укрытие»

Приведенные примеры говорят и о том, что любое значительное разрушение ТСМ, сопровождающееся образованием и подъемом радиоактивной пыли в помещениях «Укрытия», было бы зафиксировано на площадке объекта.

13.2. Некоторые результаты многолетнего мониторинга активности воздуха в локальной зоне «Укрытия»

Что показывают результаты многолетних наблюдений за величиной СЛЗ? В первые годы после аварии она быстро уменьшалась.

Так, за 11 месяцев 1989 года средняя активность альфа излучающих аэрозолей составила $6,3 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³, в 1990 году она понизилась $\sim$ в шесть раз, а в 1991 году составила $2,9 \cdot 10^{-4}$ Бк/м³.

Значительное уменьшение СЛЗ связано с вводом в строй первоначальной установки по пылеподавлению, смонтированной над центральным залом (см. Гл. 11, рис. 13).

В следующем десятилетии — 1995–2005 гг., в целом, наблюдалось падение активности воздуха (рис. 7) [5].

Некоторый «всплеск» объемной активности произошел в 1998–2000 гг.

В «Анализе...» [2] по этому поводу говорится:

«В целом хорошо заметно, что воздух рядом с объектом с течением времени очищается от радиоактивности и только в последние годы, в связи с активизацией работ на объекте и в локальной зоне, наблюдается небольшой ее рост».

В последние годы объемная активность РАУ на площадке объекта по двум направлениям (север, северо-запад) практически стабилизировалась. И только на южном направлении в 2008 г. произошло заметное ~ 2.5 раза ее возрастание, связанное, по-видимому, с работами на площадке «Укрытия». Это иллюстрирует рис. 8.

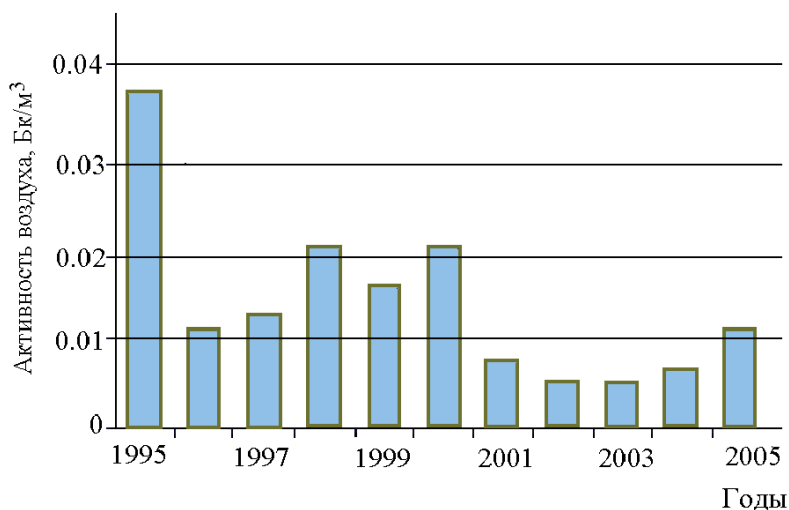


Рис. 7. Средняя активность воздуха в локальной зоне «Укрытия» в 1995–2005 гг.

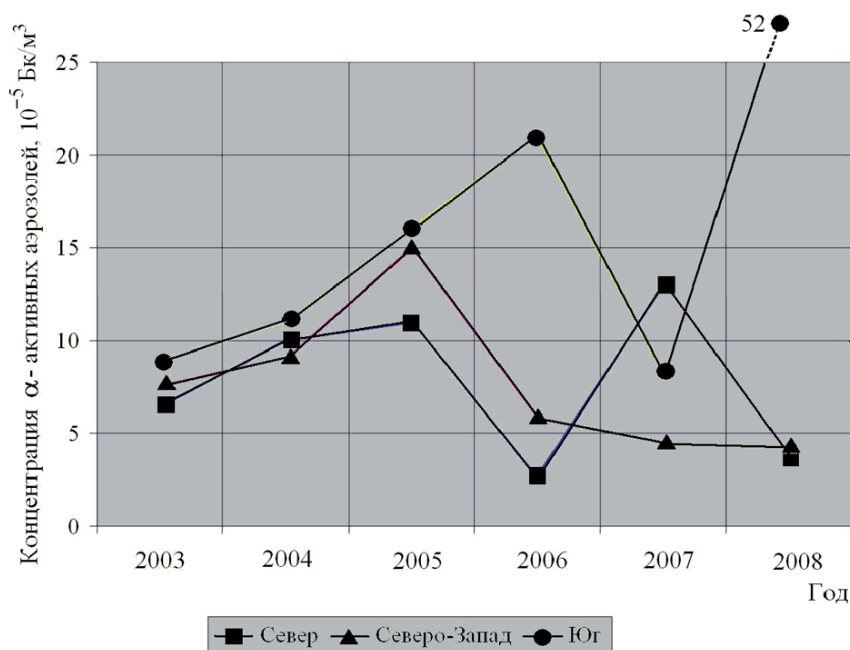


Рис. 8. Концентрация α-излучающих РАУ в локальной зоне объекта «Укрытие» (данные измерения трех аспирационных установок)

Наибольшие концентрации радиоактивных аэрозолей в приземном слое воздуха наблюдались на расстоянии 40–50 м от стен объекта в зоне аэродинамической тени.

Следует отметить, что распределение аэрозолей по АД хотя и менялось в различные годы (в основном, из-за характера работ, производимых в локальной зоне, см., например, рис. 9 [6].), но на значительном промежутке времени эти изменения не носили системного характера.

Они не давали *никаких указаний на быстрое разрушение ЛТСМ, предсказываемое, например, в работах [7–9].*

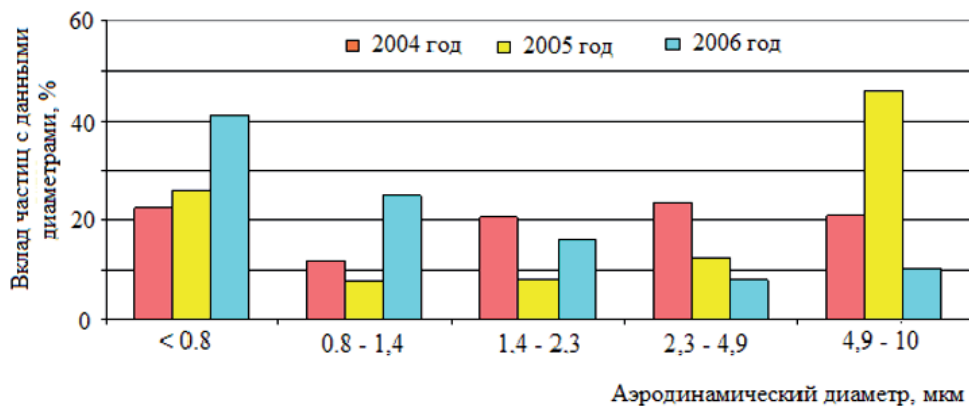


Рис. 9. Распределение активности ^{137}Cs по АД аэрозолей на промплощадке «Укрытия» в 2004–2006 гг. В эти годы проводились масштабные мероприятия по стабилизации строительных конструкций объекта

ЛИТЕРАТУРА

1. Огородников Б.И., Пазухин Э.М., Ключников А.А. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» 1986–2006 гг., НАНУ ИПБ АЭС, Чернобыль, 2008, 455 с.
2. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отчет МНТЦ «Укрытие». Отв. Исполнитель Боровой А.А. Инв. № 216 от 06.09.96 г., Чернобыль, 188 стр.
3. Боровой А.А., Евстратенко А.С., Криницын А.П. и др. Динамика радиационной обстановки на объекте «Укрытие». В сборнике «Объект «Укрытие» — 10 лет», основные результаты научных исследований», Национальная Академия Наук Украины, Чернобыль 1996 г., стр. 100–111.
4. Боровой А.А., Богатов С.А., Пазухин Э.М. Современное состояние объекта «Укрытие» и его влияние на окружающую среду. Радиохимия, 1999 г., т. 41, № 4, с. 368–378.
5. Двадцать лет чернобыльской катастрофы: взгляд в будущее. Национальный доклад Украины. Министерство Украины по вопросам чрезвычайных ситуаций и по делам защиты населения от последствий Чернобыльской катастрофы, Всеукраинский научно-исследовательский институт гражданской защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера. Киев, Аттика, 2006, 233 стр.
6. Отчет о состоянии безопасности объекта «Укрытие». Том 1. SIP-P-PM-22-460-SAR-124-03, 2008, 425 с.
7. Барьяхтар В.Г., Гончар В.В., Жидков А.В., Ключников А.А. Радиационные повреждения в лавообразных топливосодержащих материалах объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие» № 98-12, 1998, 23 с.
8. Жидков А.В. Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния. В сборнике «Проблемы Чернобыля», 2001, вып. 7, с. 23–40.
9. Baryakhtar V., Gonchar V., Zhidkov A., Zhidkov V. Radiation damages and self – sputtering of high radioactive dielectrics: spontaneous emission of submicron dust particles. Condensed Matter Physics, 2002, V. 5, № 3(31), p. 449–471.

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

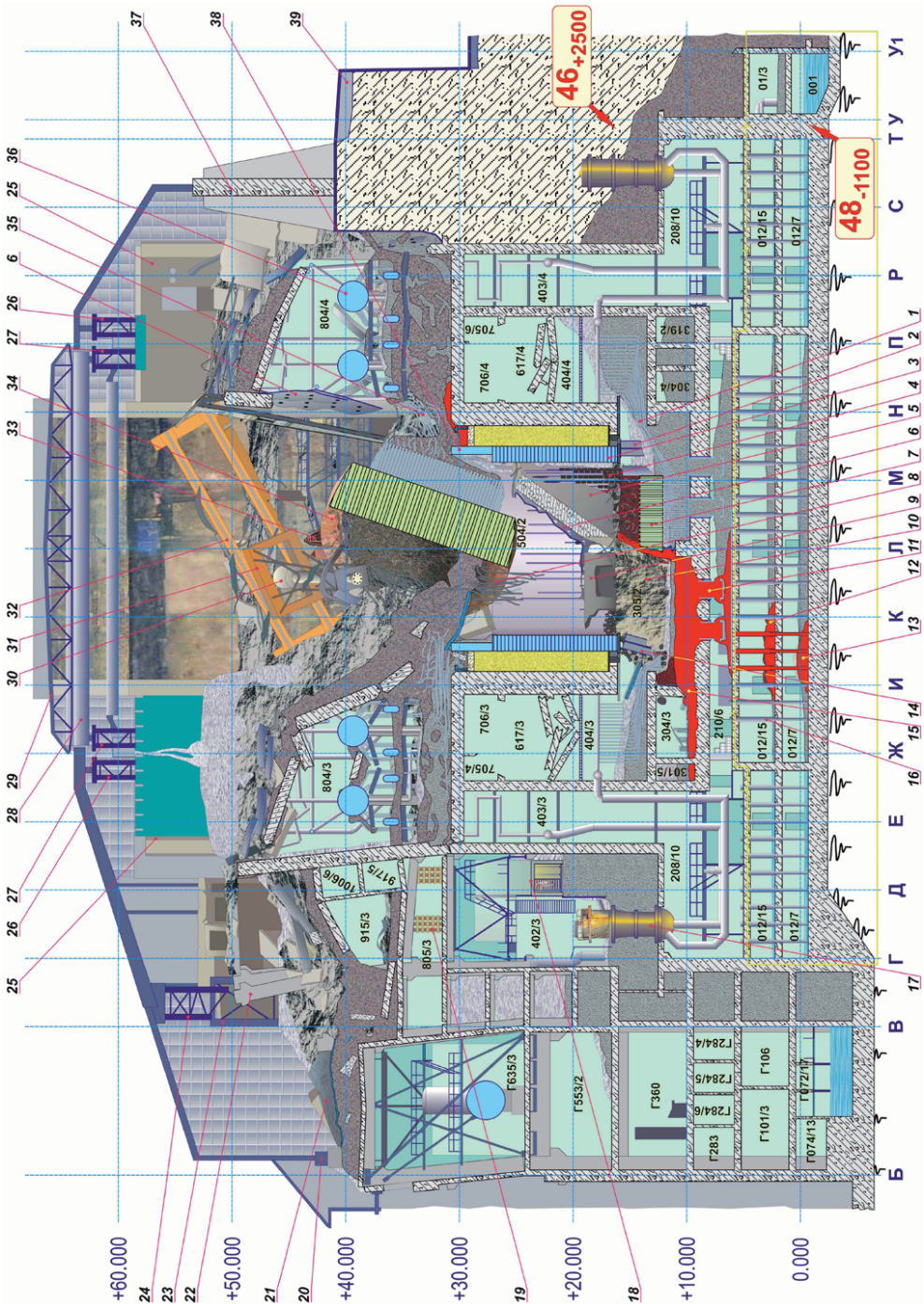
АБК-1 (2)	Административно-бытовой корпус 1 (2)
АД	Аэродинамический диаметр аэрозоля
АМАД	Аэродинамический медианный по активности диаметр аэрозоля, мкм.
АЗ	Активная зона реакторной установки
АЗФ	Фрагменты активной зоны
«Анализ...»	«Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации».
АЭС	Атомная электростанция
ББ-1	Бассейн-барботер, первый этаж
ББ-2	Бассейн-барботер, второй этаж
БВ	Бассейн выдержки отработавших тепловыделяющих сборок
Институт Биофизики	Государственный научный центр – Институт биофизики Федерального медико-биологического агентства
ВНИИАЭС	Всероссийский научно-исследовательский институт АЭС
ВНИИНМ	Высокотехнологический научно-исследовательский инсти- тут неорганических материалов имени академика А.А.Бочвара
ВНИПИЭТ	Всероссийский научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий
ВНИИТФА	Всероссийский научно-исследовательский институт техни- ческой физики и автоматизации.
ВТ-2	Вентиляционная труба 2 очереди ЧАЭС
ГЧ	Горячая частица
ГТЧ	Горячая топливная частица
ГЦН	Главный циркуляционный насос
ДК _А	Допустимая объемная активность (концентрация) радионуклида в воздухе рабочей зоны
ДЭ	Деаэрационная этажерка
ИБРАЭ	Институт проблем безопасного развития атомной энергии Российской Академии Наук
ИДК	Информационно-диагностический комплекс
ИЛЖ	Имитатор легочной жидкости
ИПБ АЭС, ИПБ АЭС НАНУ	Институт проблем безопасности атомных электростанций Национальной Академии Наук Украины (ранее – МНТЦ «Укрытие»)
ИФТТМТ ННЦ	Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий Национального научного центра Харьковский физико-технический институт

ИЯИ АН УССР	Институт ядерных исследований АН УССР
КД	Коэффициент дезактивации
КИ, «Курчатовский институт»	Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
КЭ	Комплексная экспедиция при институте атомной энергии им. И.В. Курчатова
K_{∞}	Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде
$K_{\text{эфф.}}$	Эффективный коэффициент размножения нейтронов
ЛЗ, Локальная зона	Локальная зона – территория вокруг объекта, находящаяся внутри периметра охранной зоны. Она ограничена бетонным забором, примыкающим с севера (в районе оси 44) и юга (в районе оси 35) к объекту.
ЛПА	Ликвидация последствий аварии
ЛТСМ	Лавообразные топливосодержащие материалы
МЗ	Машинный зал
Минсредмаш	Министерство среднего машиностроения СССР
МНТЦ, МНТЦ «Укрытие»	Межотраслевой научно-технический центр «Укрытие» при Национальной академии наук Украины (в настоящее время ИПБ АЭС НАНУ)
МСПП	Модернизированная система пылеподавления
МЭД	Мощность экспозиционной дозы γ -излучения
НБК	Новый безопасный конфайнмент
НВК	Нижние водяные коммуникации
НИКИМТ	Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажных технологий
НИИРЗ АТН Украины	Научно-исследовательский институт радиационной защиты Академии технологических наук Украины
НИИСК	Научно-исследовательский институт строительных конструкций
НИО КЭ	Научно-исследовательский отдел КЭ
НИФХИ	Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова
НЦ МО СССР	Научный центр Министерства обороны СССР
ОГ	Оперативная группа КИ
ОГ УНХВ МО	Оперативная группа военного университета радиационной, химической и биологической защиты химических войск Министерства обороны СССР
ПАВ	Поверхностно активное вещество
ПДД	Предельно допустимая доза
ПК	Правительственная Комиссия
ПРК	Парораспределительный коридор
ПуСО	Пункт специальной обработки
РИ, «Радиевый институт»	Научно-производственное объединение «Радиевый институт» им. В.Г. Хлопина
РАУ	Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»

РБМК-1000	Реактор большой мощности канальный, электрической мощностью 1000 МВт
СБВ	Северный бассейн выдержки
СГО	Стандартное геометрическое отклонение
$C_{\text{лз}}$	Концентрация радиоактивных аэрозолей в локальной зоне объекта «Укрытие»
C_y	Концентрация радиоактивных аэрозолей в помещениях объекта «Укрытие»
СПП	Стационарная система пылеподавления
СЦР	Самоподдерживающаяся цепная реакция
ТВС	Тепловыделяющие сборки
ТВЭЛ	Тепловыделяющий элемент
ТСМ	Топливосодержащие материалы
УкрНИИСХР	Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии
ЦЗ	Центральный зал
ЦРБ ЧАЭС	Цех радиационной безопасности ЧАЭС
ЧАЭС	Чернобыльская атомная электростанция
ЮБВ	Южный бассейн выдержки
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Общество Технической и Ядерной Безопасности (Германия)
IPSN	Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire Институт Защиты и Ядерной Безопасности (Франция)
Q	Величина энтальпии, кал/г
RIA	Авария, связанная с вводом положительной реактивности
SIP	Shelter Implementation Plan (План осуществления мероприятий – ПОМ)
$V_{\text{ф}}$	Линейная скорость фильтрации воздуха
β	Доля запаздывающих нейтронов относительно мгновенных нейтронов, образующихся при делении ядра

ПРИЛОЖЕНИЕ:

объект «Укрытие». Разрез по оси 46+2500

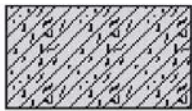


Объект «Укрытие». Разрез по оси 46₊₂₅₀₀
(помещения бассейна-барботера – по оси 48₋₁₁₀₀)

Помещения, представленные на разрезе:

Ось 48 ₋₁₁₀₀	
001	коридор трубопроводов
01/3	коридор трубопроводов
012/7	помещение бассейна-барботера
012/15	помещение бассейна-барботера
Ось 46 ₊₂₅₀₀	
210/6	помещение ПРК
208/10, 208/14	блок баков ГЦН
301/5	коридор обслуживания
304/3, 304/4	помещение КИП
305/2	подаппаратное помещение
319/2	помещение парогазовых трубопроводов
402/3	помещение двигателей ГЦН
403/3, 403/4	шахта опускных трубопроводов
404/3, 404/4	бокс НВК
504/2	шахта реактора
617/3, 617/4	помещение управления ЗРК
705/4, 705/6	коридор
706/3, 706/4	помещение панелей расходомеров «Тибр» и УК СЦК «Скала»
804/3, 804/4	бокс сепараторов
805/3	помещение воздухопроводов вытяжного центра
915/3	вытяжной вентцентр
917/5	помещение уровнемеров барабан-сепараторов
1006/6	помещение датчиков барабан-сепараторов
Г074/13	шинный коридор
Г072/17	кабельные полуэтажи
Г101/3	трасса откачки ЖРО
Г106	приточная воздухораспределительная камера
Г284/4-6	кабельная галерея
Г283	вентцентр
Г360	большой щит управления
Г553/2	трубопроводный коридор
Г635/3	помещение деаэраторов

Обозначения материалов:



— железобетон строительных конструкций



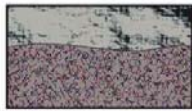
— металлоконструкции



— бетон 1986 года



— песчано-гравийная засыпка



— завал в центральном зале и других помещениях



— завал и ТСМ в помещении 305/2



— ЛТСМ



— вода

Обозначения:

- 1** — трубы нижних водяных коммуникаций (НВК);
- 2** — северная дополнительная опора;
- 3** — водяной бак биологической защиты — схема «Л»;
- 4** — периферийный ряд каналов охлаждения;
- 5** — наклонно стоящая железобетонная плита (фрагмент стены бокса сепараторов);
- 6** — металлическая облицовка теплозащиты бокса сепараторов;
- 7** — схема «ОР»
- 8** — технологические каналы;
- 9** — железобетонная конструкция;
- 10** — стена «рыхлых» ТСМ;
- 11** — паросбросной клапан;
- 12** — «куча» ББ-2;
- 13** — «куча» ББ-1, покрытая ЭКОРом;
- 14** — южная дополнительная опора;
- 15** — пролом-прожог в помещение 304/3;
- 16** — паросбросная труба;
- 17** — главный циркуляционный насос;
- 18** — наклонная галерея;
- 19** — шпальная кладка;
- 20** — балка «Осьминог»;
- 21** — свинцовые листы;
- 22** — наклоненные колонны;
- 23** — западная опора балки «Мамонт»
- 24** — балка «Мамонт»
- 25** — стена по оси 50;
- 26** — блок балок Б1;
- 27** — блок балок Б2;
- 28** — трубный накат;
- 29** — легкая кровля;
- 30** — разгрузочно-загрузочная машина (РЗМ);
- 31** — тележка РЗМ;
- 32** — мост РЗМ;
- 33** — диагностический буй;
- 34** — верхняя металлоконструкция реактора — схема «Е»;
- 35** — трубы верхних пароводяных коммуникаций (ПВК);
- 36** — барабан-сепаратор;
- 37** — северная контрфорсная стена;
- 38** — водяной бак биологической защиты — схема «Д»;
- 39** — каскадная стена.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА к Приложению

1. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отв. Исполнитель Боровой А.А. Отчет МНТЦ «Укрытие», арх. № 3836, 2001 г. Чернобыль, 337 с.
2. Богатов С.А., Боровой А.А., Гаврилов С.Л., Лагуненко А.С. и др. База данных по местонахождению и состоянию ядерного топлива 4-го блока ЧАЭС до и после аварии. Препринт РНЦ «Курчатовский институт», № 130-11/2, Москва 2007 г., 146 с.
3. Лагуненко А.С. Изучение скрытых скоплений топливосодержащих материалов разрушенного 4-го блока Чернобыльской АЭС. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук. ИПБ АЭС НАН Украины, 2007, 141 с.
4. Bogatov S., Borovoi A., Gavrilo S., Lagunenko A., Pazukhin E. Half an hour after the beginning of the accident. Moscow, 2006, OKPRINT, 22 p.
5. Скважины объекта «Укрытие». Обобщенные данные (альбом). Лагуненко А.С., Скуридин Г.С. Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие». № 09/05-66 от 09.06.98 г., Чернобыль, 117 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
9. СИСТЕМА «ФИНИШ».....	10
9.1. Система «Финиш» и контроль над безопасностью скоплений ТСМ в «Укрытии».....	10
9.2. Совершенствование систем контроля ТСМ.....	13
9.3. Структурная схема ИИС «Финиш»	15
9.4. Анализ результатов измерений, полученных с помощью системы «Финиш» (на примере 1997 г.)	22
10. РАДИОАКТИВНАЯ ПЫЛЬ И АЭРОЗОЛИ. ГОРЯЧИЕ ТОПЛИВНЫЕ ЧАСТИЦЫ	31
10.1. В первые месяцы после аварии	31
10.2. Во время строительства «Укрытия»	35
10.3. Процессы, при которых образовывались радиоактивные частицы	39
10.4. Методы исследования горячих топливных частиц	42
10.4.1. Общие замечания.....	42
10.4.2. Отбор проб радиоактивной пыли и аэрозолей	44
10.4.3. Измерения концентрации и радионуклидного состава РАУ	46
10.4.4. Локализация и извлечение ГТЧ из проб.....	47
10.4.5. Определение аэродинамических характеристик ГТЧ	48
10.4.6. Микроскопическое строение и элементный состав ГТЧ.....	51
10.4.7. Растворимость ГТЧ в имитаторе легочной жидкости	58
10.5. Опасность горячих топливных частиц, попавших в дыхательные пути	58
11. ЗАДАЧИ КЭ И ПРОБЛЕМЫ РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ И АЭРОЗОЛЕЙ.....	63
11.1. Бурения скважин и строительно-монтажные работы, проводившиеся КЭ	63
11.2. Исследования аэрозолей в КЭ. 1988–1991 гг. [1–5, 6]	67
11.2.1. Основные характеристики РАУ	67
11.2.2. Плотность топливных частиц поверхностного загрязнения (эксперименты 1990 г.) [2]	70
11.2.3. Растворимость ГТЧ в различных жидкостях	71
11.2.4. ГТЧ – «свидетели аварии».....	75
11.3. Дезактивация и пылеподвлияние при очистке помещений (см. [17]).....	79
11.3.1. Дезактивация. Жидкостная дезактивация	79
11.3.2. Сухая дезактивация. Дезактивация с применением снимаемых защитных полимерных покрытий (см. [21–24])	84
11.3.3. Технологич нанесения снимаемых защитных полимерных покрытий, применявшаяся на объекте «Укрытие» [24].....	88
11.3.4. Аэрозольные средства дезактивации [17], [24]	90

11.3.5. Схема принятия решений по проведению дезактивационных работ и организации защиты персонала	91
11.4. Образование РАУ при проведении буровых работ.....	91
12. ВЫБРОС АЭРОЗОЛЕЙ ИЗ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»	98
12.1. Методы измерения выбросов аэрозолей из «Укрытия»	98
12.1.1. Вентиляционная система объекта.....	98
12.1.2. Организованные и неорганизованные выбросы	99
12.2. Система пылеподавления.....	106
12.2.1. Создание системы пылеподавления	106
12.2.2. Выполнение СПП дополнительной функции – повышения ядерной безопасности объекта	109
12.2.3. Модернизация системы пылеподавления	111
12.2.4. Пылеподавляющие составы и защитные полимерные покрытия на их основе, применяемые при работе МСПП	114
12.2.5. Исследования защитного плночного покрытия в 2009 г. [27].....	118
12.2.6. Дальнейшее использование МСПП.....	120
12.3. Радиационная авария	120
12.3.1. Первые оценки опасности обрушения верхних конструкций «Укрытия»	120
12.3.2. Сценарий обрушения строительных конструкций («Анализ ... 2001 г.» [1])	124
12.3.3. Исследования топливной пыли на поверхности развала ([31–33])..	124
12.3.4. Последствия радиационной аварии («Анализ ... 2001 г.» [1])	130
12.3.5. Сколько всего топливной пыли в объекте «Укрытие»	135
13. РАДИОАКТИВНЫЕ АЭРОЗОЛИ НА ПЛОЩАДКЕ ОБЪЕКТА.....	141
13.1. Влияние РАУ на загрязнение воздуха на площадке «Укрытия»	141
13.2. Некоторые результаты многолтного мониторинг активности воздуха в локальной зоне «Укрытия»	146
СОКРАЩЕНИЯ и ОБОЗНАЧЕНИЯ	149
ПРИЛОЖЕНИЕ: объект «Укрытие». Разрез по оси 46 ₊₂₅₀₀	153

Подписано в печать 15.03.2013

Печать цифровая

Тираж 100 экз. Заказ 27

Отпечатано в НИЦ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1