



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

А.А. БОРОВОЙ, Е.П. ВЕЛИХОВ

ОПЫТ ЧЕРНОБЫЛЯ

ЧАСТЬ 1





НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

А.А. БОРОВОЙ, Е.П. ВЕЛИХОВ

ОПЫТ ЧЕРНОБЫЛЯ

ЧАСТЬ 1

Москва, 2012

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 1.

М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2012, 168 с.

ISBN 978-5-904437-57-2

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

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

Она произошла ночью 26 апреля 1986г. 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 сопровождался 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).

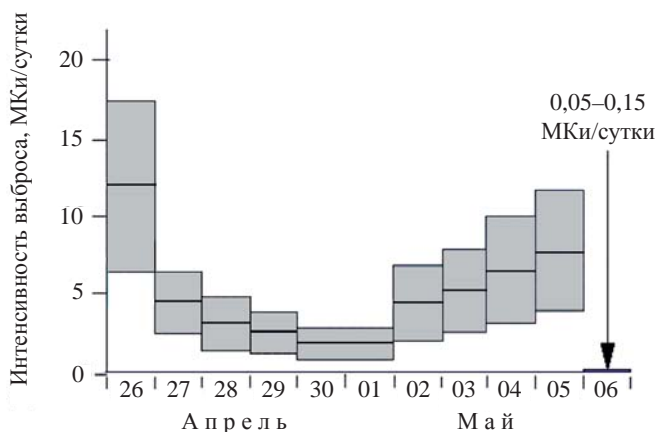


Рис. 1. Интенсивность выброса радиоактивности из разрушенного блока в период активной стадии аварии (в миллионах Кюри в сутки). Погрешность оценки выброса $\pm 50\%$. Значения выброшенной активности пересчитаны на 06.05.86 г. (конец активной стадии) с учетом радиоактивного распада¹ [1]

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.

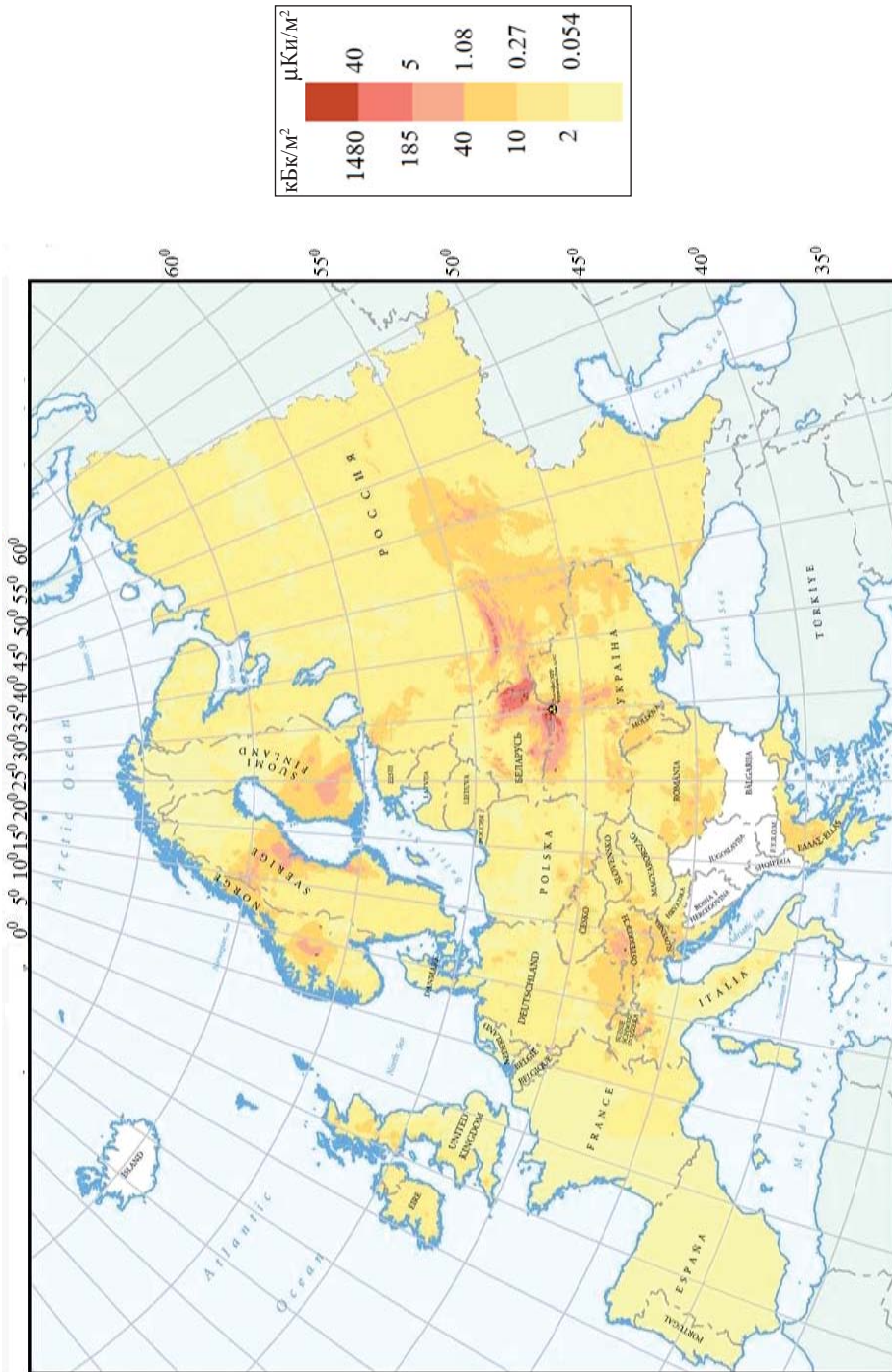


Рис. 2. Европейская карта загрязнения цезием-137 (Чернобыльское + глобальное)

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 продолжаются 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, 5–16]), 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.

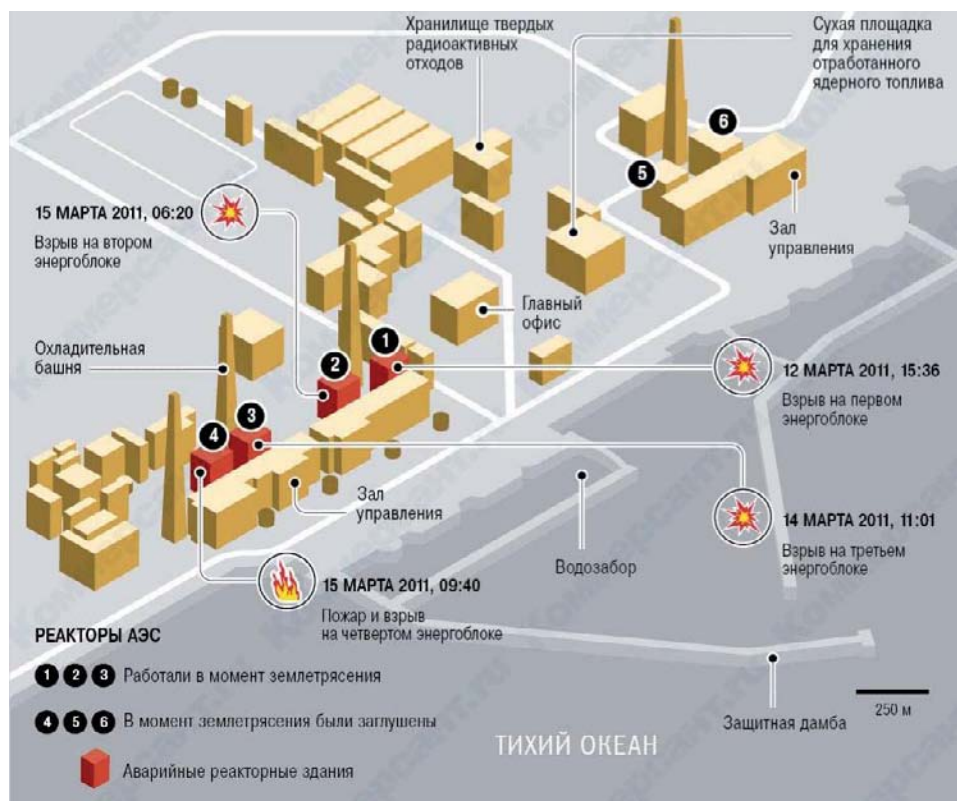


Рис. 3. Состояние энергоблоков АЭС Фукусима Дай-ичи после аварии. На рис. указаны причины разрушения блоков и время, когда это произошло

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.

1. МЕРОПРИЯТИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В ПЕРВЫЕ ДНИ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ АКТИВНОЙ СТАДИИ АВАРИИ

1.1. Работы по очистке площадки вокруг 4-го блока и кровлей 4 и 3-го блоков

После окончания активной стадии аварии территория вокруг 4-го блока была буквально завалена обломками разрушенных конструкций. Весь этот мусор был радиоактивен, причем особую опасность представляли находящиеся в нем фрагменты активной зоны — графитовые блоки и части ТВЭЛ-ов.

Такие же материалы находились на верхних отметках блока (так называемый «развал»), попали на кровлю и внутрь машинного зала, деаэрационной этажерки, на кровлю третьего блока, на площадки вокруг вытяжной трубы и т.п. (рис. 1)



Рис. 1. Разрушенный 4 блок и площадка вокруг него. Съемка с вертолета. 14 мая 1986 г.

Кроме того, на территорию станции, стены и кровли зданий осела радиоактивная пыль.

Следует сказать, что достоверная информация об огромных радиационных полях как в самом блоке, так и на окружающей его территории появилась не сразу.

В первые часы после аварии официальные данные относительно истинной радиационной обстановки не соответствовали действительности.

Объяснялось это двумя причинами. Объективной — отсутствием необходимых приборов¹ и субъективной — нежеланием руководства АЭС признать факт разрушения реактора.

Так измерения, проведенные начальником штаба гражданской обороны С.С.Воробьевым у 4-го блока с помощью имевшегося у него дозиметра, показывали, что мощность экспозиционной дозы (МЭД) гамма излучения превышает 200 р/час (предельное значение для прибора ДП-5) [1]. Но ни руководство станции, ни руководство ГО Киевской области не приняли во внимание эти данные.

Ночью 26 апреля директор ЧАЭС В.П. Брюханов передавал в вышестоящие инстанции: «Реактор цел, продолжаем подавать воду в аппарат, уровень радиации в пределах нормы. Погиб Валерий Ходемчук, а Владимир Шашенок получил стопроцентный ожог поверхности кожи и находится в тяжелом состоянии» [2].

Рано утром он сообщил о том, что на территории около 4-го блока радиационный фон составляет 3–6 рентген в час, сам реактор не пострадал.

И даже в 10 часов утра, когда заместитель главного инженера станции А.А. Ситников², который по заданию руководства обследовал реакторное отделение 4-го блока и своими глазами видел состояние центрального зала и разрушенный реактор, доложил об этом главному инженеру и директору ЧАЭС, те ему не поверили.

Незнание реальной радиационной обстановки привело не только к неверному пониманию масштабов аварии и непринятию необходимых мер, но и прямо к гибели людей, пытавшихся после взрыва самостоятельно или по приказу руководства станции осмотреть разрушенный блок.

В 14 час. в г.Припять прибыла межведомственная бригада специалистов, немедленно приступившая к определению радиационной обстановки. Совместно с сотрудниками ЧАЭС и военнослужащими Химвойск Минобороны были построены первые достоверные карты дозовых полей.

На рис. 2 представлены некоторые результаты, отражающие радиационную обстановку на территории вокруг аварийного блока, сложившуюся к вечеру 26 апреля. В рисунке использованы данные, переданные в «Курчатовский институт», Институт биофизики и др. (см., например, [3]).

В целях улучшения работ по радиационному контролю 29 апреля Правительственная комиссия возложила ответственность за его проведение внутри 10-километровой зоны на начальника Химвойск Министерства оборо-

¹В распоряжении основного персонала были дозиметрические приборы, способные регистрировать уровни МЭД не более 1000 микрорентген в секунду (3,6 Р/час). Дозиметры, имеющие более высокий верхний диапазон регистрации, оказались закрытыми в помещении, которое не удалось вскрыть.

²Умер от острой лучевой болезни 5 мая 1986 г.

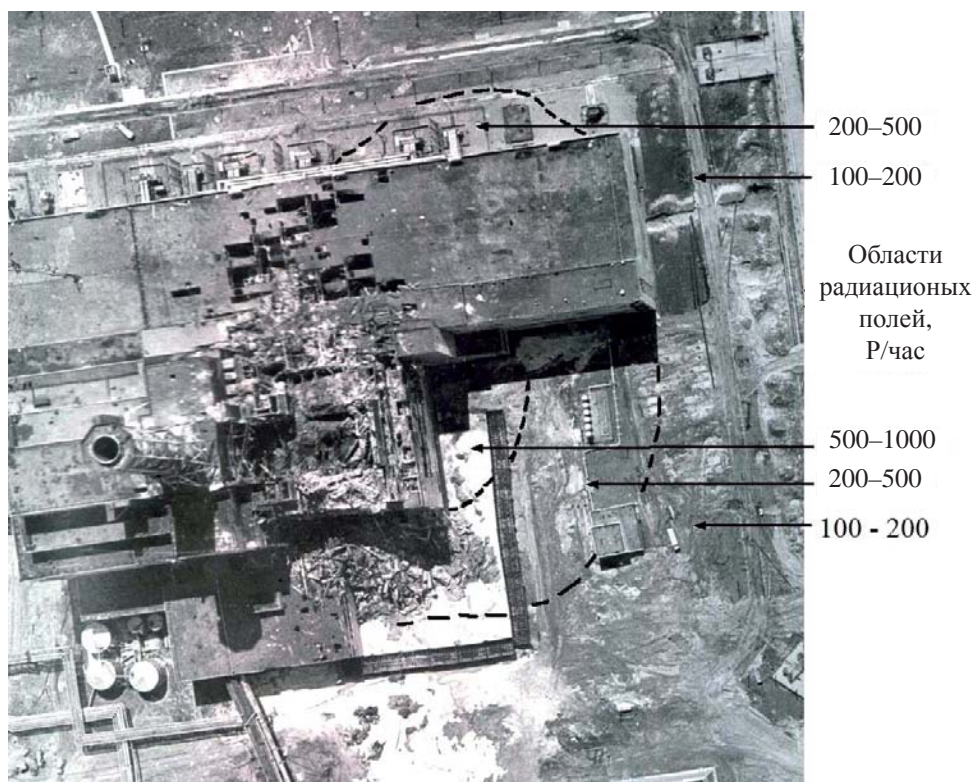


Рис. 2. Радиационная обстановка на площадке 4-го блока к вечеру 26.04.86

ны. После этого на территории ЧАЭС была создана реперная сеть сначала из 29, позднее из 36 пунктов контроля. В них ежедневно проводилось измерение МЭД.

После окончания активной стадии аварии (06.05.86), для развертывания масштабных работ по ликвидации последствий аварии, было необходимо сначала провести очистные и дезактивационные работы на территории станции.

Для этого она была разбита на отдельные зоны, в которых выполнялись следующие работы.

- **Удаление с крыши выброшенных фрагментов активной зоны.**
- **Дезактивация крыши и наружных поверхностей зданий.**
- **Уборка с территории загрязненного мусора и оборудования.**
- **Снятие грунта (5÷10 см) и вывоз его в места временного захоронения.**
- **Подсыпка чистого грунта (песка, гравия и т.п.).**
- **Укладка бетонных плит на грунт.**
- **Покрывание территории пленкообразующими составами.**

К концу мая 1986 г. вокруг разрушенного 4-го блока был уже проведен большой объем дезактивационных работ. Удалены наиболее крупные загрязненные фрагменты, в ряде мест радиоактивный грунт либо перемещен к завалу с западной стороны блока, либо загружен в контейнеры. Часть снятого грунта, мусор и элементы завалов были вывезены в места захоронения, в том числе около 5000 м³ временно поместили на территории ЧАЭС в районе хранилища твердых отходов.

Однако до сколько-нибудь полной очистки площадки было еще далеко, тем более что при проведении работ грунт перемешивался (например, гусеницами машин) и часть активности осталась не удаленной даже после снятия верхнего слоя земли.

Поэтому шла постоянная засыпка территории чистым грунтом и укладка на его поверхность бетонных плит.

После принятия в конце мая 1986 г. основных технических решений по консервации 4-го энергоблока и сооружению «Укрытия» дезактивационные работы на промплощадке продолжились и даже приобрели более широкий размах.

В результате, если перед аварией отметки поверхности земли на участке локальной зоны «Укрытия» колебались в пределах от 113,8 до 115,2 м, то после дезактивации образовался своеобразный «сэндвич», в котором слои грунта располагались в порядке, показанном на рис. 3.

Толщина послеаварийного техногенного слоя грунта в локальной зоне составляла преимущественно 1.7 м÷2,7 м, реже 3.4 м÷6.5 м, на участках строительства «пионерных» стен она достигала 8.4 м÷10.1 м.

Толщина аварийного «активного» слоя колебалась в пределах 0.15 м÷0.30 м. Радиационное загрязнение этого слоя наибольшее, так как в процессе ликвидации аварии автотранспортной техникой произошло перемешивание грунта, составляющего доаварийную поверхность территории, и выпадений продуктов взрыва реактора

Доаварийные техногенные грунты³ были образованы при планировке территории и устройстве засыпок котлованов зданий и траншей коммуникаций (после строительства зданий и сооружений II очереди ЧАЭС). Толщина слоя — от 1 м до 8 м.

Естественный, доаварийный грунт представлен песками, супесью и суглинками с включением небольших фрагментов строительных конструкций.

Сравнимыми по сложности и опасности с работами по очистке площадки оказались и работы по очистке кровель 4-го и 3-го блока от радиоактивных



Рис. 3. Последовательность почвенных слоев в локальной зоне объекта «Укрытие»

³В 1982 г. на 1-м энергоблоке ЧАЭС произошел инцидент, сопровождавшийся выбросом радиоактивности на промплощадку. В процессе ее дезактивации на отдельных участках был снят слой грунта толщиной несколько сантиметров. Детальная информация относительно величины загрязнения промплощадки вокруг 4-го энергоблока отсутствует.

фрагментов активной зоны, выброшенных во время взрыва. Локальные мощности доз на кровлях иногда превышали 1000 Р/ч, а «рассеяние» фрагментов приводило к высокой неоднородности дозовых полей (в пределах шага МЭД могла меняться в десятки раз). Наиболее крупные обломки сбрасывались в развал реактора, более мелкие грузились в металлические ящики и удалялись. В результате к моменту окончания строительства «Укрытия» кровли были в основном очищены от АЗФ.

1.2. Основные механизмы, использовавшиеся при очистке площадки

После аварии для работ на ЧАЭС были направлены сотни единиц дорожных и строительных машин (бульдозеры, бетоновозы, скреперы, грейдеры, автокраны и т.д.), а также специальной техники инженерных войск.

Определяющую роль для разбора радиоактивных завалов вокруг 4-го блока сыграли инженерные машины разграждения (чаще всего — ИМР и ИМР-2⁴). Они же использовались для покрытия территории слоем песка, гравия и др., загрузки и выгрузки контейнеров с радиоактивным мусором [4].

Эти машины появились на площадке уже в первых числах мая 1986 г. Разбросанные взрывом радиоактивные обломки сгребались и загружались ими в металлические контейнеры, затем контейнеры захватом-манипулятором устанавливали на бронетранспортеры (см. рис. 4 и 5).

Машины были герметизированы, снабжены системой противорадиационной защиты, радиостанцией, радиометрами, приборами химической разведки, фильтровально-вентиляционными установками (для работы на местно-



Рис. 4. Инженерная машина разграждения

⁴Машина была разработана на базе танка Т-72А и серийно выпускалась ПО «Уралвагонзавод» в городе Нижний Тагил. Ее основное назначение — помощь в продвижении войсковых колонн по территории, подвергшейся применению ядерного оружия. Технические характеристики ИМР позволяли прокладывать проходы, как в сплошных завалах леса в пересеченных условиях местности, так и проделывать путепроводы для военной техники в городских завалах.



Рис. 5. ИМР на площадке 4-го блока

сти, загрязненной радиоактивными веществами). Проектный коэффициент снижения дозы облучения составлял для них ~ 10 .

Они были оснащены бульдозерным и крановым оборудованием и имели телескопическую стрелу с захватом-манипулятором.

Почти сразу же выяснилось, что для работы в специфических условиях локальной зоны 4-го блока ИМР имеет ряд существенных недостатков.

Ее конструкция предусматривала защиту от радиоактивных источников, расположенных на земле. У разрушенного блока излучение падало на ИМР и с боков, и сверху. Пришлось устанавливать на машину дополнительную защиту. Согласно документам [4] эта защита ослабляла радиацию⁵ в ~ 100 раз в полях с МЭД до 100 Р/ч. В случае если поля достигали 200–250 Р/ч, устанавливалась еще более массивная защита, дававшая ослабление в ~ 500 раз. Заметим, что при работе в таких больших радиационных полях даже небольшая щель или неоднородность в защите, установленной в полевых условиях, может привести к опасному переоблучению работающего персонала.

Другим важным недостатком ИМР являлись значительные трудности, возникавшие при ее дезактивации и приводившие к тому, что после нескольких дней работы у 4-го блока собственная радиоактивность машины делала невозможным нахождение внутри нее экипажа.

По мере выявления недостатков ИМР шла ее модернизация, которая выполнялась буквально за считанные дни. В качестве примера можно привести то, что уже к концу мая на заводе была создана и доставлена на ЧАЭС машина ИМР-2Д с множеством усовершенствований, связанных с обеспечением безопасности работы. Например — усиленная защита, возможность наблюдения за движением и действиями механизмов не визуальным, а с помощью телекамер и т.п.

Большое количество персонала было привлечено для вывоза радиоактивного грунта и засыпки площадки около разрушенного блока песком и щебнем. Производились эти работы с помощью грузовых машин. Кабины машин

⁵Расчеты велись для гамма-излучения с $E=1,5$ МэВ.

защищались свинцовыми листами, что позволило значительно снизить дозовые нагрузки на водителя (см. рис. 6, 7).

Отдельно следует остановиться на использовании дистанционно-управляемых и робототехнических устройств.

Практически сразу после начала работ Правительственной Комиссией была поставлена задача заменить людей, работающих на площадке и крышах зданий такими устройствами.

В первую очередь были сделаны попытки на основе имеющихся механизмов создать радиоуправляемые бульдозеры и погрузчики [5, 6].

В сжатые сроки целым рядом предприятий были изготовлены комплекты аппаратуры для радиоуправляемой партии бульдозеров. Прошли срочную подготовку механики-водители, а в цехах ряда заводов Москвы, Киева, Ленинграда, других городов были созданы новые партии машин.

Специалисты ГосИФТП совместно с ВНИИТРАНСМАШ и ВНИИ АЭС НПО «Энергия» разработали транспортный робот СТР-1 для работы на кровлях (см. рис. 8) и комплекс «Клин-1» для работы на территории ЧАЭС.

«Клин-1» был создан на базе инженерной машины разграждения ИМР-2 и состоял из машины-робота и машины управления.

В ЦНИИ РТК при ЛПИ им. Калинина (С.-Петербург) были созданы роботы-разведчики РР-1, РР-4, РР-Г1 (см. рис. 9), РР-Г2, тяжелые гусеничные роботы ТР-Г1, ТР-Г2 [7].

Институт монтажной технологии (НИИКИМТ) предложил манипулятор М-133 с грейфером. Предприятие Белоярский атомэнергоремонт создало управляемый по кабелю механизм для сухой дезактивации — «пылесос».



Рис. 6. Для защиты водителей грузовых машин, вывозящих радиоактивный грунт, кабины машин защищались свинцовыми листами



Рис. 7. Засыпка площадки чистым грунтом. Кабина водителя имеет дополнительную защиту



Рис. 8. Подготовка СТР-1 к работе

Прибыли из Германии радиоуправляемые манипуляторы MF-2 и MF-3⁶, радиоуправляемые бульдозер PR-751, экскаватор и погрузчик.

Япония поставила радиоуправляемый бульдозер Д-155.

Однако высокие радиационные поля, создающие помехи для работы электроники, препятствовали эффективному использованию радиоуправляемых изделий.

⁶Оба манипулятора ФРГ практически при первых же попытках их использования вышли из строя под действием высоких радиационных полей

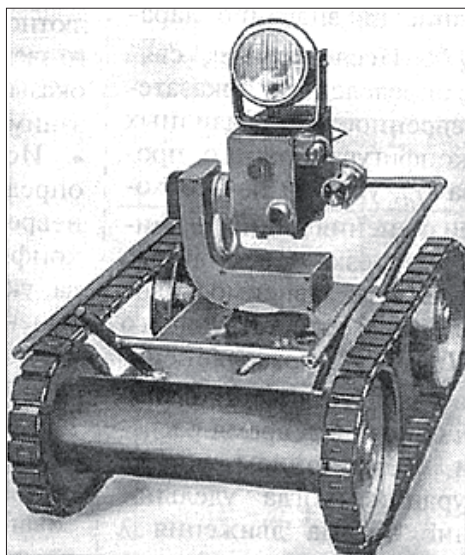


Рис. 9. Легкий робот-разведчик РР-Г1

Механизмы, управляемые по кабелю, имели свои недостатки — недостаточную проходимость, невозможность управления ими оператором в условиях отсутствия прямой видимости и т.п.

В результате эти механизмы сыграли весьма скромную роль при работах по очистке и дезактивации площадки и крыш зданий. Основная тяжесть легла на плечи людей, непосредственно управлявших механизмами или работавших вручную на этих объектах (рис. 10).

Результаты проведенных работ (и естественного радиоактивного распада радионуклидов) привели к тому, что величины МЭД в локальной зоне к моменту завершения строительства «Укрытия» упали в сотни раз.

В этот период Оперативная группа «Курчатовского института» выпустила документ «Отчет о состоянии физических параметров «Укрытия» к моменту



Рис. 10. Дезактивация площадки ЧАЭС

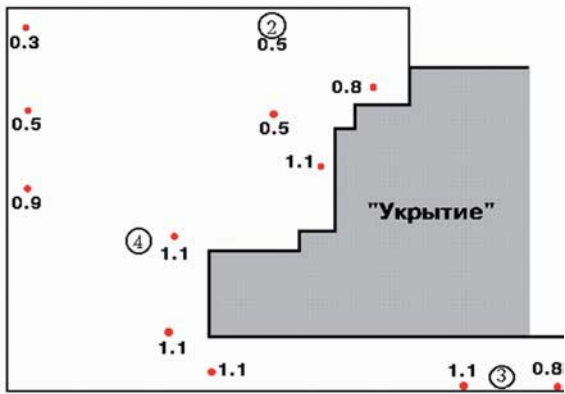


Рис. 11. Радиационная обстановка на площадке «Укрытия» в момент завершения строительства объекта (МЭД – Р/ч). Дальнейшая динамика МЭД для точек 2÷4 приведена на рис. 12

завершения основных строительных работ», утвержденный 28 октября 1986г. академиком В.А. Легасовым [8]⁷.

В отчете использованы материалы предоставленные «Курчатовским институтом», «Радиевым институтом», УНХВ МО СССР, Госкомгидрометом.

Величины МЭД, измеренные по периметру сооружения в ноябре 1986 г., приведены на рис. 11 (сравните с рис. 2).

Рис. 12 иллюстрирует результаты измерений МЭД в 3-х точках вокруг «Укрытия», проведенные в период времени от 340 до 480 дней после аварии. Из него следует, что меры по дальнейшей очистке и дезактивации площадки также значительно убыстрили падение МЭД со временем (по сравнению с расчетной зависимостью «1»).

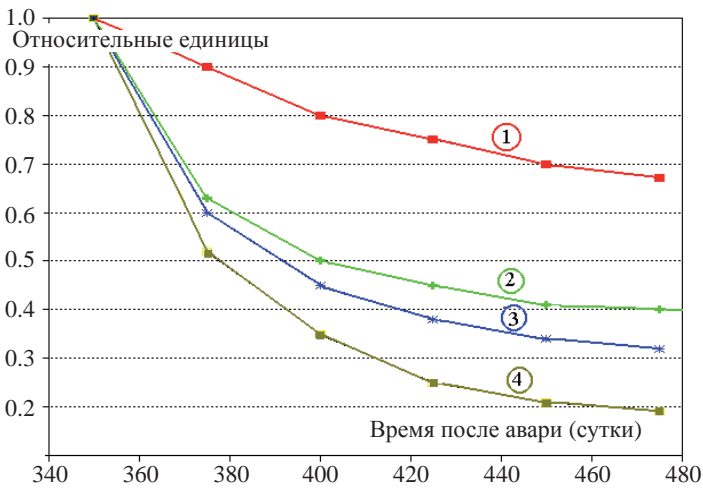


Рис. 12. Результаты измерений МЭД в 3-х точках (2, 3, 4 рис. 11) вокруг «Укрытия», проведенных в период времени от 340 до 480 дней после аварии. Кривая 1 – расчет падения гамма-активности для топлива, разрушенного блока

⁷Подробнее об этом документе говорится в Гл. 2.

1.3. Опасность ядерного топлива, оставшегося в 4-ом блоке

Пока военнослужащие и гражданские специалисты боролись с радиоактивными завалами в зоне 4-го блока и на всей площадке ЧАЭС начали разворачиваться работы, цель которых была попытаться взять под контроль ядерное топливо и радиоактивные материалы, оставшиеся в разрушенном блоке.

Уже многократно писалось о том, что еще на своем первом заседании, вечером 26 апреля 1986г. Правительственная комиссия обратила внимание на три вида опасности, исходящих от этого топлива (см. например, [9–12]).

Ядерная опасность – возникновение самоподдерживающейся цепной реакции.

Вот, что вспоминал об этом В.А. Легасов [9]: «...первое, что нас всех волновало, был вопрос о том, работает или не работает реактор или его часть, то есть продолжается ли процесс наработки короткоживущих радиоактивных изотопов.

Первая попытка выяснить это была предпринята военными. В специализированных бронетранспортерах, принадлежащих химвойскам, вмонтированы датчики, которые имеют и гамма-, и нейтронные измерительные каналы.

Первые же измерения нейтронным каналом показали, что, якобы, существуют мощные нейтронные излучения. Это могло означать, что реактор работает, и мне пришлось на этом бронетранспортере подойти к реактору, разобраться и убедиться в том, что в условиях очень мощных гамма-полей, которые существуют на объекте, нейтронный канал, как нейтронный канал, конечно, не работает, ибо он «чувствует» мощные гамма-поля, а не нейтроны.

Поэтому наиболее достоверная информация о состоянии реактора могла быть получена по соотношению коротко и относительно долго живущих изотопов йода.

За основу взяли соотношение йода-184 и йода-181 и путем радиохимических измерений довольно быстро убедились, что наработки короткоживущих изотопов йода не происходит, и, следовательно, реактор не работает и находится в подкритическом состоянии.

Впоследствии, на протяжении нескольких суток, многократно повторенный соответствующий анализ газовых компонент показывал отсутствие летучих короткоживущих изотопов, и это было для нас основным свидетельством подкритичности той топливной массы, которая осталась после разрушения реактора».

Однако и после этого, вопрос о потенциальной ядерной опасности разрушенного блока не мог быть снят.

При практическом отсутствии данных о количестве оставшегося в нем топлива, о геометрических и физико-химических свойствах топливосодержащих материалов специалистам КИ было поручено оценить возможность возникновения СЦР при наиболее консервативных предположениях.

И первые расчеты были выполнены к началу мая 1986г. [13].

Главное опасение вызывал тот факт, что в разрушенном реакторе мог остаться неповрежденным значительный кластер уран-графитовой кладки.

Расчеты показали, что «при отсутствии воды и стержней СУЗ коэффициент размножения K_{∞} составляет ~ 1.16 при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$ ».

В других расчетах было показано, что в кластере, содержащем более 154 каналов ($\sim 1/10$ часть кладки) возможно возникновение самоподдерживающейся

ся цепной реакции, в случае, если по каким-то причинам в нем нет поглощающих стержней.

Среднее выгорание топлива принималось равным $10.3 \text{ МВт} \times \text{сутки/кг (U)}$ (реальное топливо 4-го блока).

Менее вероятной, но все же возможной, представлялась ситуация, при которой опасный фрагмент кладки был бы выброшен при взрыве в Центральный зал.

В то же время специалисты по реакторной физике отмечали, что после взрывов сохранение такого большого кластера реактора маловероятно, а время его гипотетической, неуправляемой работы мало — кластер сильно нагреется, развалится, а наработанная в нем радиоактивность будет на много порядков меньше, чем радиоактивность уже разрушенного топлива.

Тепловая опасность состояла в возможности образования высокотемпературного ($\sim 2000^\circ\text{C}$) расплава из материалов активной зоны.

Этот расплав мог начать прожигать перекрытия здания и опускаться вниз вплоть до достижения грунтовых вод.

Процесс этот имел даже неофициальное название — «Китайский синдром», по имени художественного фильма, в котором обыгрывалась аналогичная ситуация.

Когда высказывались эти опасения перед глазами специалистов стоял пример крупнейшей (до Чернобыля) аварии, случившейся на АЭС Три Майл Айленд (Трехмильный остров) в штате Пенсильвания США. В результате этой аварии расплавилось около половины активной зоны, а образовавшийся кориум (расплав материалов АЗ) опустился на дно металлического бака ядерного реактора (см., например, [14] и рис. 13).

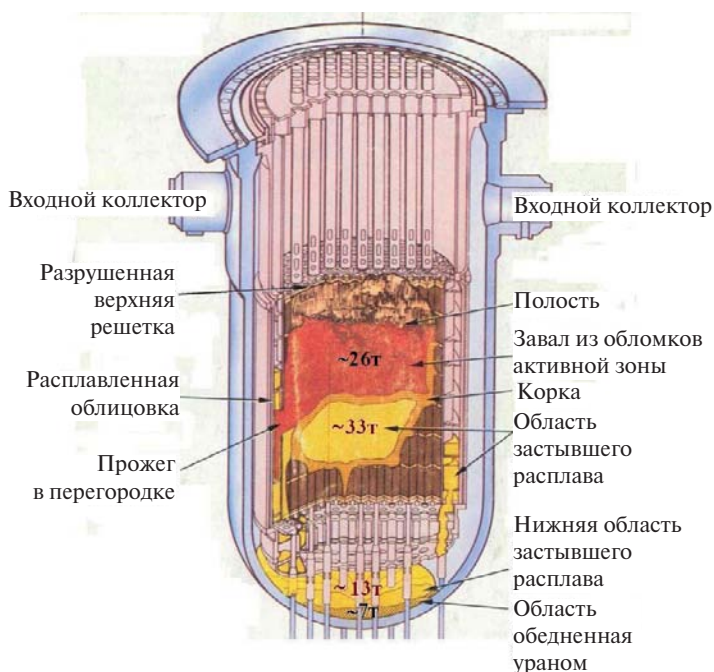


Рис. 13. Разрез реактора 2-го блока АЭС Три Майл Айленд после аварии. Область застывшего расплава образовалась из топлива (UO_2) и оболочек ТВЕЛ-ов (сплав Zr). Эта область содержит $(\text{U}, \text{Zr})\text{O}_2$ и имеет в своем составе примеси Fe , Ni , Cr и других материалов, входивших в состав конструкций АЗ

Радиационная опасность. Этот вид опасности был связан с выбросом активности в окружающую среду. Он кардинально (в сотни раз) уменьшился после 6 мая, но разрушенный реактор все еще представлял собой огромный открытый источник радиоактивности, угрожающий новыми выбросами⁸.

Эти виды опасности надолго определили фронт работ для многих научных и инженерных организаций и, особенно, «Курчатовского института». Поэтому после окончания активной стадии аварии и относительной стабилизации ситуации, в Чернобыле и на московской площадке КИ стали проводиться интенсивные исследования, ставившие своей первой целью обнаружить топливо в блоке (ЧАЭС) и определить состав и количество радиоактивных материалов, оставшихся в нем (ЧАЭС, Москва).

1.4. Определение активности и количества ядерного топлива, оставшегося в блоке

1.4.1. Проведение расчетов радионуклидного состава ядерного топлива 4-го блока

В Москве перед сотрудниками «Курчатовского института» была поставлена задача максимально быстро провести расчеты накопления различных радионуклидов в топливе 4-го блока за время прошедшей кампании (до аварии).

Такие расчеты для РБМК-1000 существовали, но уже первые спектрометрические и радиохимические измерения образцов, доставленных с ЧАЭС, показали, что точность этих расчетов, особенно при определении накопления трансурановых элементов, абсолютно не достаточна.

Новые расчеты были выполнены к началу мая 1986г. (впервые их результаты полностью приведены в работе [17]). Впоследствии они много раз допол-

⁸Известно, что главным мероприятием во время активной стадии аварии, которое должно было уменьшить все три вида опасности, стало сбрасывание в шахту реактора различных материалов.

Часть этих материалов (соединения бора, в частности B_4C) являлась нейтронными поглотителями и должны были обеспечить ядерную безопасность.

Часть (глина, песок, доломит) предназначалась для создания фильтрующего слоя и уменьшения радиационного выброса. Кроме того, доломит $(MgCa)(CO_3)_2$, попадая в область высоких температур, должен был разлагаться и образовывать двуокись углерода, которая могла обеспечить «газовое перекрытие» — лишить горящий графит кислорода.

Наконец, последняя часть (свинец), должна была принять на себя выделяющееся тепло, расплавиться и предотвратить развитие «китайского синдрома».

6 мая выброс из разрушенного реактора упал в тысячи раз и, казалось, что принятые меры достигли своей цели.

Однако исследования 1988–89 гг., которые проводились внутри объекта «Укрытия» Комплексной экспедицией при ИАЭ им. И.В. Курчатова, показали, что предположение о том, что падение выброса было связано с тем, что сброшенные материалы засыпали шахту реактора толстым слоем, не соответствовало действительности. В силу целого ряда причин только незначительная их часть попала по назначению.

Подробная оценка эффективности этого мероприятия дается в целом ряде работ (см., например, [15, 16]).

нялись и уточнялись как в работах советских, так и ряда зарубежных специалистов.

В таблице 1 приведено время выполнения этих работ, авторы и краткое описание применяемых методик.

С течением времени число используемых параметров увеличивалось. В заключительных работах были проведены расчеты накопления для каждой из 1659 сборок, находившихся в реакторе, с учетом неоднородности нейтронных полей в активной зоне.

Таблица 1. Работы советских специалистов, в которых производился расчет накопления радиоизотопов в активной зоне реактора 4-го блока ЧАЭС

№	Дата	Авторы, ссылка	Примечания
1	1986 г.	Боровой А.А. [17]	Расчеты велись сразу же после аварии, исходя из оценки среднего выгорания топлива в активной зоне. При этом возникают погрешности для радионуклидов, накопление которых нелинейно зависит от выгорания. Получены данные по накоплению 15 основных радионуклидов
2	1986 г.	Легасов В.А. и др. [18]	Использовались те же методы, что и в предыдущей работе. Получены данные по накоплению ~25 основных радионуклидов
3	1988 г.	Боровой А.А. и др. [19]	Результаты работы оформлены в виде справочника «Топливо 4-го энергоблока ЧАЭС». Все ТВС разбиты на 17 групп по степени выгорания. Расчеты накопления проведены для каждой из групп. Принятая средняя глубина выгорания — 10,9 МВт×сут./кг(U). В справочник вошли главы о тепловыделении топлива, об определении выгорания образцов по соотношению активностей радионуклидов, о полях излучений топливосодержащих материалов за различными защитами и т.п.
4	1990 г.	Бегичев С.Н. и др. [20].	Проведены расчеты накопления для каждой из 1659 сборок, находившихся в реакторе перед аварией, результаты суммировались
5	1991г.	Боровой А.А. и др. [21]	Проведены расчеты накопления для каждой из сборок с учетом неоднородности нейтронных полей в активной зоне реактора
6	1994г.	Боровой А.А. [22]	На основании всех приведенных выше работ и экспериментальных исследований по содержанию трансуранов в топливе 4-го блока ЧАЭС получены оцененные данные по накоплению радионуклидов

Следует отметить, что разброс результатов работ лежит в пределах ($\pm 15\%$).

Подробные таблицы содержания радионуклидов в топливе 4-го блока перед аварией приведены в обобщающих работах [11, 23 и др.]. Ниже они представлены в виде диаграмм на рис. 14 и 15.

Полученные данные позволили рассчитать временную динамику остаточного удельного тепловыделения и удельной активности ядерного топлива 4-го блока после аварии (рис. 16).

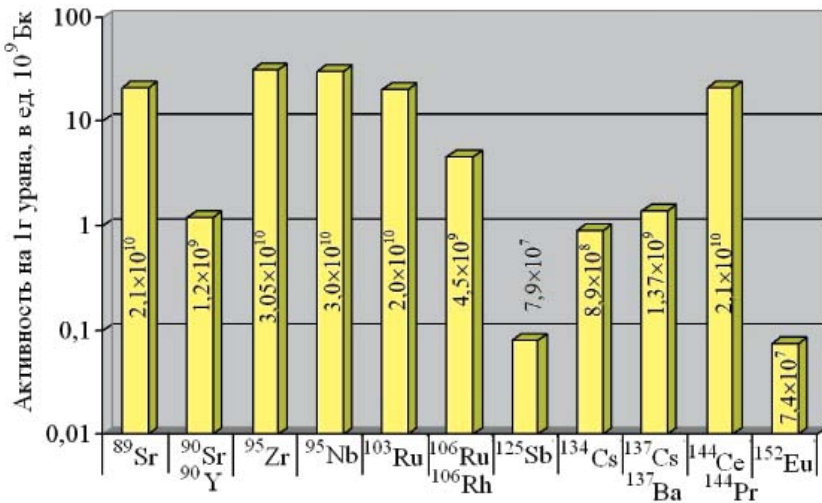


Рис. 14. Результаты расчетов активности основных β и γ радионуклидов в топливе 4-го блока (Бк/г U)

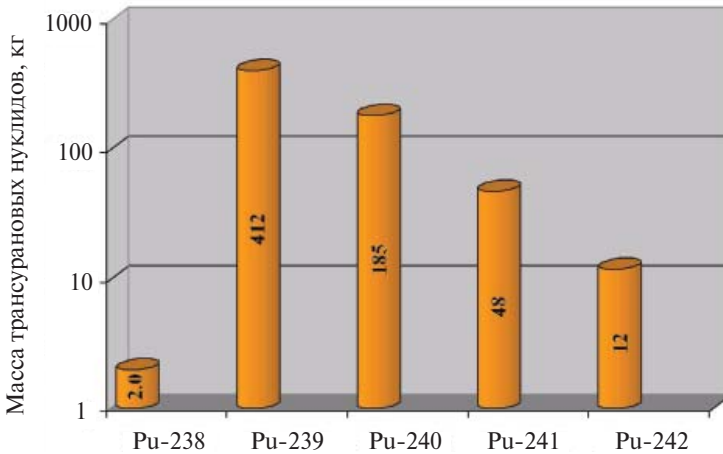


Рис. 15. Результаты расчетов массы трансуранов, накопленных в топливе 4-го блока

После того как в первые дни после аварии были сделаны достоверные измерения радиационных полей на площадке 4-го блока, их большие значения породили легенду о том, что из аварийного реактора выброшено почти все топливо.

Однако приведенные выше значения показывают, что в действительности, большие значения объясняются чрезвычайно высокой удельной активностью отработавшего топлива. Оценки показывали, что если на площадку Чернобыльской АЭС было бы выброшено равномерно всего 3% (или ~6 т по U) от полного количества топлива, то к 6-му мая средняя на этой площадке мощность дозы на 1 м от земли должна была составлять ~500 р/час.

В реальности из-за неравномерности загрязнений наблюдаемые мощности доз колебались от сотен миллирентген в час до тысяч рентген в час.

К сожалению, спекуляции обо всем выброшенном топливе оказались очень живучими.

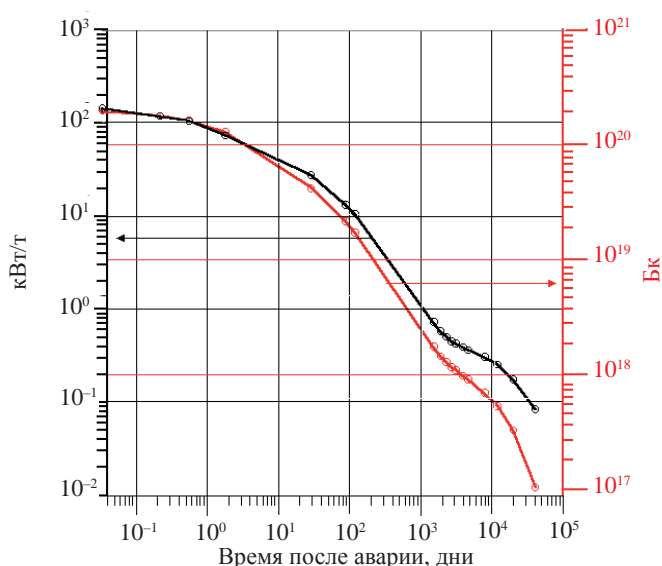


Рис. 16. Зависимость изменения удельного тепловыделения топлива 4-го энергоблока и его суммарной активности от времени, прошедшего после аварии

1.4.2. Оценки количества топлива, оставшегося в разрушенном блоке

Спектрометрические и радиохимические анализы аэрозолей, выброшенных во время активной стадии аварии (см. гл. 9), позволили сделать важный вывод:

выброс радиоактивности в окружающую среду происходил в составе частиц мелкодиспергированного топлива, за исключением легколетучих веществ — инертных газов, йода, цезия, теллура и др.

После этого были выработаны методы достаточно быстрого определения количества топлива, попавшего на почву. Эти методы уже неоднократно описывались, и мы отсылаем читателей, например, к работам [11] и [12].

Летом 1986 года «Курчатовский институт» представил в Правительственную комиссию предварительное распределение количества топлива, выброшенного на территорию. Согласно этому распределению в границах будущего объекта «Укрытие» осталось более 96% (или около 185т по урану) топлива, находившегося ранее в активной зоне реактора 4-го блока (см. рис. 17).

Выброс топливной компоненты составил по этим данным менее 4% этого топлива (в докладе советской делегации в МАГАТЭ приводилось значение 3,5% [18]).

Позднее, после исследований десятков тысяч проб почвы и многолетних поисков и исследований скоплений топлива в объекте «Укрытие», был сделан вывод о том, что **«на основании совокупности данных можно утверждать, что более 95%, т.е. более 180 т облученного топлива из разрушенной активной зоны реактора находится в объекте «Укрытие» [23].**

Что касается таких радиологически опасных летучих радионуклидов, как ^{137}Cs и ^{134}Cs , то их выброс за пределы объекта «Укрытие» составил $(33 \pm 10)\%$ от накопленного в активной зоне перед аварией количества.

Оценка выброса йода имеет крайне плохую точность, рекомендуемое значение — $(50\text{--}60)\%$ [24].

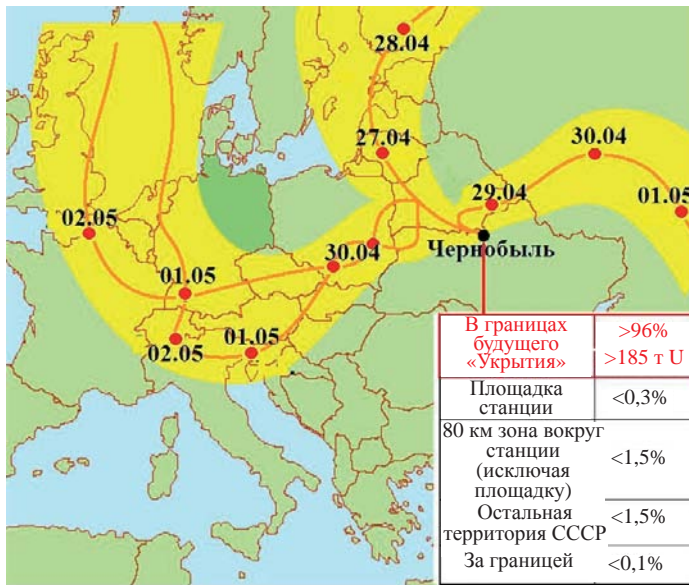


Рис. 17. Оценки выброса топлива при аварии на ЧАЭС. «Курчатовский институт» 1986 г. (Цифры у красных точек на карте — время прихода радиоактивного облака)

1.5. Первые попытки найти скопления ядерного топлива в блоке после аварии

В этом разделе мы будем следовать работе [12].

Огромные радиационные поля и разрушения препятствовали проникновению в разрушенный блок и выяснению вопросов о локализации и состоянии топлива. Поэтому первые исследования проводились на периферии блока, но и они представляли значительные трудности и часто приводили к неверным выводам. «Так, в первые недели считали, что чуть ли не основная масса топлива попала в машинный (генераторный) зал. Тогда для «топографической» съемки (в КИ и в «Радиовом институте») были быстро сконструированы и изготовлены детекторы со свинцовыми коллиматорами. Установленные на вертолетных подвесках (рис. 18), они дали возможность получить карту радиоактивных источников над развалом реактора, площадкой станции и крышах зданий.

Выяснилось, в частности, что топлива в машинном зале практически нет - в основном оно находится в здании реактора» [25] (см. также [26] и [27])⁹.

⁹В исследованиях РИ съемка велась с вертолета Ми-8Т, проделавшего 12 проходов вдоль зданий ЧАЭС через каждые 25 метров по координате север — юг. Сканирование поверхности проводилось коллимированным детектором с кристаллом NaI(Tl) с высоты 200 м. Свинцовый коллиматор обеспечивал поле обзора на поверхности земли около 30 м в диаметре. Первоначальная калибровка была проведена при зависании вертолета над участком загрязненной территории вне промплощадки, где содержание радионуклидов и МЭД были хорошо измерены [27].

В ходе работы КИ (по близкой методике) с помощью специального экранированного дозиметра на вертолете Ка-27М были сняты картограммы полей МЭД зоны реактора, северного и южного барабанов-сепараторов, деаэрационной этажерки, а также зон машинного зала, площадки блока и т.п. Было проведено около 2000 измерений участков поверхности площадью от 10×10 м² до 20×20 м² [26].

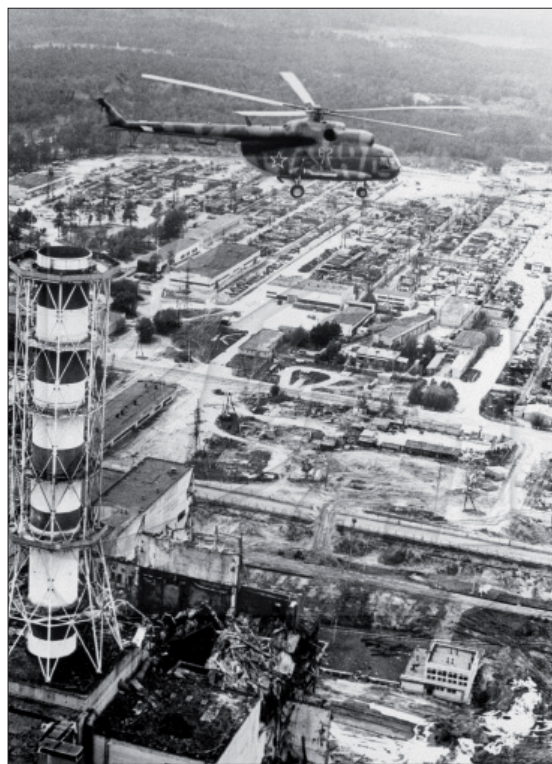


Рис. 18. Вертолет над ЧАЭС

В мае специалисты КИ пытались измерить температурные поля в шахте реактора, опуская с вертолета термопару на стальном тросе ~200 м длиной, утяжеленным свинцовыми болванками, а позднее с помощью фотосканирующего термометра, но полученная информация не позволяла сделать какие-либо выводы о поведении топлива в блоке.

Делались попытки проникнуть внутрь блока и приблизиться к помещениям, в которых находились скопления ТСМ.

Вспоминает сотрудник КИ: «Мы искали топливо. Искали расплавы свинца. Расплавы вертолетной засыпки. И не находили. Радиационный фон в тысячи Р/ч фиксировали на всех подступах к шахте реактора — и снизу, и сверху, и сбоку, а что-то материальное, видимое, что можно было бы счесть топливом, не находили. Впервые источник повышенного гамма-излучения (>3000 Р/ч) был обнаружен в июне 1986 г., когда проводились измерения гамма-полей с помощью прибора «Киржач-3» из помещения 017/2 на нижней отметке 0 м, где гамма-поле было ~25 Р/ч... Прибор мог измерять мощность дозы до 3000 Р/ч. При его подъеме до отметки 6,0 м прибор зашкалил и вышел из строя. Это позволило предположить, что наверху, в помещении 217/2, находится очень сильный источник излучения. Может быть, там топливо? Позже выяснилось, что там застыл передний фронт растекавшегося топливосодержащего расплава, его стали называть «слоновья нога» [28].

Тем не менее специалисты КИ, РИ и др. не прекращали усилия по проникновению во внутренние помещения «Укрытия». Постепенно поэтажный план разрушенного блока стал украшаться цветными отметками — зеленым цветом отмечались помещения с МЭД менее 1 Р/ч, желтыми — от 1 Р/ч до 10 Р/ч,

красными — от 10 Р/ч до 100 Р/ч и, наконец, коричневыми — свыше 100 Р/ч.

«В результате такой обработки удалось решить несколько задач. Прежде всего были определены зоны с высокой радиоактивностью, где, вероятно, находятся топливосодержащие массы, которые необходимо обследовать для сведения топливного баланса и определения потенциальных опасностей. Эти данные совместно с другими были использованы для создания моделей расположения остатков топлива по помещениям разрушенного здания и ведения расчетных исследований» [29].

В мае-июне по предложению КИ была проведена работа по радиационной диагностике помещений блока с использованием сохранившихся после аварии обезвоженных трубопроводов. Эти трубопроводы послужили каналами доставки измерительных приборов, обеспечивая проникновение сквозь завалы и высокие дозовые поля.

Удобными оказались сливной коллектор СУЗ, проходящий по периметру нижней части сх. «ОР» и напорный коллектор СУЗ, проходящий вертикально в стене вдоль всей шахты реактора по оси «Л» Измерения выполнялись различными типами детекторов и позволили получить важную информацию о наличии высокоактивных источников и их расположения.

Впервые в качестве основного места скопления ТСМ было названо подаппаратное пом. 305/2 [30].

Осенью 1986 г. это подтвердили тепловые измерения. Сотрудникам оперативной группы КИ удалось проникнуть в пом. 213/2 и установить ряд датчиков температуры и теплового потока на поверхности и в глубине его западной стены.

Температура на поверхности изменялась от 40 °С до 60 °С, а в стене, в скважине, идущей под углом вверх (по направлению к подаппаратному пом. 305/2) достигала 150 °С. Картина распределения тепловых потоков приведена на рис. 19.

Все эти данные указывали на значительное скопление топлива в помещениях, находящихся выше и западнее пом. 213/2, т.е. в районе пом. 305/2.

В дальнейшем, после создания «Укрытия» тепловые измерения в нем были продолжены и сыграли важную роль в исследованиях ТСМ во внутренних помещениях объекта.

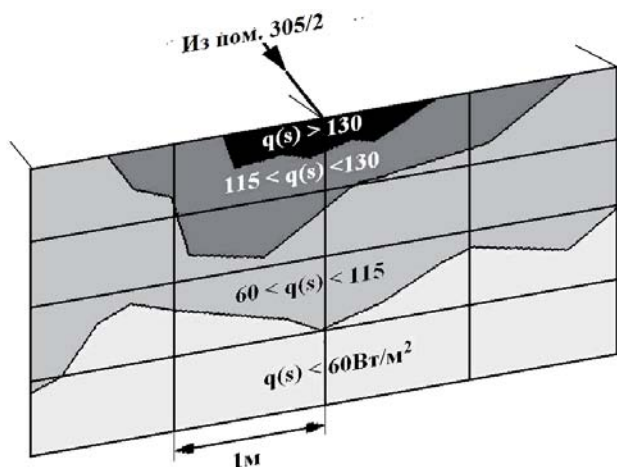


Рис. 19. Распределение плотности тепловых потоков на западной стене пом. 213/2

1.6. Тепловая опасность

1.6.1. Расчеты и эксперименты специалистов «Курчатовского института» (см. [11])

Какие меры были приняты Правительственной комиссией для того, чтобы оценить опасность теплового разрушения или плавления строительных конструкций ядерным топливом, оставшимся в шахте реактора 4-го блока, и разработать меры против возникновения «Китайского синдрома»?

Перед коллективом специалистов филиала «Курчатовского института» была поставлена задача: в кратчайшие сроки определить насколько реальна эта опасность.

«Существует ли опасность теплового разрушения или плавления строительных конструкций ядерным топливом, оставшимся в шахте реактора 4-го блока ЧАЭС, и возможно ли таким образом проникновение больших массивов высокорadioактивного топлива в грунт и грунтовые воды? Если да, то какие меры необходимо принять, чтобы с гарантией предотвратить попадание топлива в грунт?» [15].

В отличие от США, которые после аварии на АЭС «Три Майл Айленд» стали проводить масштабные экспериментальные и расчетно-теоретические исследования тяжелых аварий с разрушением активной зоны реактора, в Советском Союзе таких исследований не проводилось.

Мировой опыт, в частности созданный в США комплекс программ STCR, был недоступен по многим причинам, в том числе из-за режима секретности, установленного для работ по ЛПА на ЧАЭС. При этом последующее детальное знакомство с комплексом STCR, изначально предназначенного для моделирования тяжелых аварий с разрушением корпуса водо-водяного реактора, показало, что модели, заложенные в этот комплекс, не охватывали сценариев и процессов, характерных для аварий на ЧАЭС.

Еще раз отметим, что в первых числах мая 1986 года практически отсутствовали какие-либо достоверные данные о состоянии реактора и ядерного топлива. В частности, неизвестны были результаты сброса тысяч тонн песка, свинца и других материалов в шахту реактора.

Также неизвестны были данные о состоянии металлоконструкций и графитовой кладки. Отсутствовали какая-либо достоверная информация о процессах горения графита и выхода продуктов деления из топливной матрицы. Интенсивность этих процессов, в том числе с учетом эффекта Вигнера и возможного горения циркония, в значительной мере влияла на общее тепловыделение.

В этих условиях было особенно сложно с необходимой полнотой и достоверностью промоделировать поведение топлива и его взаимодействие с окружающими материалами, строительными и металлоконструкциями.

Учитывая вышесказанное, группа теоретиков приступила к разработке сценариев и теоретических моделей поведения топлива и исходных постановок для расчетного моделирования.

Для разработки расчетных программ были созданы две группы математиков-вычислителей, которые независимо вели параллельные расчеты по различным программам на ЭВМ ЕС-1060 и БЭСМ-6. Сравнение результатов расчетов независимых групп позволяло быстро находить неизбежные в условиях крайне ограниченного времени ошибки программирования.

В течение нескольких дней были разработаны базовые теоретические модели поведения плоских слоев, шаровых и цилиндрических фрагментов топливосодержащих масс.

Были проведены оценки критических размеров скоплений топлива, способных проплавлять строительные конструкции в различных условиях. На их основе были созданы компьютерные программы для одно-, двух- и трехмерного расчетного моделирования взаимодействия топливосодержащих масс с окружающими материалами и их движения.

Были оценены характерные скорости перемещения топливосодержащих масс при различных предположениях о выходе продуктов деления из таблеток двуокиси урана и соответственно удельном объемном тепловыделении в топливосодержащих массах, их различных размерах и условиях теплосъема со свободных поверхностей за счет теплового излучения и конвективного съема тепла воздушными потоками.

За считанные дни удалось проанализировать различные системы, предлагавшиеся для удержания топлива, и провести расчетно-теоретическое обоснование системы гарантированного удержания расплава топлива с помощью специальной плиты-ловушки, охлаждаемой водой.

Разработанные за короткое время физические модели и пакеты программ требовали объективной экспериментальной проверки хотя бы на качественном уровне. Поэтому одновременно с созданием программ и проведением расчетов началось экспериментальное моделирование движения источников тепла в различных средах.

В экспериментах топливо имитировали полые металлические цилиндры, разогревавшиеся излучением технологического CO_2 -лазера и начинавшие проплавлять песок или бетон, и опускаться в их расплаве. Динамика их движения и измеренные термодатчиками значения температур сравнивались с результатами расчетов.

Одновременно были поставлены эксперименты по исследованию взаимодействия необлученных таблеток двуокиси урана с расплавами бетонов, создаваемых лазерным излучением.

В последующем более детальные исследования взаимодействия двуокиси урана с расплавами, в том числе магнезитового бетона и песка были проведены в Институте металлофизики Украинской академии наук, под руководством академика В.Г. Барьяхтара. В частности, изучались процессы растворения таблеток двуокиси урана в расплавах бетона и песка, важные для определения условий и температур растворения таблеток урана в расплавах различного состава. Эти процессы существенно влияли на возможные значения объемного тепловыделения за счет распада продуктов деления, оставшихся в топливе, и формирования тепловых характеристик, образующихся в результате взаимодействия двуокиси урана со строительными конструкциями топливосодержащих масс.

Таким образом в течение первых дней на основе теоретических оценок и результатов численного моделирования были получены основные выводы, сформулированные следующим образом.

- Велика вероятность того, что в результате происходящих процессов будет проплавлена нижняя биологическая защита реактора (сх. «ОР») (см. рис. 20).
- При выходе топливосодержащих масс в подреакторные помещения (пом. 305/2, ПРК, ББ) наиболее вероятен сценарий их останова и затвердения за

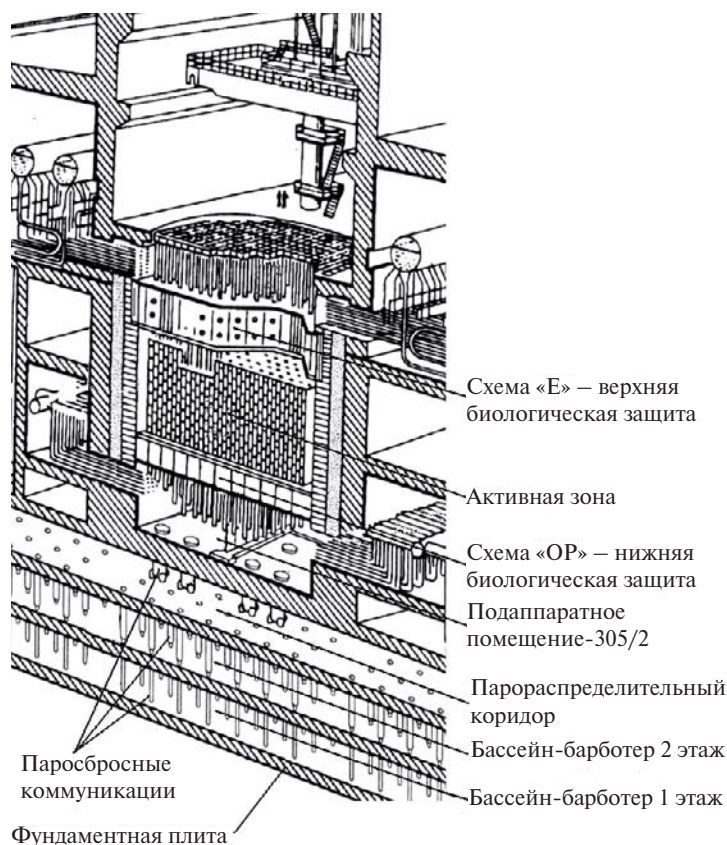


Рис. 20. Схематический разрез центральной части 4-го блока

счет растекания и охлаждения собственным тепловым излучением с поверхности.

- Предложенный ранее способ остановки расплава с помощью заливки помещений бассейна-барботера бетоном, может не помочь, а даже ухудшить ситуацию. Расчеты показывали, что в этом случае топливо, дойдя по паросбросным трубам до первого этажа бассейна-барботера и попав на фундаментную плиту, уже не будет эффективно охлаждаться сверху (путем излучения) и с большой вероятностью проплавит эту плиту.

- Наряду с процессами растекания и затвердевания топливосодержащих масс, фрагменты с характерными размерами 20–30 см и более, расположенные на расстояниях, сравнимых с их размерами, в результате взаимного теплового влияния могут сливаться и двигаться вниз, проплавляя подстилающие конструкции. Повторное движение затвердевших в результате растекания топливных масс возможно в результате закрытия их свободной поверхности в случае обрушения поврежденных строительных конструкций, в том числе за счет прогрева остаточным тепловыделением топливосодержащих масс или их заливки свежим бетоном в процессе строительства саркофага.

На основе расчетных оценок для различных сценариев поведения ТСМ с варьированием параметров в диапазоне их неопределенностей, был сделан вывод о маловероятном, но принципиально возможном сценарии проникновения топлива в нижние помещения бассейна-барботера и их попадании на фундаментную плиту 4-го блока.

Исходя из этого, была сделана рекомендация о необходимости сооружения подфундаментной водоохлаждаемой плиты — ловушки для расплава топлива.

В начале мая на своем заседании Правительственная Комиссия рассмотрела различные предложения по предотвращению загрязнения грунтовых вод.

В основном обсуждались три способа остановки раскаленного ядерное топлива:

- проложить под фундаментом реакторного отделения трубопроводы, охлаждаемые жидким азотом;
- закачать в подреакторное пространство (в бассейн-барботер) бетон на магнезитовой основе, обладающей повышенной теплопроводностью;
- соорудить водоохлаждаемую подфундаментную плиту.

Был принят третий вариант, опирающийся на расчеты плиты-ловушки, выполненные в филиале «Курчатовского института». Ее сооружение было поручено Минуглепрому, Минсредмашу и Минэнерго СССР.

1.6.2. Сооружение подфундаментной плиты

Работы по созданию защитной плиты были начаты уже 3 мая 1986 года. В этот день на ЧАЭС приехала первая группа горняков. Всего в прокладке туннеля под реактор, а также в извлечении грунта из-под реактора, принимало участие 388 шахтеров. Из Донбасса прибыли 234 и 154 горняка — из московского угольного бассейна.

Эти люди выполнили уникальные работы в чрезвычайно опасных условиях. Была пробита штольня под фундаментом 4-го энергоблока диаметром 1,8 метра. Был создан 136-метровый тоннель, по которому проведены коммуникации и железнодорожные рельсы [31]. Конструкция плиты имела размеры в плане $\sim 30 \times 30$ м и толщину $\sim 2,5$ м.

В средней части плиты были расположены трубы водяного охлаждения диаметром 100 мм (см. рис. 21). Над трубами охлаждения предусмотрено защитное покрытие из графитовых плит. Кроме этого в теле плиты предусмотрены датчики для обеспечения контроля за температурным режимом системы охлаждения.

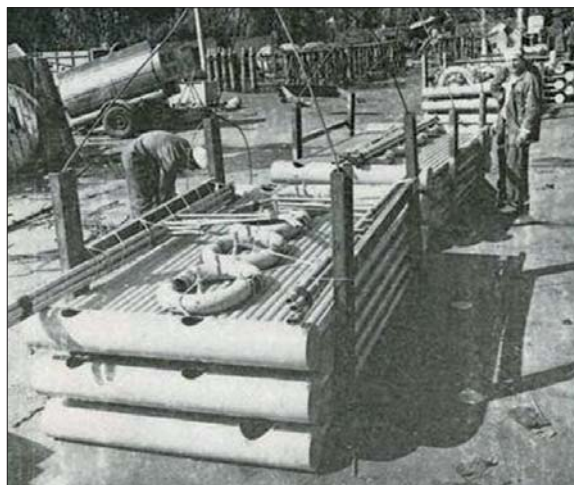


Рис. 21. Подготовка теплообменников для подфундаментной плиты

Для обеспечения нормальных условий производства подземных работ в крайне стесненных условиях и с повышенным тепловыделением были разработаны специальные схемы вентиляции и охлаждения воздуха.

Была обеспечена максимально безопасная на этот момент доставка шахтеров к месту работы. Персонал обеспечен индивидуальными средствами защиты.

Тем не менее работа проходила в предельно тяжелых условиях, в том числе и радиационных. Шахтеры работали круглосуточно в восемь трехчасовых смен.

Полностью сооружение подфундаментной плиты под реактором было, благодаря поистине героической работе шахтеров, инженеров, вспомогательного персонала, завершено 28 июня. Но уже через несколько недель данные разведывательных групп показали, что проплавление подреакторных перекрытий либо развивается достаточно медленно, либо вообще приостановилось.

1.6.3. Что предотвратило развитие «Китайского синдрома»

Должно было пройти 2 года напряженных исследований, чтобы сотрудники Комплексной экспедиции сумели восстановить общую картину распространения топливной лавы в 4-ом блоке. И еще около двух десятилетий, чтобы создать модель протекания аварийных процессов — образования лавы и ее растекания. Об этом будет более подробно рассказано в следующих разделах (см. также [32, 33]). Согласно этой модели после того, как значительная часть тепловой энергии топлива была истрачена на расплавление материалов схемы «ОР»¹⁰, опасность прожога существовала только для бетонной плиты перекрытия между пом. 305/2 и ПРК. Наблюдения подтверждали, что эта опасность частично реализовалась. Вот что отмечается при обследовании потолка ПРК в пом. 210/6 (см. [34]).

В районе ряда «И», над средним конденсатором металлическая облицовка стального потолка имеет разрыв по сварному шву, из которого вытекала стеклообразная масса (в сторону оси 47), длина разрыва (1–1,5) м, облицовка в этом месте провисла на 20–30 см.

Металлическая облицовка потолка над 3-м и 4-м клапанами провисла, кремнийорганическая краска плакировки стены, расположенной напротив 2-го патрубка обгорела. Сами клапаны опустились примерно на 20 см ниже штатного положения.

Более полные данные по распространению лавы в пом. 305/2 и прожиганию опорной плиты см. в [34]. На рис. 22 приведен фрагмент разреза блока по ряду «К».

Красным цветом показано положение скопления лавы согласно модели. Видно проникновение лавы в бетон плиты перекрытия и стены.

Иллюстрацией начавшегося, но не развившегося процесса прожигания (проплавления) может служить и частичный прожег клапана в ПРК (рис. 23).

¹⁰Была расплавлена ~1/4 часть схемы «ОР» и ее материалы вошли в состав лавы.

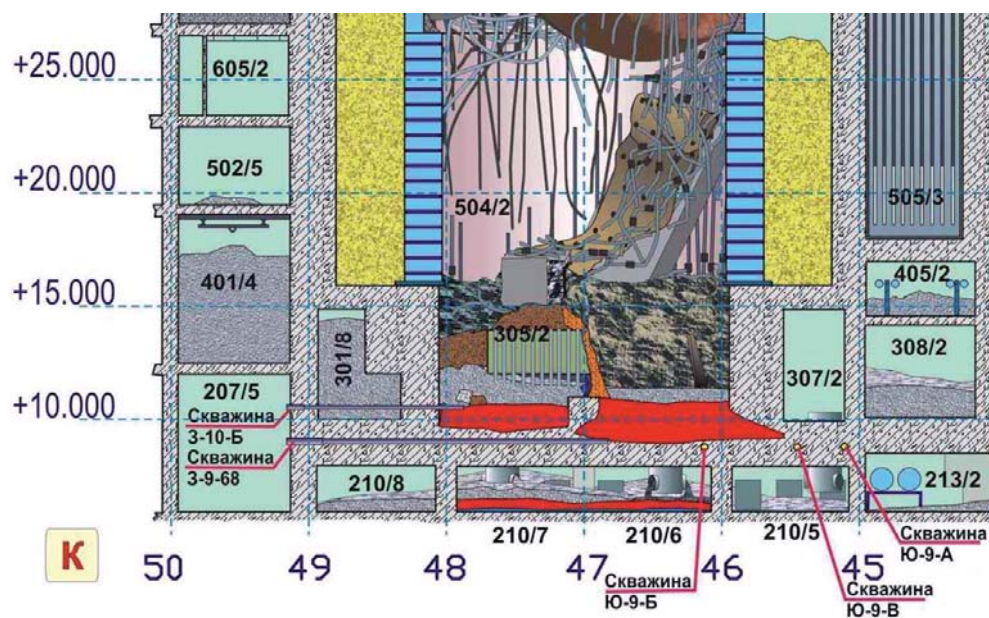


Рис. 22. Фрагмент разреза 4-го блока по ряду «К»



Рис. 23. Проплавление левой металла клапана ПРК

Подводя итоги, можно сказать, что, с точки зрения знаний сегодняшнего дня, сложные мероприятия по предотвращению проплавления перекрытий блока и попаданию топлива в грунтовые воды представляются излишними.

Но при этом надо понимать, что именно сложившаяся после взрывов геометрия разрушений «спасла» блок от катастрофического развития «китайского синдрома».

Если бы при образовании лавы и ее движении вниз на пути раскаленных масс не оказалась отколотая четверть схемы «ОР» и путь через паросбросные клапана был бы открыт, строительство подреакторной плиты могло оказаться совершенно необходимым.

В результате чернобыльская авария послужила еще одним толчком (первым была авария на АЭС «Три Майл Айленд»), который подтолкнул проектировщиков атомных станций к сооружению специальных устройств локализации расплава.

Эти устройства (их часто называют ловушками) предназначены для локализации и охлаждения расплава при тяжелых авариях, связанных с плавлением и разрушением активной зоны и корпуса реактора.

Первое в мировой практике устройств локализации расплава было реализовано на двух блоках Тяньваньской АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1000 (г. Ляньюньган КНР) по проекту Санкт-Петербургского института «Атомэнергопроект».

ЛИТЕРАТУРА

1. Возняк В.Я., Троицкий С.Н. Непредвиденный удар. Сборник «Чернобыль: катастрофа, подвиг, уроки и выводы». Интер-Весы, Москва, 1996 г., с. 76–94.
2. Чернобыль. События и уроки. Сразу же после аварии. <http://bluesbag6.narod.ru/index25.html>.
3. Ретроспективная дозиметрия участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, «Седа-Стиль», Киев 1996 г.
4. Инженерная машина разграждения (ИМР-2) в Чернобыле. <http://www.chornobyl.in.ua/imr.htm>.
5. Наука Чернобылю. Сборник «Чернобыль: катастрофа, подвиг, уроки и выводы». Интер-Весы, Москва, 1996 г., с. 217–237.
6. Роботы при ликвидации аварии на ЧАЭС. <http://pripyat-city.ru/documents/27-roboty-pri-likvidacii-avarii-na-chaes.html>.
7. Юревич Е.И. Авария на Чернобыльской АЭС и экстремальная робототехника. Мехатроника, автоматизация, управление. № 3, 2004. <http://www.rtc.ru/publication/chernob-rob.shtml>.
8. Отчет о состоянии физических параметров «Укрытия» к моменту завершения основных строительных работ. Отчет оперативной группы ИАЭ им. И.В. Курчатова, ответственные исполнители: Авдюшин С.И., Боровой А.А., Дубасов Ю.В. и др., № 11-04 от 28.10.86 г., Чернобыль, 10 с.
9. Легасов В.А. Мой долг рассказать об этом. Энергия. № 9, 1996. с. 41–49.
10. Боровой А.А. Мой Чернобыль. Новый мир № 3, 1996 г., с. 132–180.
11. 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.
12. Боровой А.А., Велихов Е.П. К 25-летию аварии на Чернобыльской АЭС. Работы «Курчатовского института» по ликвидации последствий аварии. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2011 г., 129 с.
13. Бурлаков Е.В., Занков Ю.Н., Кватор В.М. О возможности возникновения СЦР после аварии. Докладная записка руководству ИАЭ им. И.В. Курчатова. Рукопись. Москва, 07.05.86 г., 5 стр.

14. Richard K. McCardella, Malcolm L. Russella, Douglas W. Akersa and Charles S. Olsena. Summary of TMI-2 core sample examinations. Nuclear Engineering and Design. Volume 118, Issue 3, April 1990, p. 441–449.
15. Арутюнян Р.В. «Китайский синдром». Природа №11, 1990 г.
16. Боровой А.А., Пазухин Э.М., Стрижов В.Ф. Эффективность мер по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС (активная стадия аварии). Препринт РНЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6471/11, Москва, 2007г., 38 с.
17. Borovoi A.A. Post - Accident Management of Destroyed Fuel from Chernobyl IAEA. Analytical Report. Work Material, 1990. p. 1–99.
18. 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.
19. Боровой А.А., Довбенко А.А., Строганов А.А. и др. Топливо 4-го энергоблока ЧАЭС. Справочник. Отчет КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова, Чернобыль, 1988, 132 с.
20. Бегичев С.Н., Боровой А.А., Бурлаков Е.В. и др. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС. Краткий справочник. Препринт Института атомной энергии 5268/3, 1990 г., 21 с.
21. Боровой А.А., Довбенко А.А., Смолянкина М.В., Строганов А.А. Определение ядерно-физических характеристик топлива 4-го энергоблока ЧАЭС. Отчет ИБРАЭ АН СССР. Инв. № 52/11-20, Москва, 1991, 140 с.
22. Боровой А.А. Оцененные данные по накоплению радионуклидов в активной зоне реактора 4-го блока ЧАЭС перед аварией. Отчет МНТЦ «Укрытие», инв. № 2765, Чернобыль, 1994, 14 с.
23. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отв. Исполнитель Боровой А.А. Отчет МНТЦ «Укрытие», арх. № 3836, 2001г. Чернобыль, 337 с.
24. Боровой А.А., Гагаринский А.Ю. Выброс радионуклидов из разрушенного блока Чернобыльской АЭС. Атомная энергия, 2001, т. 90, вып. 2, с. 137–145.
25. Беляев С.Т. Ликвидация последствий чернобыльской катастрофы. Природа № 11 1990 г.
26. Лебедев В.И., Скаткин В.М., Эрлих И.А. Справка по результатам измерений полей гамма-излучений основного источника и площадей к нему примыкающих, с помощью вертолетного комплекса Ка-32Ч. Отчет. Инв. № 11-04 от 12.06.86 г., 4 с.
27. 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.
28. Чечеров К.П. Немирный атом Чернобыля. Человек. № 6 2006 г., с. 96–107.
29. Шикалов В.Ф. Обзор работ по диагностическому обследованию аварийного блока ЧАЭС в 1986 году. Препринт РНЦ «Курчатовский институт». ИАЭ-5913/5. Москва-1995, 23 с.
30. Письменный В.Д., Адамов Е.О., Шикалов В.Ф., Мительман М.Г., Васильев К.Г. Контроль и диагностика в период ликвидации аварии на 4-м блоке ЧАЭС. Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова. № 129/ч-70 от 7 августа 1986 г. Чернобыль.
31. Устройство плиты под разрушенным реактором. <http://chornobyl.in.ua/licvidacia-avarii.html>.

32. Bogatov S., Borovoi A., Gavrilov S. et. all. Half an hour after the beginning of the accident. OKPRINT, Москва, 2005, 22 с.
33. Богатов С.А., Боровой А.А., Лагуненко А.С. и др. Образование и растекание чернобыльских лав. Радиохимия т. 50, вып. 6, 2008, с. 565–568.
34. Богатов С.А., Боровой А.А., Гаврилов С.Л. 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 от 01.02.2007 г., 146 с.

2. СОЗДАНИЕ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

2.1. Строительство «Укрытия»

Решение о долговременной консервации 4-го блока с целью предотвращения выхода радионуклидов в окружающую среду и уменьшения воздействия проникающей радиации на площадке ЧАЭС было принято ПК в середине мая 1986 г.

А в конце мая и начале июня вышли постановления ЦК КПСС и СМ СССР регламентирующие эту работу¹.

Обоснование выбора конструкции будущего «Укрытия», обсуждение чисто строительных вопросов, в том числе оптимальности типов отдельных конструкций, технологии их монтажа и т.п., выходит за рамки настоящей работы.

Все это описано в целом ряде статей (см., например, [1 – 5] и ссылки в них).

Отметим только, что во время строительства многие проектные и технические решения принимались и изменялись на основе вновь получаемой информации и возможностей скорейших поставок материалов и оборудования.

Обычно выделяют 8 этапов строительства объекта.

1 этап — очистка и бетонирование территории вокруг 4-го блока.

2 этап — возведение защитных (пионерных) стен по периметру.

3 этап — выполнение разделительных стен между 4 и 3-м блоками.

4 этап — возведение каскадной стены.

5 этап — выполнение покрытия машзала.

6 этап — монтаж высотной контрфорсной стены.

7 этап — выполнение опор и монтаж покрытия реакторного блока.

8 этап — монтаж вентиляционных систем и контрольно-измерительных коммуникаций и приборов.

Кратко остановимся на этих этапах.

¹Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР 634-188 от 29.05.86 г. Министерству среднего машиностроения СССР были поручены «работы по захоронению 4-го энергоблока ЧАЭС и относящихся к нему сооружений». Объект получил название «Укрытие 4-го блока ЧАЭС».

Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР № 663-194 от 05.06.86 г. ВНИПИЭТ были поручены функции генерального проектировщика «по захоронению 4-го блока ЧАЭС, по захоронению радиоактивных отходов и дезактивации оборудования промплощадки ЧАЭС». Научное руководство работами было возложено на ИАЭ им. И.В. Курчатова.

В Минсредмаше для решения всех вопросов управления и руководства работами по консервации 4-го энергоблока был создан «Штаб по Чернобыльской АЭС» и создана специальная генеральная подрядная строительная организация — УС-605. В кратчайший срок были построены объекты обеспечения: базы снабжения, базы по обслуживанию автотранспорта и строительной техники, заводы по приготовлению бетонной смеси, пункты принятия и разгрузки строительных материалов и др.

После проведения первых работ по очистке территории вокруг блока началось возведение по периметру 4-го энергоблока «пионерных» защитных стен из железобетона.

Их высота составляла около 6 метров со стороны завала (северная сторона блока) и около 8 метров с южной и западной сторон.

«Пионерные» защитные стены позволили относительно безопасно доставить необходимую технику и начать строительно-монтажные работы по сооружению «Укрытия».

Внутри здания первыми шагами при строительстве «Укрытия» стало возведение перегородок и стен, отделяющих поврежденный 4-й блок от 3-го блока (рис. 1), так называемой «разделительной стены».

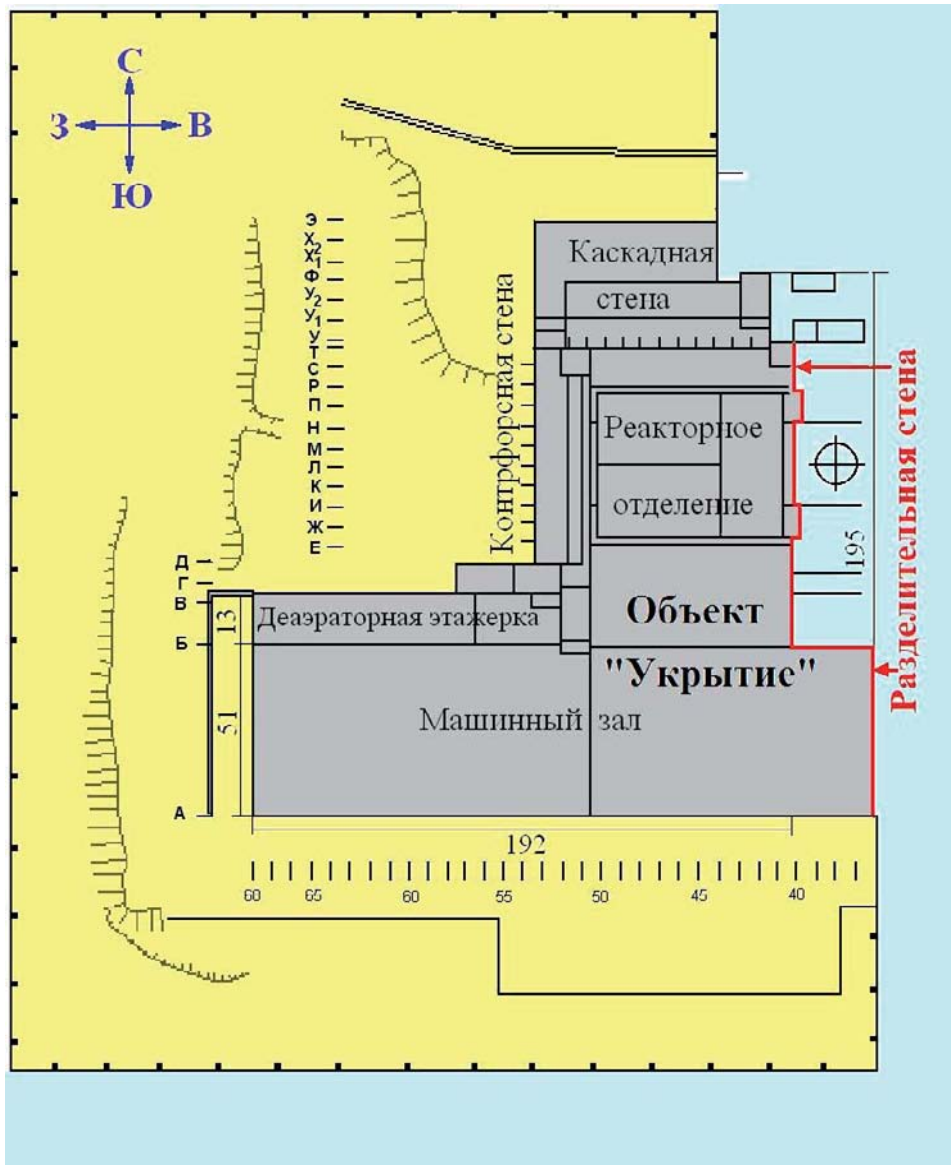


Рис. 1. Объект «Укрытие» и разделительная стена между 3 и 4-м блоками

Каскадная стена

Северная каскадная стена (на рис. 2) была выполнена из бетона в виде уступов высотой около 12 метров.

Опалубка уступов изготовлялась из металлических щитов. Каждый последующий уступ выполнялся с возможно большим приближением к разрушенному блоку.

Внутри уступов укладывались изношенные и поврежденные металлоконструкции, а также контейнеры с высокоактивными отходами.

Контрфорсная стена

Сохранившаяся западная стена снаружи закрыта стеной с контрфорсами высотой до 50 метров (по оси 51) (рис. 3).

Для создания покрытия над центральным залом реактора и деаэрационной этажеркой необходимо было найти опоры для установки новых несущих конструкций. При этом расстояния между опорами не должны были превышать

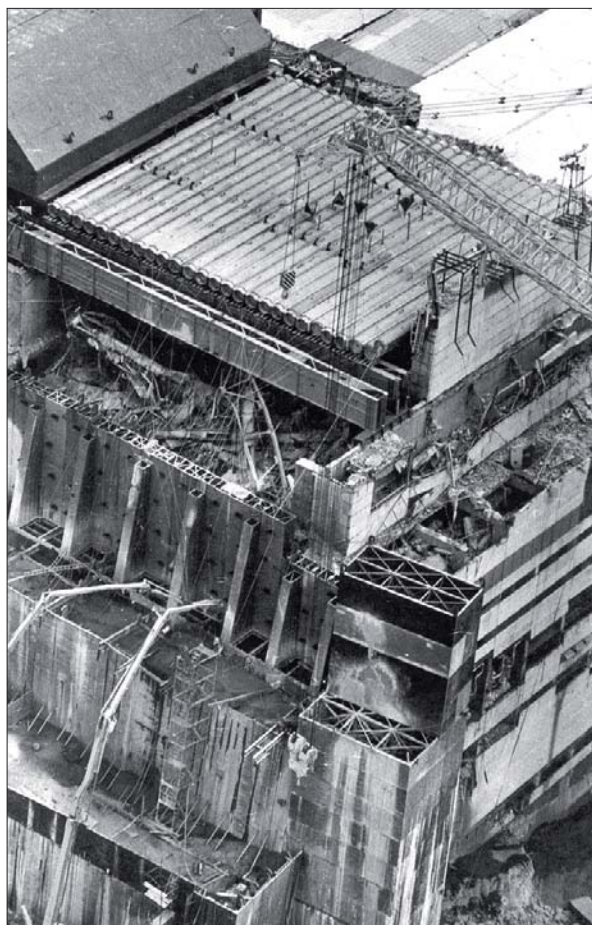


Рис. 2. Строительство «Укрытия». Идет заливка бетоном уступов каскадной стены с помощью специальной дистанционной техники. Центральный зал перекрыт трубным накатом, лежащем на балках Б1 и Б2



Рис. 3. Западная контрфорсная стена

предельных размеров, обеспечивающих монтаж покрытия подъемным краном «Демаг».

После исследований сохранившихся конструкций были приняты следующие решения по устройству покрытия над центральным залом реактора и деаэраторной этажеркой.

Для опирания главных балок Б1 и Б2 (на рис. 4), установленных по рядам П и Ж, выбраны на западе остатки железобетонной стены по оси 50 толщиной около 0,9 м и железобетонные выхлопные шахты у осей 43-44, сохранившиеся

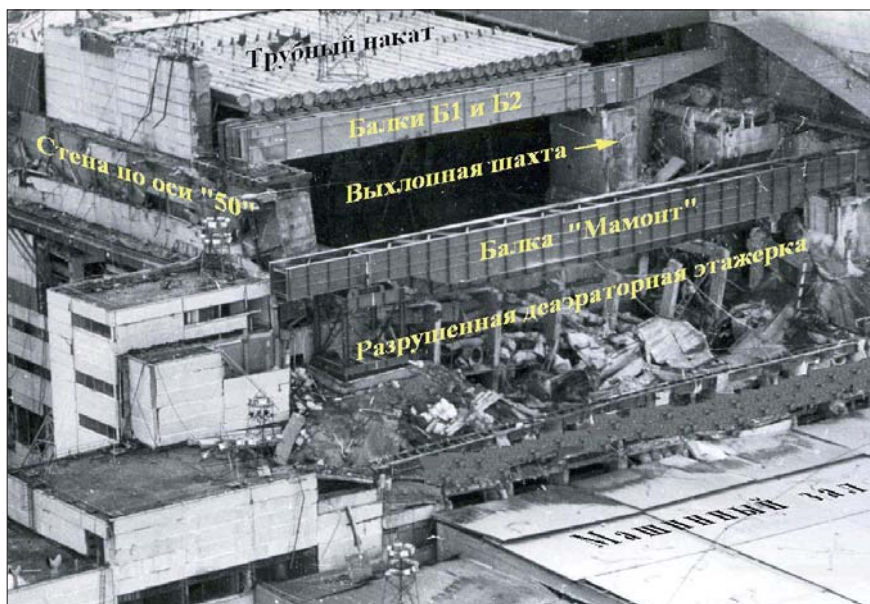


Рис. 4. Основные балки, поддерживающие кровлю «Укрытия» и трубный накат

после взрыва. На балки Б1 и Б2 был уложен трубный накат – 27 металлических труб диаметром 1220 мм, длиной 34,5 м (рис. 4), а над трубами устроена кровля из профилированного настила – 6 пространственных блоков.

Опорой для стальных щитов по южной стороне служит установленная по ряду В стальная балка «Мамонт», опирающаяся в свою очередь на бетонные опоры у осей 41 и 51 (рис. 4).

Опоры были выполнены на завале из разрушенных железобетонных конструкций перекрытий двух верхних этажей, обломков оборудования и трубопроводов. Для обеспечения большей надежности основания опор было произведено заполнение завала бетоном.

Для перекрытия участка блока между осями 40–50 в рядах Б–В по ряду Б с опорой на заваленные разрушенными конструкциями перекрытие запроектирована и выполнена балка – короб («Осьминог»), являющаяся распределительной конструкцией.

Общая схема строительных конструкций «Укрытия» приведена на рис. 5. На рис. 6 показан вид «Укрытия» сверху.

2.2. Исследования разрушенного блока во время строительства «Укрытия»

Все время пока строился объект «Укрытие» «Курчатовский институт», выполняя свою роль научного руководителя созданием этого объекта, продолжал исследования разрушенного 4-го блока. Эти исследования прежде всего имели своей целью:

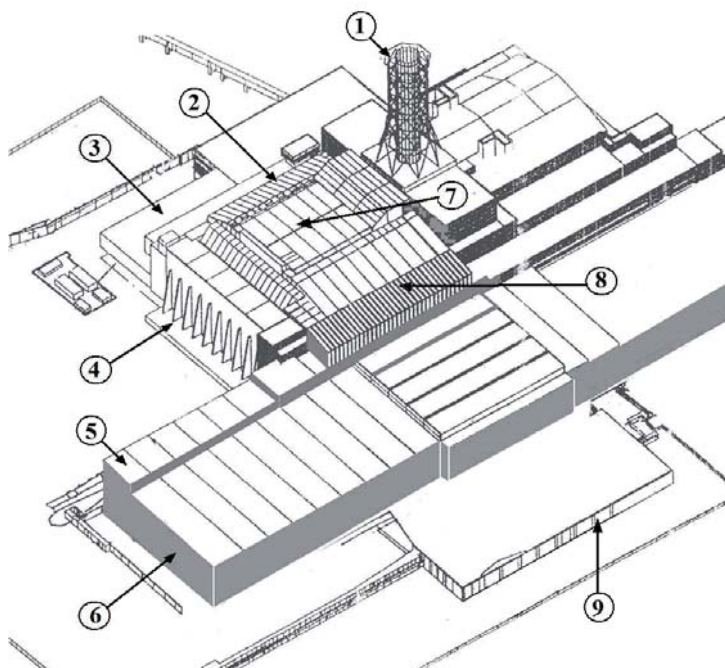


Рис. 5. Общий вид объекта «Укрытие». Обозначения: 1 – венттруба; 2 – северные щиты покрытия; 3 – каскадная стена, 4 – контрфорсная стена, 5 – деаэраторная этажерка; 6 – машинный зал, 7 – кровля, покрывающая центральный зал, 8 – южные щиты покрытия; 9 – южная пионерная стена



Рис. 6. «Укрытие». Съемка с вертолета

- разработка методов определения радиационной обстановки и выработка рекомендаций по ее улучшению;
- оказание непосредственной помощи в строительстве и монтаже объекта;
- определение необходимых будущих параметров «Укрытия» и систем его обеспечения;
- создание и совершенствование систем радиационного мониторинга внутри объекта и на окружающей территории;
- поиски оставшегося в блоке ядерного топлива, определение его ядерной и радиационной опасности и рекомендация контрмер;
- решение еще целого ряда проблем.

Мы остановимся только на нескольких примерах выполнения перечисленных задач.

Огромные дозовые поля, препятствующие проведению работ, требовали от исследователей разработки дистанционных методов изучения радиационной обстановки и характеристик топлива, оставшегося в разрушенном блоке.

Сотрудники КИ, находившиеся в составе оперативной группы в Чернобыле и специалисты, работавшие на московской площадке, предложили и использовали во время строительства «Укрытия» целый ряд таких методов, описанных ниже.

2.2.1. Обнаружение источников большой активности по их ультрафиолетовому излучению

Метод дистанционного определения радиоактивного загрязнения местности с помощью фотографирования ее в ультрафиолетовой области оптического спектра был предложен в мае 1986 г. Ю.П. Донцовым (см. [6, 7]).

В его основе лежало использование свечения воздуха, которое возникает под действием энергичных ионизирующих частиц (см. рис. 7).

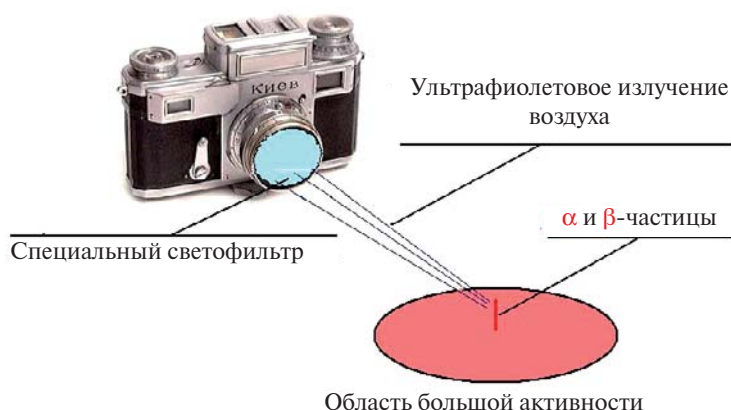


Рис. 7. Схема обнаружения областей с большой активностью с помощью фотографирования в ультрафиолетовом излучении

Спектр этого свечения сосредоточен в нескольких линиях в диапазоне от 300 до 400 нм, и это позволяет с помощью соответствующих фильтров значительно снизить помехи от обычных промышленных и бытовых источников света.

В результате чувствительность метода определяется фоном рассеяния от поверхностей свечения ночного неба.

Для равномерно распределенных источников полезный сигнал начинает превышать фон при загрязнении α -частицами ~ 0.1 Ки/м² и β -частицами ~ 1 Ки/м².

Для сосредоточенных источников порог чувствительности лежит в области от 50 до 100 мКи (в зависимости от природы излучения).

С помощью разработанных приборов на площадке ЧАЭС проводилось фотографирование отдельных объектов, крыши 1-го и 2-го блоков.

Без переобучения персонала удалось выяснить степень загрязненности ряда объектов и обнаружить отдельные сильные источники — фрагменты активной зоны.

Работа с применением УФ-излучения продолжалась и в 1987 году.

2.2.2. «Гамма-визор» (см. [7–11])

В конце лета 1986 г. была поставлена задача определить в развале реактора (в центральном зале) области наиболее сильного гамма-излучения на фоне меньшей активности окружающих материалов. Это было связано с конкретными вопросами проектирования трубного наката и кровли «Укрытия».

Для решения этой задачи в КИ был разработан новый прибор. В нем жесткое излучение, проходя через входное отверстие камеры-обскуры, поглощалось сцинтиллятором. Свечение сцинтиллятора улавливалось электронно-оптическими преобразователями, а затем с помощью телекамеры записывалось на видеомэгнитофон.

В результате на пленке фиксировалось гамма-изображение участка поверхности, которое могло быть привязано к оптическому изображению. Прибор получил название «гамма-визор» (см. рис. 8).



Рис. 8. 1986 г. Испытания гамма-визора на 4-ом блоке ЧАЭС

После его успешных испытаний в центральном зале (см. рис. 9) появились предложения по применению «гамма-визора» для решения ряда других задач.

Так были созданы различные модификации этого прибора: вертолетный, ручной (переносной), автомобильный (см. рис. 10 и 11).

С помощью гамма-визора были успешно проведены работы по поиску фрагментов ядерного топлива и пятен повышенной активности внутри помещений и на крышах 3-го и 4-го блоков, на промплощадке (рис. 12).

В настоящее время прибор усовершенствован с учетом опыта Чернобыля и для него открылись новые области использования (см. [9–11] и ссылки в них).



Рис. 9. Распределение поверхностной активности по засыпке центрального зала разрушенного реактора (сентябрь 1986 г.). Кривая 1 соответствует поверхностной активности выше 0.925 ТБк/м^2 (25 Ки/м^2), 2 — 1.85 ТБк/м^2 (50 Ки/м^2), 3 — 2.775 ТБк/м^2 (75 Ки/м^2)

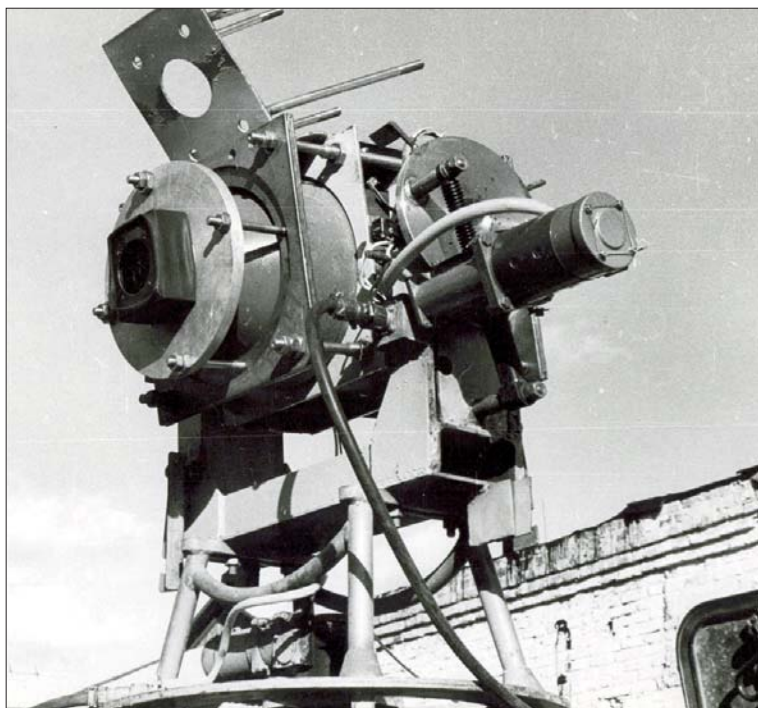


Рис. 10. «Гамма-визор», установленный на автомобиле



Рис. 11. Монтаж переносного гамма-визора

Среди областей применения «гамма-визора»:

- дефектоскопия;
- инспекция ТВЭЛ-ов ядерных реакторов;
- таможенный контроль;
- ликвидация последствий радиационных аварий;
- реабилитационные работы и вывод ядерных установок из эксплуатации
- и многие другие.

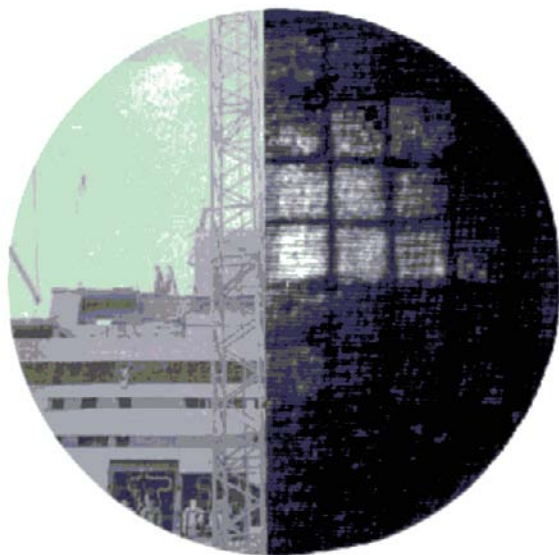


Рис. 12. Гамма и оптическое изображение разрушенного реактора с западной стороны полученное осенью 1986 г. (Наиболее интенсивное излучение идет из области выше разрушенного реактора, что связано с рассеянием воздухом фотонов ионизирующего излучения — «скай-шайн».)

Так, для сопровождения работ по реабилитации территории временных хранилищ РАО в «Курчатовском институте», в частности для контроля за выгрузкой радиоактивных отходов из хранилищ, был разработан специальный «Гамма-визор». Его схема приведена на рис. 13.

Прибор состоит из следующих основных частей:

блока детектирования гамма-излучения (5), включающего сцинтилляционный кристалл CsI(Tl) (2), толщиной 3 мм и 40 мм; масштабирующей волоконно-оптической пластины (фокона) (3); усилителя света на основе микроканальной пластины (4); цифровой видеокамеры с объективом для считывания изображения с экрана МКП (8); черно-белой видеокамеры (1), закрепленной на корпусе защиты; свинцовой защиты (7) толщиной 20 мм, со сменным двухконусным коллиматором (6) для формирования гамма-изображения.

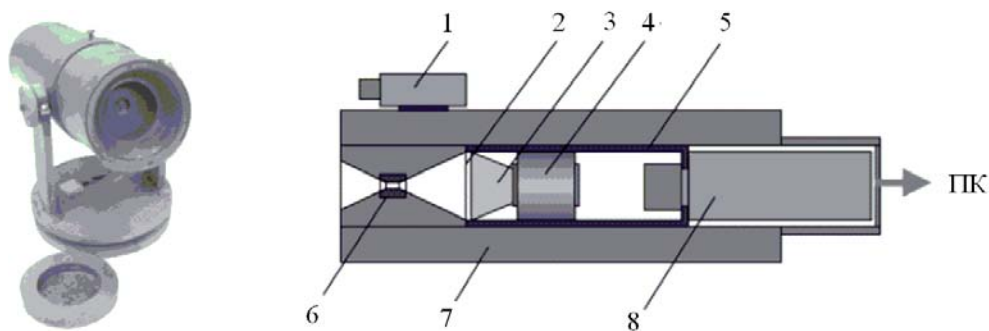


Рис. 13. Фото и схема прибора для получения гамма изображений. Гамма-визор имеет набор сменных двухконусных коллиматоров, позволяющий менять полный угол зрения и пространственное разрешение прибора. Сменные коллиматоры выполнены из вольфрамового сплава с содержанием вольфрама 96% (плотность 17,2 г/см³)

Защитный корпус прибора крепится на поворотном устройстве, установленном на подставке (треноге).

Устройства сбора, обработки и хранения информации — управляющий компьютер. Прибор соединяется с ним кабелями (кабель управления и кабель видеокамеры) длиной 50 м. В качестве управляющего компьютера применяется ноутбук.

Принцип работы гамма-визора заключается в следующем: двухконусный коллиматор формирует на плоском сцинтилляционном кристалле гамма-изображение объекта.

Световое изображение, возникающее в кристалле, передается по фокону на входное окно усилителя света на основе МКП.

Усиленное световое изображение считывается с выходного окна усилителя цифровой видеокамерой и передается в компьютер.

Разработанное программное обеспечение позволяет выбирать время экспозиции кадра, суммировать эти кадры, вычитать фоновые кадры, проводить математическую обработку изображений в процессе работы прибора.

Полученные и обработанные гамма-изображения отображаются в псевдоцветах и накладываются на черно-белые видеоизображения объекта, передаваемые с внешней видеокамеры гамма-визора для идентификации наиболее активных источников.

2.2.3. Программа «Буй»

Как уже говорилось, поиски больших скоплений топлива в периферийных помещениях блока (а, в основном, только в них и могли попасть разведчики) не принесли заметных успехов. В то же время на верхних отметках, в области развала реактора в центральном зале, над помещениями барабан-сепараторов и др. (см. рис. 14) можно было ожидать существование значительных скоплений.

На это прямо указывали измерения дозовых полей, сделанные с помощью вертолетов, гамма-визора и т.п.

Развал был интересен и тем, что измерение тепловых потоков на его поверхности могло дать информацию о всем топливе, оставшемся в блоке.

Поэтому был сделан ряд попыток измерить дозы и температуру на поверхности развала.

Одна из таких операций, нацеленная на получение информации непосредственно из шахты реактора, получила название «Игла». Проведена она была в середине июня

Вот как описывается эта операция в [12].

«Стальной трубе длиной 18 м и диаметром 100 мм придали вид иглы, во внутренней полости трубы разместили датчики гамма-излучения, а на стенке — датчики температуры. Эту иглу на фале длиной 200 м подвесили к вертолету Ка-32. Кабель, по которому передавались сигналы от датчиков, прикрепили к тросу. Иглу необходимо было воткнуть в шахту реактора так, чтобы 10–12 м трубы вонзились внутрь, а остальные 6–8 м остались над поверхностью развала. Это обеспечивало возможность замерять радиацию и температуру как внутри реактора, так и над его поверхностью. Трос с кабелем сбрасы-

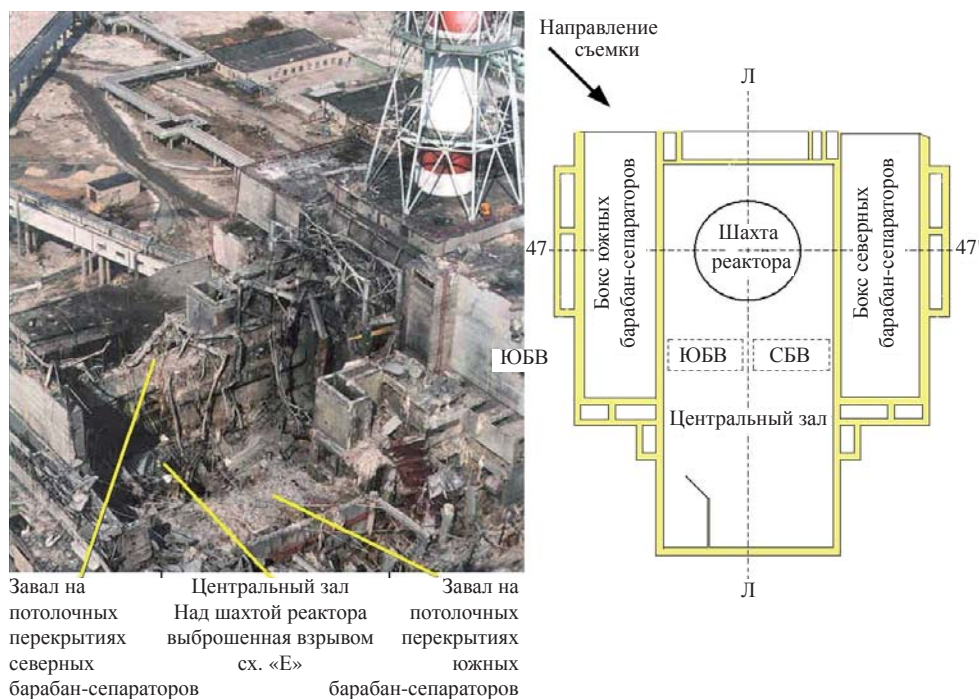


Рис. 14. Вид на развал реактора с юго-запада (с вертолета) и схема верхних помещений

вали у входа в третий блок, где кабель подбিরали и подсоединяли к записывающей аппаратуре».

После тщательной подготовки и проведения тренировочных полетов участники операции приступили непосредственно к ее выполнению.

«Счастливым оказался третий заход: на наших глазах игла вошла на две трети своей длины. Затем было отключено устройство, которым фал крепился к вертолёту, и 200-метровый кабель упал на землю. Задание было выполнено».

К сожалению, оказалось, что показания датчиков, укрепленных на Игле, не соответствовали другим измерениям и расчетам. Объяснение этому нашлось только в 1989 г., когда при исследованиях в центральном зале выяснилось, что Игла попала не в шахту реактора, а в пустой к моменту аварии северный бассейн выдержки отработавшего топлива (СБВ на рис. 14).

В начале лета в КИ обсуждались самые разные возможности измерить тепловые потоки над развалом реактора и по выделяемому теплу определить массу топлива в здании (по оценкам тепловые потоки через боковые стены должны были быть существенно меньше).

Вот, что вспоминает академик С.Т. Беляев:

«...как измерить это тепло? Пробовали разные методы. Сначала — самые простые. С вертолетов создавалась плоская дымовая завеса, а мы, наблюдая за поднимающимися вверх волнами, обнаруживали топливо по конвективным воздушным потокам.

Замеряя температуру и скорость потоков, можно было грубо рассчитать количество топлива. Затем пробовали в разных местах установить дозиметры, температурные датчики и другие приборы.

Пытались опускать их на тросе с вертолета, но они разбивались или быстро выходили из строя, поскольку попадали на совершенно неизвестную поверх-

ность, в неконтролируемые условия. А усилия на установку приборов тратились большие.

...Явно требовалась надежная и комплексная система диагностики развала реактора. Так возникла программа «Буй»... Но изготовлению «бுவев» предшествовали долгие обсуждения, «мозговые штурмы».

Каких только предложений не было — и использовать надувные шары с приборами, и перебросить над развалом тросы, по которым двигались бы специальные тележки с аппаратурой. Для определения химического состава выбросов пытались применять лазерное зондирование. Все варианты трудно даже вспомнить [8].

Программа «Буй» начала осуществляться в июне-июле 1986 г. (рис. 15).

Собственно Буй — устройство с оболочкой в виде усеченного конуса, которое сначала с помощью вертолетов, а позднее подъемных кранов «Демаг», устанавливалось непосредственно в развал реактора — в центральный зал (см. рис. 16).

В каждом бுவе были смонтированы (см. рис. 17) два преобразователя теплового потока для одновременного измерения температуры и плотности теплового потока на поверхности развала. Внизу на расстоянии 0,5 и 1 м от нижней плоскости также были установлены измерители температуры воздуха, примерно посередине бுவя — детектор мощности дозы гамма-излучения, на верхнем конце бுவя — шесть анемометров. Вес бுவя составлял 300 кг.

За 200-метровый кабель-трос буй подвешивался к вертолету, доставлялся в развал 4-го блока и устанавливался в точку, заранее выбранную по результатам аэрофотосъемки.

Благодаря искусству экипажей вертолетов точность установки составляла ± 1 метр.

После установки бுவя вертолет начинал снижение, выводил кабель в нужную точку и там его отстреливал.

Кабель подбирали на земле и заносили его конец в помещение с регистрирующей аппаратурой, уровень дозы в котором составлял 10–20 мР/ч.



Рис. 15. Доставка Бувев на площадку 4-го блока

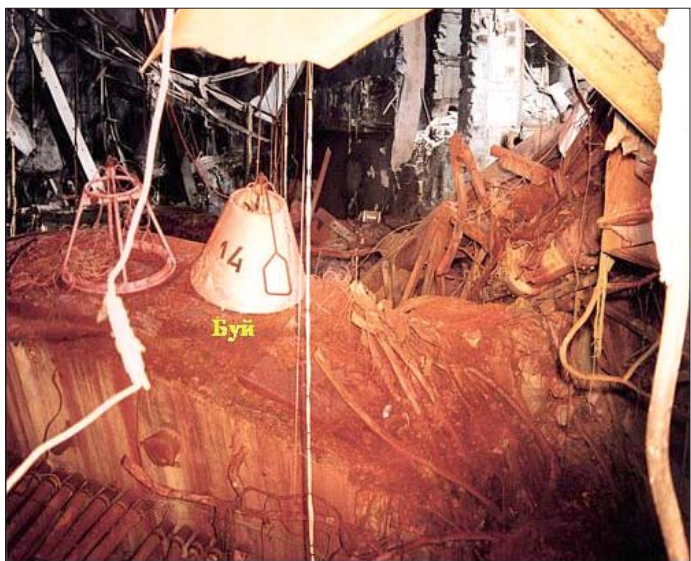


Рис. 16. Один из буюв, поставленный на ребро схемы «Е»

Позднее для установки буюв использовался подъемный кран «Демаг».

Технология постановки буюв с помощью крана была значительно проще и обеспечивала большую точность. Так два буюа были установлены непосредственно на боковую поверхность выброшенной во время взрыва схемы «Е» – верхней биологической защиты реактора (рис. 16).

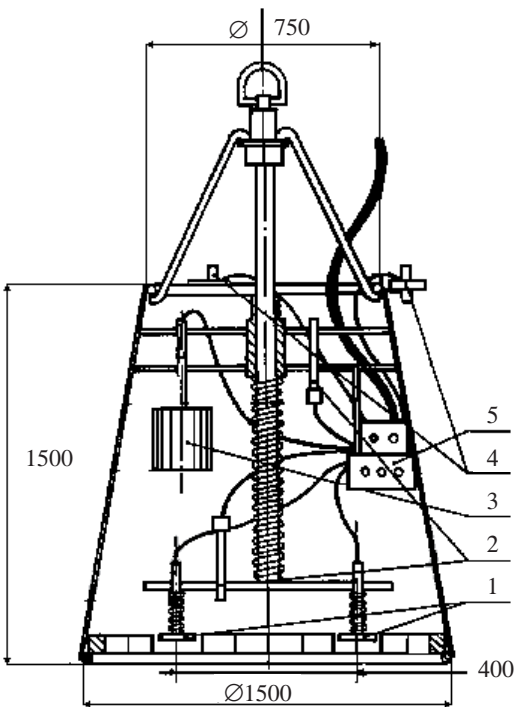


Рис. 17. Детекторы, находящиеся внутри буюа. Обозначения на схеме (размеры в мм): 1. Датчики плотности теплового потока. 2. Термометры. 3. Детекторы мощности дозы гамма-излучения. 4. Анемометры. 5. Панели коммуникаций

Всего за время работы системы (август – ноябрь) было установлено 15 буев с примерно 160 различными детекторами [13].

Эксплуатация основной части буев длилась до конца сентября 1986 года, когда по условиям ведения строительных работ были выведены из строя кабели, связывавшие их с центральным пультом.

До ноября 1986 года оперативный контроль развала проводился с помощью детекторов температуры и гамма-излучения, сохранившихся на единственном бую № 11. Данные, полученные с помощью буев, указывали на монотонный спад гамма-активности над развалом и его температуры (см. рис. 18, 19) в соответствии с расчетами (*отсутствие признаков самоподдерживающейся цепной реакции*).

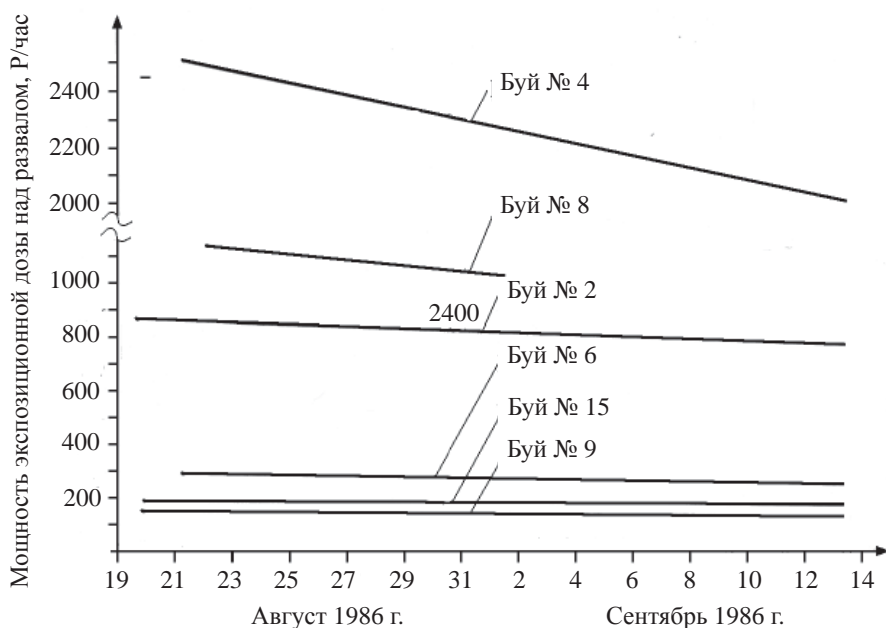


Рис. 18. Мощность экспозиционной дозы над развалом реактора (19 августа – 14 сентября) 1986 г.

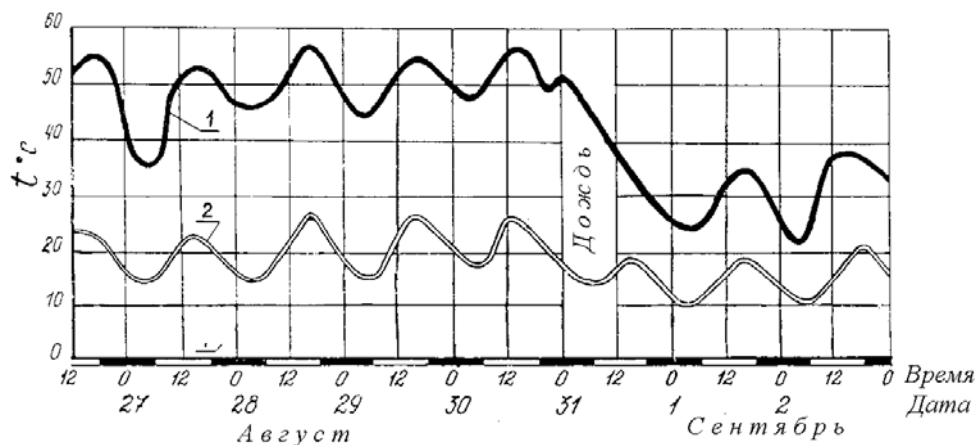


Рис. 19. Данные по температуре над развалом реактора, полученные с помощью двух «Буев» в августе, сентябре 1986 г. (страница рабочего журнала)

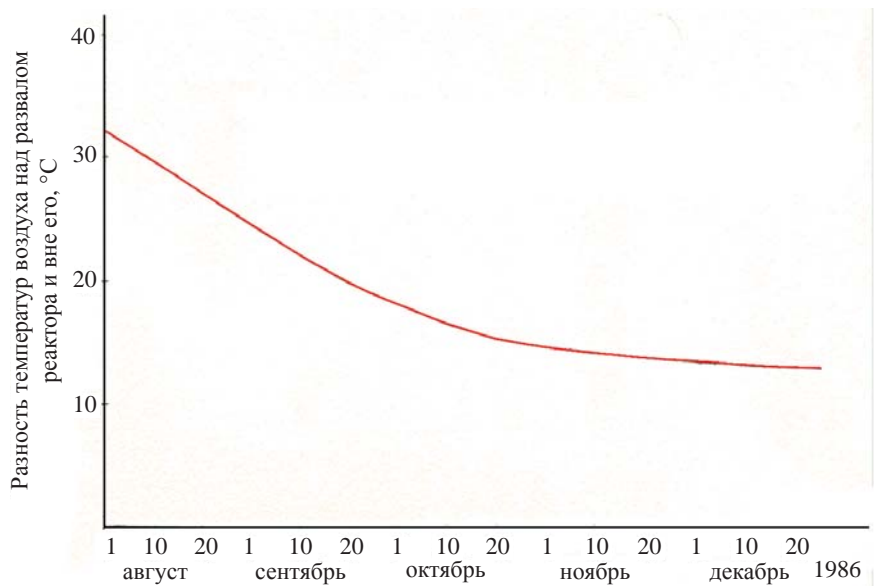


Рис. 20. Усредненные результаты измерений разности температур воздуха над развалом реактора и вне него в 1986 г.(страница рабочего журнала)

Усредненные результаты измерений разности температур воздуха над развалом реактора и вне него в 1986 г. представлены на рис. 20 (см. также [14]).

Измерения тепловых потоков, выходящих из разрушенного блока, позволило оценить интегральное тепловыделение находившегося в нем топлива², а значит и его массу.

На рис. 21 приведена картина плотности конвективных потоков тепла – q_k , идущих из развала реактора, взятая из рабочей тетради участника измерений. На рис. 22 – полные данные по q_k , обработанные с помощью ЭВМ).

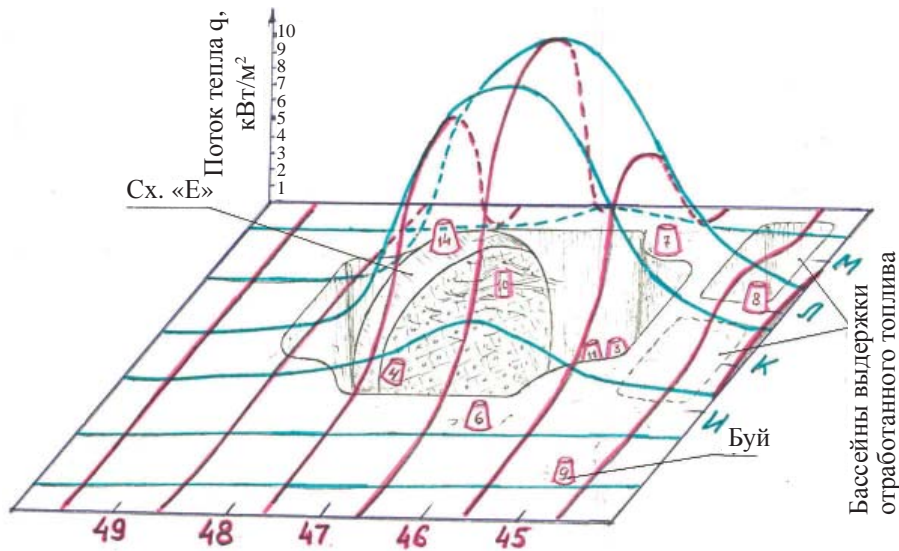


Рис. 21. Эскизный рисунок из рабочего журнала (октябрь 1986 г.)

²В предположении, что поток тепла через боковые стены существенно меньше, чем через развал.

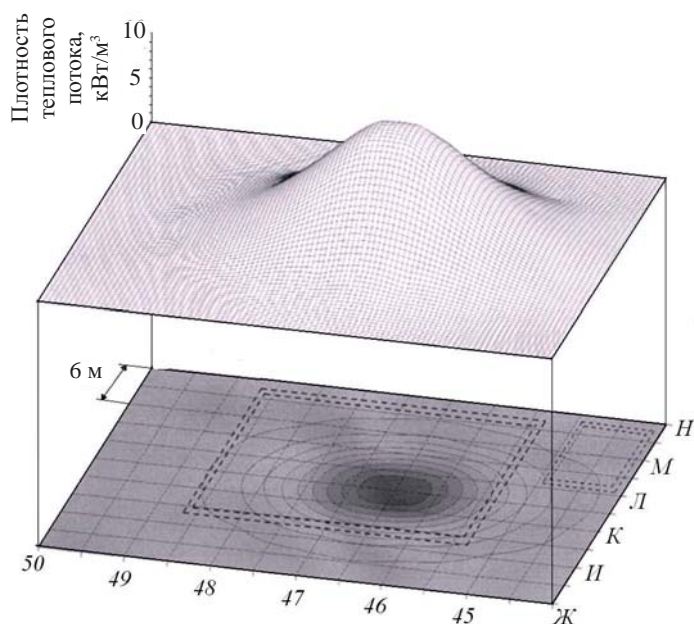


Рис. 22. То же, что и на рис. 21 после обработки данных на ЭВМ

Согласно этим оценкам более 90% топлива осталось в помещениях 4-го блока [8, 13].

2.2.4. Измерения на трубном накате

В качестве примера оказания непосредственной помощи в строительстве и монтаже «Укрытия» приведем работу, выполненную сотрудниками «Курчатовского института» и «Радиового института», которая позволила определить оптимальную конструкцию перекрытия центрального зала объекта³.

К этому моменту (осень 1986 г.) у строителей возникло сильное сомнение в том, что поддерживающие всю кровлю «Укрытия» новые балки, смогут выдержать первоначально планировавшееся поверх трубного наката (см. рис. 4) мощное бетонное перекрытие.

Опоры этих балок были возведены на фундаменте из разрушенных взрывами и пожаром старых конструкций. И, несмотря на все усилия по их бетонированию, прочность такого «постамент» оставалась достаточно неопределенной.

После обсуждения на Правительственной комиссии перед специалистами КИ и РИ был поставлен вопрос, какой толщины и из какого материала должна быть сделана защита на трубном накате, чтобы излучение, выходящее из развала и рассеявшееся в воздухе, не представляло опасности для проведения работ на площадке у стен «Укрытия».

Возможная схема такого процесса приведена на рис. 23.

³О других исследованиях, выполненных при строительстве «Укрытия» на трубном накате см. гл. 9.

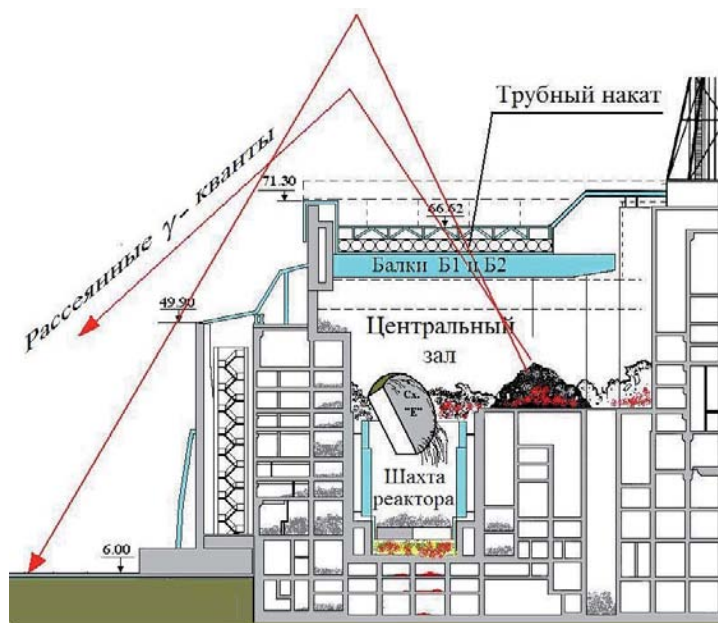


Рис. 23. Схема возможного рассеяния гамма-квантов, идущих из ЦЗ через трубный накат

Для того чтобы провести необходимые расчеты необходимо было измерить интенсивность, угловое распределение и энергетический спектр гамма-излучения, выходящего из блока через трубный накат.

Вот что вспоминают участники работы.

«В начале октября с использованием термолюминесцентных дозиметров ДПГ-03 и ИКС-А, помещенных в фильтры из свинца, железа, песка и графита различных толщин и геометрий⁴, были проведены измерения МЭД над трубным накатом, уложенным над центральным залом 4-го блока.

Пакеты фильтров размещались на металлической раме, прикрепленной к стреле крана «Деаг», и экспонировались в течение 30 мин. на высоте 1,5 м над геометрическим центром перекрытия центрального зала.

Обработка полученных данных, проведенная непосредственно в Чернобыле с использованием методов решения обратных задач, позволила оценить вклад излучения с разной энергией в мощность дозы (спектр доз) над трубным настилом перекрытия 4-го блока.

Эти результаты приведены на рис. 24. Из него видно, что примерно 80% вклада в суммарную мощность дозы давало γ -излучение с энергией менее 400 кэВ. В то же время основной вклад в мощность дозы невозмущенного спектра (около 80%) обусловлен γ -излучением ^{95}Zr и ^{95}Nb со средними энергиями 742 и 766 кэВ, соответственно» [15].

Это позволило предположить, что в силу значительного смягчения спектра излучения массивная биологическая защита на трубном накате вообще может не понадобиться.

В дальнейших работах этой группы «были проведены детальные измерения распределений МЭД γ -излучения над центральным перекрытием 4-го блока с

⁴Для определения спектра γ -излучения.

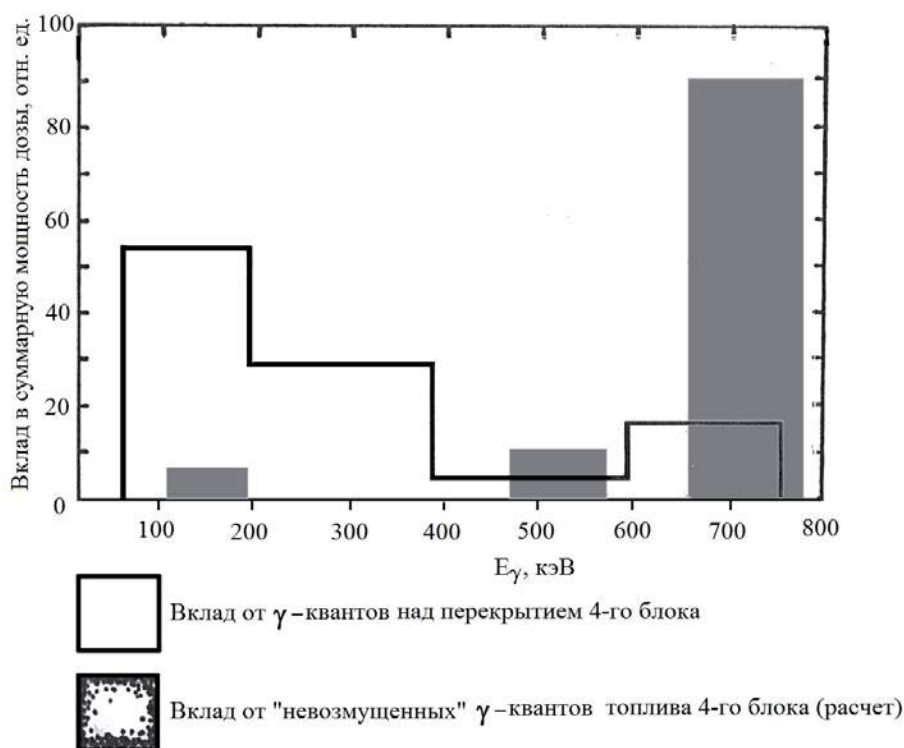


Рис. 24. (из работы [15]) Вклад в суммарную МЭД γ -излучения над перекрытием 4-го блока ЧАЭС от квантов различных энергетических интервалов

его северной и южной сторон: посредством стрелы крана «Демаг» трос с прикрепленными к нему термолюминесцентными дозиметрами растягивался вдоль трубного настила. Результаты измерений проведены на рис. 25.

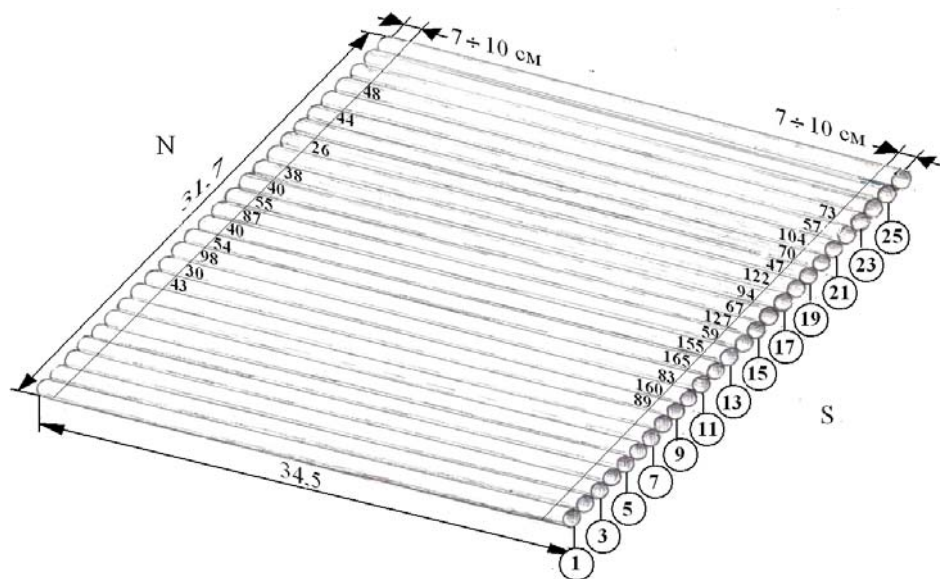


Рис. 25. Результаты измерения доз с помощью накопителей ДПГ-03 на трубном накате, Р/ч. Выполнены 12.10.86 г. Данные в пределах погрешности измерений ($\pm 30\%$) совпадают с данными, полученными 03.10.86 и 24.10.86.

Средние значения МЭД составили (53 ± 12) Р/ч и (100 ± 20) Р/ч для северной и южной сторон перекрытия, соответственно.

В этих же опытах с помощью коллимированных детекторов были проведены измерения углового распределения МЭД над центральным перекрытием.

«Таким образом была разработана простая методика измерений МЭД, а также спектральных и угловых характеристик γ — излучения в зоне с высокими мощностями экспозиционных доз, не требующая длительного присутствия человека в этой зоне и основанная на использовании стандартных детекторов, защищенных фильтрами из различных материалов разной толщины и геометрии и на последующем восстановлении реального спектра.

Несмотря на свою простоту, в напряженных условиях завершения строительно-монтажных работ эта методика оказалась единственно приемлемой: она позволила провести оперативные измерения различных характеристик гамма-поля над перекрытием 4-го блока, результаты которых длительное время оставались уникальными, служа основой для оценки радиационной обстановки у 4-го блока, выработки регламента строительно-монтажных работ, расчетов защитных кабин и др.

На основании результатов проведенной работы по поручению Правительственной комиссии 7–8 октября группой ИАЭ (А.А. Боровой, А.М. Дыхне, Н.Е. Кухаркин), РИ и ВНИИАЭС (А.А. Абагян и др.) были проведены расчеты радиационной обстановки, создаваемой 4-м блоком ЧАЭС за счет выходящего из него излучения (с использованием метода «эквивалентного источника», а также методом Монте-Карло, в последнем случае расчеты были оперативно проведены сотрудниками А.М. Дыхне в Москве).

Величины мощности дозы гамма-поля в различных точках площадки АЭС оказались следующими.

На высоте 1 м от земли:

- у основания «Саркофага» — $0,3\text{--}1$ Р/ч,
- на расстоянии 100 м — $0,2$ Р/ч,
- на расстоянии 200 м — $0,1$ Р/ч.

На крыше III блока в 100 м от перекрытия 4-го блока — 2 Р/ч.

Полученные цифры в совокупности с вышеприведенными результатами измерения мощности дозы γ -излучения на внешней поверхности трубного настила послужили одним из существенных («радиологических») аргументов при принятии решения об отказе от размещения массивной биологической защиты и легли в основу «Требований, предъявляемых к состоянию укрытия 4-го блока Чернобыльской АЭС...», представленных В.А. Легасовым и одобренных председателем Правительственной комиссии Б.Е. Щербиной (решение Правительственной комиссии № 255 от 21 октября 1986 г.)» [15].

Следует добавить, что в результате распада короткоживущих излучателей величина МЭД на кровле «Укрытия» достаточно быстро снижалась.

К осени 1987 г. картина дозовых полей выглядела так, как это показано на рис. 26.

Метод, при котором для измерения больших доз на поверхности использовались термолюминесцентные дозиметры, закрепленные на твердых листах или полотнищах материи, в дальнейшем широко применялся на ЧАЭС.

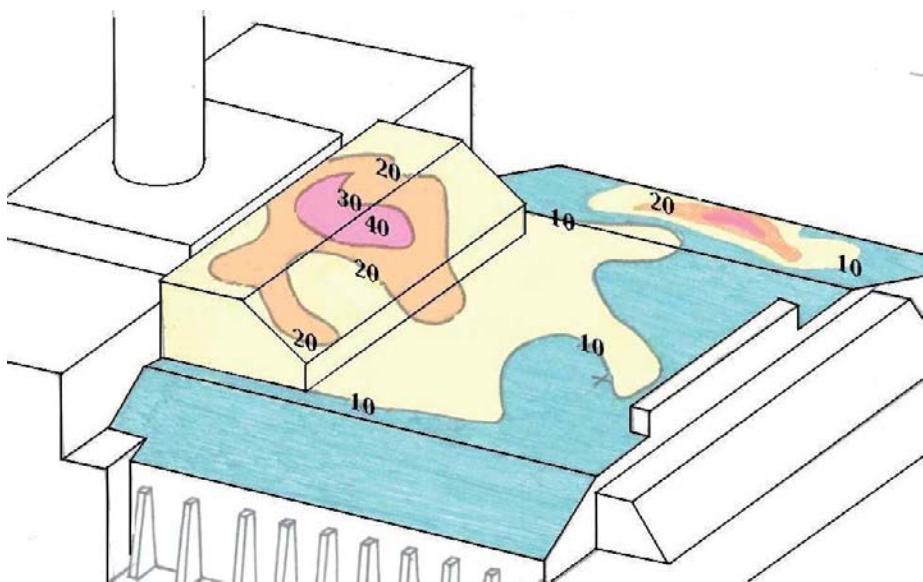


Рис. 26. Дозовые поля на кровле «Укрытия». Рисунок из рабочего журнала (август 1987 г.)

*2.2.5. Отчет о состоянии физических параметров «Укрытия»
к моменту завершения основных строительных работ (см. [14] и рис. 27)*

В конце октября 1986 г. Правительственная комиссия обратилась к ОГ с поручением суммировать в кратком отчете результаты всех исследований, проведенных на строящемся объекте «Укрытие» и важных для его дальнейшей эксплуатации.

Этот отчет стал основным документом, позволившим выработать основные пределы и условия безопасной эксплуатации объекта «Укрытие» на ближайшие годы. В нем были обобщены материалы работ КИ, РИ, ИЯИ АН УССР, организаций Минобороны и Госкомгидромета.

Приведем некоторые из положений этого отчета.

«Вся совокупность диагностических средств, установленных внутри «Укрытия», указывает на стабильность расположения и поведения ядерного топлива в его помещениях» ...

«Постоянно проводится программа работ, цель которых – выяснение величины и динамики радиационных нагрузок, создаваемых «Укрытием» в непосредственной близости от самого объекта.

Программа включает в себя следующие работы:

1. Измерение мощности дозы на трубном накате «Укрытия».
2. Измерение распределения мощности дозы на высоте 200 м над «Укрытием» (программа «Галс»).
3. Наземные дозиметрические измерения проводимые по периметру сооружения.
4. Создание математических моделей объекта и проведение расчетов дозовых нагрузок.

11-04
862

Утверждаю
Легасов В.А.
"28" октября 1986г.

ОТЧЕТ
о состоянии физических параметров "Укрытия"
к моменту завершения основных строительно-
монтажных работ

В отчете использованы материалы представленные: ИАЗ им.И.В.Курчато-
ва, УНХВ МО СССР, в/ч 70170, ГОСКОМГИДРОМЕТ СССР, РИ им.Хлопина,
ИЛИ АН УССР

От ИАЗ им. И.В.Курчатова
Кулоркин Н.Е.
Боровой А.А.
Шикалов В.Ф.
Рязанов В.М.

От РИ им.В.Т.Хлопина
Рудасов В.В.
Пазухин Э.М.

От Госкомгидромета СССР
Авдюшин С.И.
28.10.86

Рис. 27. Первая и последняя страницы отчета о состоянии объекта «Укрытие»

По первому пункту.

Измерение пространственного распределения мощности дозы на накате «Укрытия» (см. рис. 25) 03.10.86., 12.10.86. и 24.10.86. показали, что её средняя величина и характер распределения указывают на неизменность геометрии и физического состояния топлива

По второму пункту.

«С помощью дозиметрической аппаратуры ИМД-31, установленной на вертолете, проводились относительные измерения распределения мощности дозы на высоте 200 м над землей при полетах над «Укрытием» с запада на восток и с севера на юг. (см. рис. 28).

После установления трубного наката это распределение оставалось постоянным. 24–28 октября были проведены калибровочные измерения на борту и вне вертолета с использованием дозиметров производства СССР, США, Японии. Показания приборов совпали. Средняя мощность дозы над «Укрытием», в центре, равна $(8,8 \pm 1,5)$ р/ч при высоте 200 м от земли. Полученное значение находится в хорошем согласии с расчетным значением $(5 \div 10)$ Р/ч в геометрии полностью завершеного сооружения [14]» (см. рис. 29, 30).



Рис. 28. Программа «Галс». Вертолет подлетает к ЧАЭС

По третьему и четвертому пункту.

«...методом Монте-Карло рассчитан верхний предел дозовых нагрузок у стен «Укрытия» и на площадке на высоте 1м вблизи периметра объекта. Он составил 1р/ч. Измерения, проведенные с датчиками, защищенными от большинства посторонних излучателей, показали, что реальные мощности доз близки к расчетным»

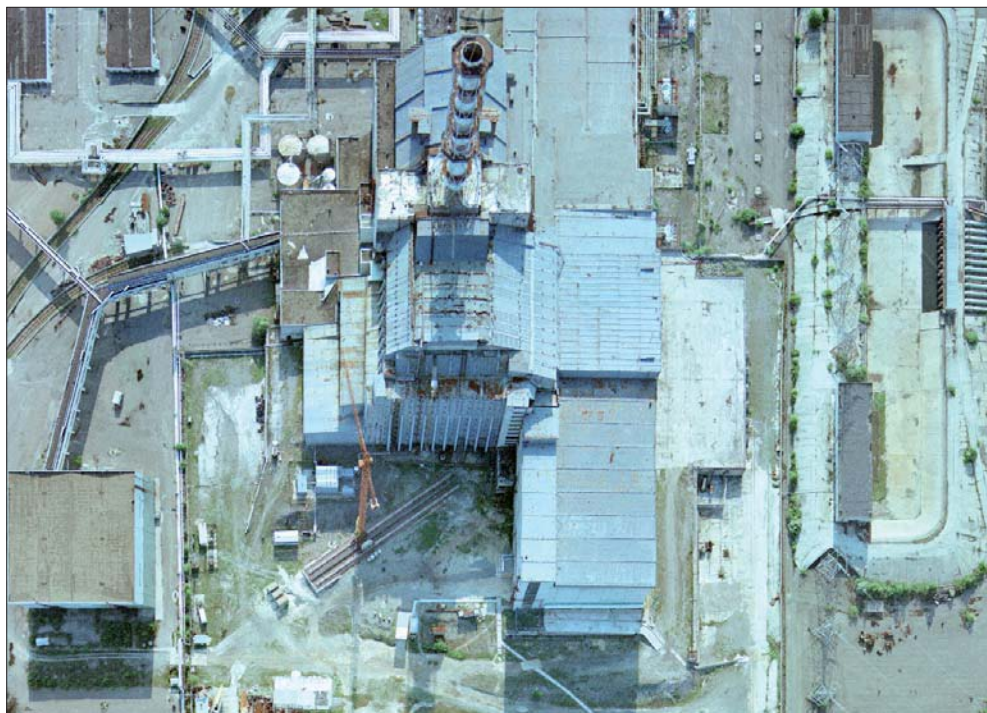


Рис. 29. Программа «Галс». Вертолет пролетает над уже построенным «Укрытием» с запада на восток. Измерялась МЭД гамма-излучения

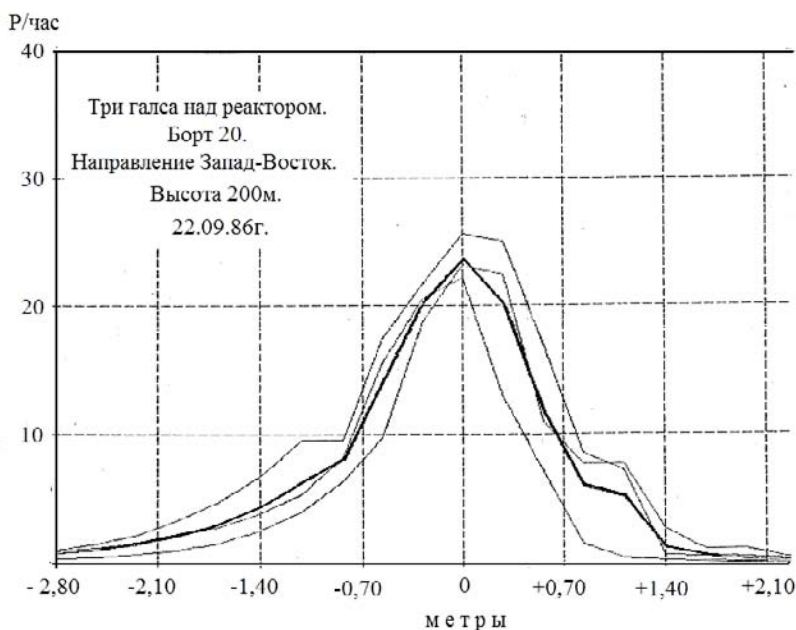


Рис. 30. Пример результатов, полученных по программе «Галс». Дата — 22.09.86. (Рисунок из рабочего журнала)

И далее.

«Постоянно проводился отбор проб воздуха в различных точках помещений ЧАЭС, на промплощадке, в ближней зоне и анализировалась концентрация радионуклидов в них».

«Анализ данных по радиационной обстановке в контролируемых районах показал, что в период май — октябрь 1986 г. произошло существенное снижение интенсивности гамма-излучения на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

Площадь районов, требующих особого контроля (ограниченная изодозной линией 2 мР/ч), сократилась с 8000 км² на май до 640 км² на октябрь.

За август — октябрь месяц не было обнаружено образований новых пятен загрязнения или увеличения интегрального загрязнения территории. Снижение интенсивности гамма-излучения соответствовало теоретическим оценкам.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что уже в настоящее время вклад «Укрытия» в радиационную обстановку на промплощадке ЧАЭС и контролируемых районах:

- мал, по сравнению с имеющимися радиационными загрязнениями;
- снижается в соответствии с распадом топлива;
- близок к расчетному⁵.

⁵См. данные на стр...

2.3. Начало создания систем диагностики «Укрытия»

Одновременно с возведением «Укрытия» разведывательные группы КИ и других организаций находили все новые и новые пути для проникновения во внутренние помещения объекта, стремясь максимально приблизиться к скоплениям топлива. В завоеванных помещениях устанавливали радиационные и тепловые детекторы, которые должны были фиксировать изменения соответствующих полей и возможные перемещения топливных масс.

Основываясь на достигнутых результатах, Правительственная комиссия возложила на Институт ядерных исследований Академии наук Украины разработку штатной системы контроля и диагностики аварийного реактора 4 блока ЧАЭС (Решение ПК от 28.10.1986).

Вот что вспоминает И.Н. Вишневский, директор ИЯИ:

«В то время в нашем институте была разработана, испытана в опытном реакторе и внедрена на Армянской АЭС разветвленная система контроля и диагностики зоны реактора и других технологических узлов и устройств станции. Идеи, на которых базировалась эта разработка, были использованы для создания на разрушенном реакторе ЧАЭС информационно-диагностического комплекса «Шатер». При этом в сжатые сроки был разработан проект, изготовлены комплектующие и в очень сложных радиационных условиях смонтирована система... Все данные собирались и вносились в компьютер, где можно было с помощью разработанной программы анализировать состояние и прогнозировать изменения контролируемого объекта» [16].

ИДК «Шатер» был сдан в эксплуатацию в 1987 году.

В комплекс вошли детекторы нейтронного и гамма-излучения, датчики температуры, теплового потока и вибрации,

Они были установлены в бассейне-барботере (четыре вертикальные штанги с ДТП и термопарами), в ПРК (шесть горизонтальных штанг с ДТП, термопарами, датчиками МЭД и датчиками плотности потока нейтронов), над поверхностью развала (восемь блоков датчиков с ДТП, термопарами, датчиками МЭД и датчиками плотности потока нейтронов).

Для введения в помещения ПРК (210/8, 210/7, 210/6, 210/5) датчиков системы «Шатер» с запада из пом. 207/5 и с востока из пом. 213/2 с помощью электрического перфоратора были продолжены отверстия диаметром ~50 мм через стены толщиной 1.2 м.

Как выяснилось позже главные и наиболее потенциально опасные скопления ТСМ, находящиеся в подаппаратном помещении (пом. 305/2), в ряде помещений на отм. +9.000 и +6.000 системой «Шатер» не контролировались.

О причинах говорилось выше — к моменту ее создания удалось разведать и оснастить диагностической аппаратурой, в основном, периферию «Укрытия» (рис. 31).

В это же время (конец 1986 г. — 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 ИДК «Шатер» (см., например, [17]).



Рис. 31. Диагностические измерения на 4-ом блоке

ЛИТЕРАТУРА

1. Курносов В.А., Багрянский В.М. и др. Захоронение 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС. Атомная энергия, 1998, т. 64, № 4, с. 248.
2. Описание объекта «Укрытие» и требования к его преобразованию. Минчернобыль Украины, Академия Наук Украины. Киев, Наукова думка, 1992, 50 с.
3. Чернобыль. Пять трудных лет. Москва, Издат, 1992, 384 с.
4. Беляев И.А. Бетон марки «Средмаш». Москва, ИздАТ, 1996, 292 с.
5. Лыков Г.Д. Строители «Саркофага». В сборнике «Чернобыль: катастрофа, подвиг, уроки и выводы». Интер-Весы, Москва, 1996 г., с. 332–342.
6. Донцов Ю.Н., Ломоносов В.К., Кулаков В.М. и др. Дистанционное определение радиоактивного загрязнения по УФ-излучению. ИАЭ им. И.В. Курчатова, отчет N 50.05/98, Москва, 1986 г., 8 с.
7. Belyaev S.T., Borovoi A.A., Busulukov Y.P. Some Aspects of Post Accident Activity in Control Zone of Chernobyl NPP. «International Symposium On Recovery Operation in the Event on Nuclear Accident or Radiological Emergency». Vienna, Austria, 6–10 November 1989.
8. Смирнов В.Н. Боевые действия в «мирном небе». <http://www.iss-atom.ru/book-4/glav-1-13.htm>.
9. Беляев С.Т. Диагностические исследования на площадке ЧАЭС и внутри «Укрытия» 4 блока (1986–1991 гг.), «Москва – Чернобылю» книга 2, с. 72–88, Москва, Воениздат, 1998 г.

10. Ivanov O.P., Sudarkin A.N., Stepanov V.E. and Urutskoev L.I. Portable Digital X Ray and Gamma Ray Imaging with Coded Mask. Performance Characteristics and Methods of Image Reconstruction. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, A 422 (1999), p. 729–734
11. Ivanov O.P., Stepanov V.E., Volkov V.G., Volkovich A.G., Smirnov S.V., Danilovich A.S. New Portable Gamma Camera for Nuclear Environment and its Application at Rehabilitation Works. Book of abstracts IEEE NSS MIC Conference, Rome, Italy, October 16–23, 2004, p. 89.
12. Новые приборы для сортировки РАО в реабилитационных работах в РНЦ КИ. Волкович А.Г., Волков В.Г., Данилович А.С., Иванов О.П., Смирнов С.В., Степанов В.Е. ФГУ РНЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия По материалам конференции «Безопасность ядерных технологий: экономика безопасности и обращение с ИИИ». <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=102>
13. Базырь Н.Н., Беляев С.Т., Васильев А.А., Волков В.Г. и др. Тепловая и радиационная разведка аварийного реактора №4 Чернобыльской АЭС и оперативный контроль его состояния в процессе сооружения «Укрытия» (июль–октябрь 1986 г.). Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова, Москва, ЦНИИатоминформ, 1990 г.
14. Отчет о состоянии физических параметров «Укрытия» к моменту завершения основных строительных работ. Отчет ОГ КИ № 11-04 от 28.10.86. Чернобыль, 10 с.
15. Васильев С.К., Петров Б.Ф., Плескачевский Л.А. Комплекс работ лаборатории радиометрии Радиевого института в Чернобыле: июнь–ноябрь 1986 г. В сборнике «Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина», т. XIV, 2009 г., с. 23–45. (<http://www.khlopin.ru/proceedings.php>)
16. «Зеркало недели» № 12 (591) 1–7 апреля 2006 г.
17. 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.

3. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СКВАЖИНЫ

3.1. План «генерального наступления»

В настоящем разделе мы в основном будем следовать работам [1–3].

К началу 1987 г. информация о состоянии внутренних конструкций «Укрытия» и ТСМ, находящихся в объекте, ограничивалась теми периферийными помещениями, в которые смогли проникнуть разведывательные группы. Дальнейшему продвижению мешали огромные радиационные поля и бетон, в больших количествах (десятки тысяч кубометров), пролившийся при дистанционном бетонировании опор.

Люди подвергались все большему риску, а получаемая информация становилась все более скудной.

Необходимо было найти новые методы и создать новые приборы для исследования степени ядерной, радиационной и тепловой опасности, которую представляли ТСМ, и выработать соответствующие меры безопасности.

План «Генерального наступления» был разработан в «Курчатовском институте» по инициативе акад. С.Т. Беляева и одобрен на заседании Правительственной Комиссии 13 октября 1987 г.

Он состоял в следующем:

- очистить и дезактивировать ряд доступных помещений, наиболее близко расположенных к шахте реактора;
- установить в этих помещениях бурильные станки;
- пробурить скважины через бетонные стены и другие конструкции в шахте реактора и прилегающие помещения, в подреакторные помещения;
- с помощью специальных перископов, телевизионных камер, фотографирования провести визуальные наблюдения через скважины;
- обнаружив скопления ТСМ, измерить их параметры с помощью гамма, нейтронных и тепловых детекторов;
- отобрать и исследовать пробы различных материалов в том числе ТСМ;
- оценить реальную опасность топливных скоплений и взять под контроль их состояние;
- по возможности укрепить внутренние конструкции, грозящие обрушениями.

Как уже говорилось во Введении, для выполнения плана «генерального наступления», координации научных исследований, проводимых в зоне ЧАЭС и контролируемой зоне, а также для выполнения целого ряда проектных, строительных и монтажных работ в объекте «Укрытие» в конце 1987 г. в Чернобыле была создана комплексная экспедиция при Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (на правах филиала КИ).

Специалистами КЭ весной 1988 г. были очищены и дезактивированы помещения сначала с западной, позднее с южной стороны блока. В них были установлены буровые станки и через бетон и металлические конструкции пробурены скважины к местам предполагаемых скоплений топливосодержащих материалов (рис. 1).

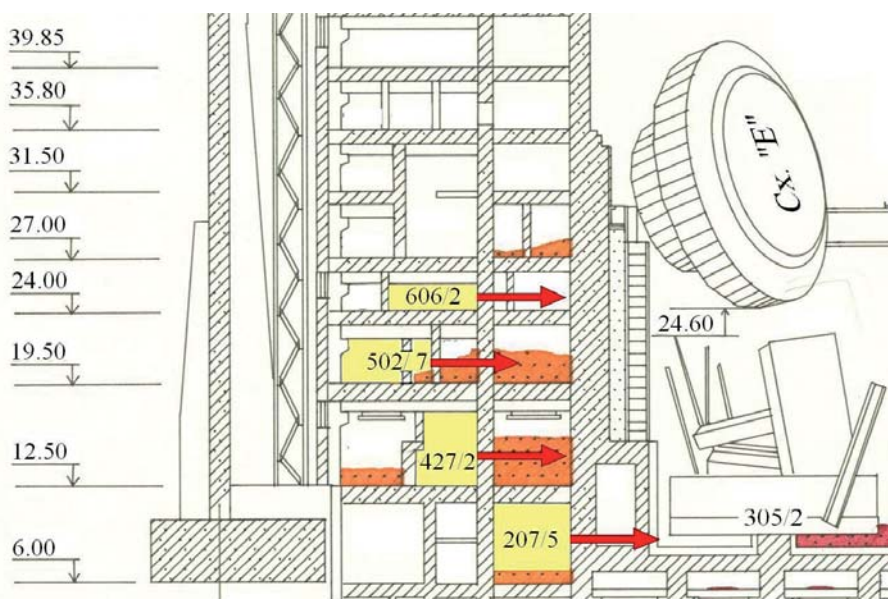


Рис. 1. На схеме желтым цветом выделены помещения с западной стороны «Укрытия», из которых проводилось бурение в шахту реактора, пом. 305/2, в опорную плиту. Коричневым цветом отмечены скопления бетона, попавшего в помещения при строительстве «Укрытия». Красные стрелки — направление бурения

Диаметр скважин лежал в пределах от 60 до 150 мм, длина их достигала 26 м.

Основная часть скважин шла горизонтально из западных помещений блока.

Меньшее количество скважин было пробурено в направлении с юга на север.

Наконец, относительно небольшая часть скважин имела наклон и шла из доступных помещений вниз или вверх.

Уже первые наблюдения и измерения, сделанные с помощью скважин, показали перспективность этого метода и привели к значительному расширению фронта работ.

Для того чтобы дать представление об этих масштабах, на рис. 2 приводится схема скважин, пробуренных только на высотных отметках от +8.800 м до +9.400 м.

Исследования этого периода (1988–1991 гг.) дали возможность:

- оценить внутренние разрушения реактора, выяснить состояние конструкций блока;
- определить основные места скоплений ТСМ и изучить их модификации.

Следует отметить, что результаты бурения позволили наметить и новые пути проникновения разведывательных групп в помещения «Укрытия» и стимулировали создание семейства специальных диагностических роботов для работ внутри «Укрытия».

С помощью скважин и непосредственно разведывательными группами к местам скоплений ТСМ были доставлены радиационные и тепловые детекторы.

Так постепенно в «Укрытии» создавалась система мониторинга, получившая название — информационно-измерительная система «Финиш».

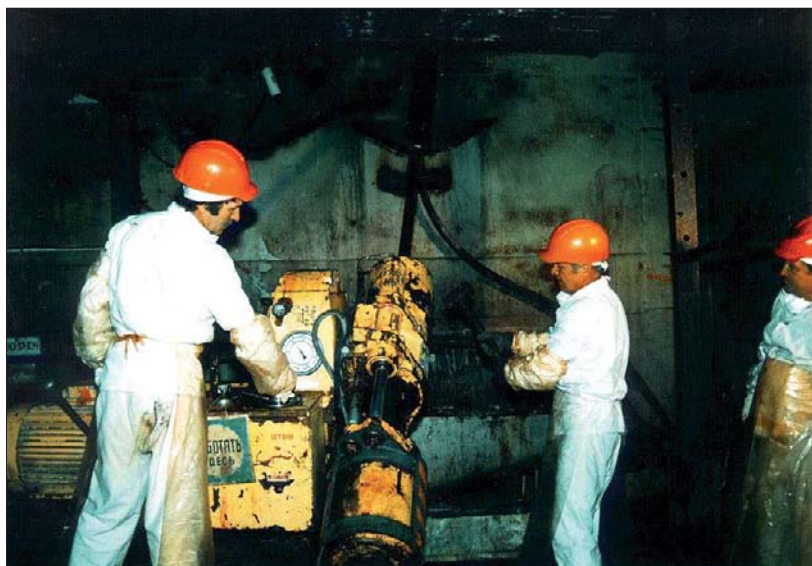


Рис. 3. Подготовка бурового станка к работе



Рис. 4. Превентор¹ скважины

Следует особо отметить, что до этого времени нигде в мире буровых работ в таких тяжелых радиационных условиях не проводилось.

При подготовительных работах буровой станок весом более 3-х тонн разбирался на небольшие узлы. Делалось это в силу необходимости его транспортировки по узким проходам, подчас лазам. Детали переносились вручную, а на месте бурения станок собирался.

¹Превентор — противовыбросовое устройство, устанавливаемое на устье скважины с целью её герметизации в случае возникновения чрезвычайных ситуаций при бурении.

Для облегчения последующей дезактивации поверхность оборудования покрывалась специальными составами и материалами.

Сам процесс бурения сопровождался проведением сложных мероприятий по защите от проникающего излучения и радиоактивных аэрозолей.

Использовались коллективные и индивидуальные защитные средства. В том числе свинцовые экраны, стационарные и переносные системы отсоса воздуха, стены и потолки помещений, в которых проводились работы, покрывались специальными материалами, на которых фиксировалась пыль², проводилась периодическая дезактивация оборудования и т.п. Буровики работали в пластиковых костюмах, бахилах, респираторах.

В случае превышения контрольных уровней работы останавливались, персонал выводился из рабочей зоны, проводилась полная дезактивация помещения и оборудования.

Материалы, которые встречались по ходу бурения, представляли собой бетонные стены, армированные стальной арматурой диаметром до 40 мм, а также пространства залитые бетоном, попавшим туда при ликвидации аварии. В большинстве помещений находилось технологическое оборудование, трубопроводы, кабельные лотки, маршевые лестницы и т.п. Для бурения такой среды потребовалось разработать, испытать и внедрить специальный режущий буровой инструмент.

Особые требования предъявлялись и к буровым растворам.

Была разработана специальная система их очистки и переработки. Для обеспечения ядерной безопасности в промывочную жидкость при необходимости вводились специальные нейтронно-поглощающие добавки (чаще всего — соли гадолиния).

Первые скважины внутри 4-го блока были пробурены в феврале — апреле 1988 г. из пом. 207/5 на отметках (9.100—10.700) в подреакторное помещение 305/2 (см. рис. 1).

К 1992 г. полное число исследовательских скважин составило ~150.

Впоследствии бурение скважин было приостановлено.

Возобновилось оно только в 1998 г. Были пробурены идущие вверх (наклонные) скважины из пом. 515/3 по направлению к скоплениям топлива в ЦЗ.

По ряду причин работы не были доведены до конца.

3.3. Общий порядок проведения исследований с помощью скважин

Первая информация, которую давали скважины, заключалась в вынимаемых кернах, содержащих материалы, через которые шло бурение.

На объекте «Укрытие» сами керны и образцы, отобранные из скважин с помощью специально разработанных приспособлений (см. рис. 5—8), подробно описывались, фотографировались, измерялись их гамма-поля.

²О мерах борьбы с радиоактивными аэрозолями, возникающими при бурении, более подробно рассказывается в гл. 9.

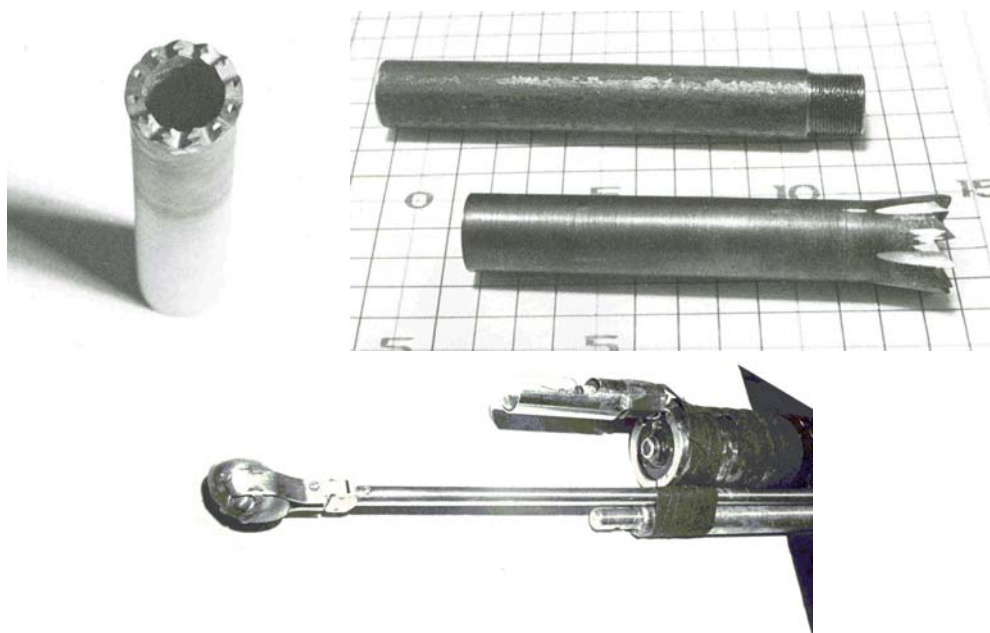


Рис. 5. Буровой инструмент (трубчатые фрезы) и специально разработанный комбинированный инструмент (захват + перископ + осветитель) для отбора образцов



Рис. 6. Подготовка комбинированного инструмента к работе

Для работы с материалами большой активности в пом. 207/3 была смонтирована горячая камера.

Затем образцы и пробы из кернов загружались в контейнеры и перевозились в лаборатории в г. Чернобыль, где препарировались и проходили спектрометрический и радиохимический анализ.

В ходе анализов определялась их полная и удельная активность, удельная активность отдельных радионуклидов, глубина выгорания топлива, содержащегося в образце, его химический состав и т.п. (подробнее см. гл. 5).

Часть образцов передавалась в научно-исследовательские институты Москвы, Ленинграда и Киева для более детального анализа.

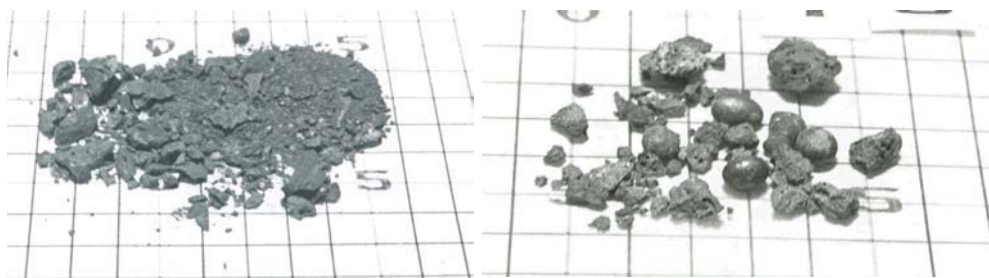


Рис. 7. Образцы конструкционных и ТСМ, отобранные при бурении



Рис. 8. Подготовка к отбору пробы через скважину

В процессе бурения внутри скважины проводился целый комплекс диагностических исследований. Когда скважина достигала намеченной точки или входила в пустое пространство, то начиналось его визуальное обследование.

3.4. Методы визуального обследования

Визуальное обследование велось с помощью перископов, портативных фото и телекамер, вдвигаемых в скважину на специальных штангах и снабженных системами освещения.

Наиболее важные наблюдения с использованием перископа РВП-489, который применяется для осмотра каналов РБМК-1000, были выполнены весной — летом 1988 г. [9].

Этим наблюдениям предшествовало неожиданное открытие, сделанное при бурении скважин в шахту реактора (см. рис. 9).

«3-го мая одна из верхних скважин, пройдя через бетонные стены, песчаную засыпку, стальные стенки бака водяной защиты, вошла наконец в шахту реактора.

С учетом опускания кладки это должно было быть место расположения ее центра. Того места, где зарождалась авария.

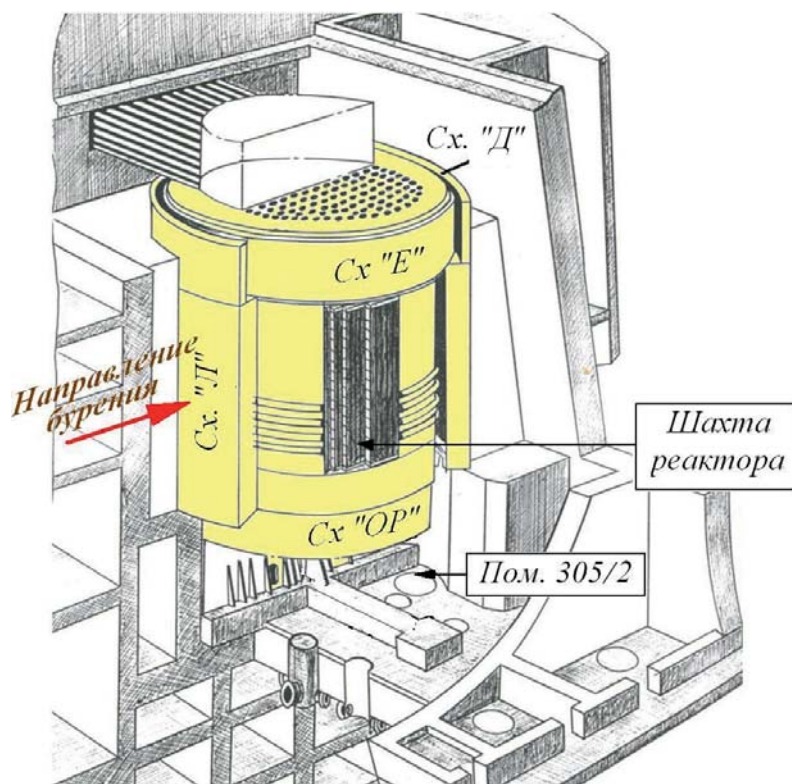


Рис. 9. Схема конструкций, окружавших шахту реактора (разрез) до аварии. Указано направление, в котором производилось бурение в шахту реактора. Обозначения на рис. — см. раздел «Сокращения и обозначения»

Мы ввели в скважину длинный шуп и попытались определить границы разрушенной активной зоны. Шуп уходил все дальше и дальше, не встречая сопротивления. Наконец, он достиг противоположной стенки бака, в котором должна была находиться кладка. Никаких признаков ее не было...

Где же активная зона? Две сотни тонн урана, огромное количество графита? В следующие дни рядом с первой была на той же высоте пробурена вторая скважина.

Через нее в шахту реактора ввели мощные осветители. А через первую скважину — специальный перископ.

ШАХТА ОКАЗАЛАСЬ ПРАКТИЧЕСКИ ПУСТА!» [9].

Все это побудило как можно скорее приступить к детальным исследованиям шахты реактора и объединенное с ней после взрыва пом. 305/2.

Для этого через скважины на отметках +24.000 (пом. 605/2), +21.000 (пом. 502/2), +15.000 (пом. 427/2) и +10.000 — +8.000м (пом. 207/5 и 207/4) (см. рис. 1) в шахту реактора вводился перископ и системы освещения.

После проведения визуальных исследований с помощью перископа выполнялось фотографирование (см. рис. 10).

В качестве другого примера фотографирования помещения с помощью перископа, введенного через скважину, см. рис. 11. На фотографии — сожженный во время аварии потолок помещения 304/3.



Рис. 10. Фотография шахты реактора, сделанная через перископ



Рис. 11. Сожженный потолок в пом. 304/3. Фотография сделана с помощью перископа, введенного через скважину

Фотосъемка помещений через перископ не давала качественных фотографий и в 1988г. в КИ В.И. Ободзинским был разработан специальный «фото-зонд» (см. рис. 12), который объединял в одном кожухе фотоаппарат с автоматической перезарядкой кадров (13 кадров) и вспышку. Последовательно поворачивая зонд можно было производить панорамное фотографирование.

Полученные результаты, дополненные видеоинформацией, дали возможность впервые *восстановить достаточно полную картину разрушений в шахте реактора, определить предполагаемое местоположение скоплений ТСМ.*



Рис. 12. «Фото-зонд», разработанный для съемок через скважины. Позволял проводить панорамное фотографирование

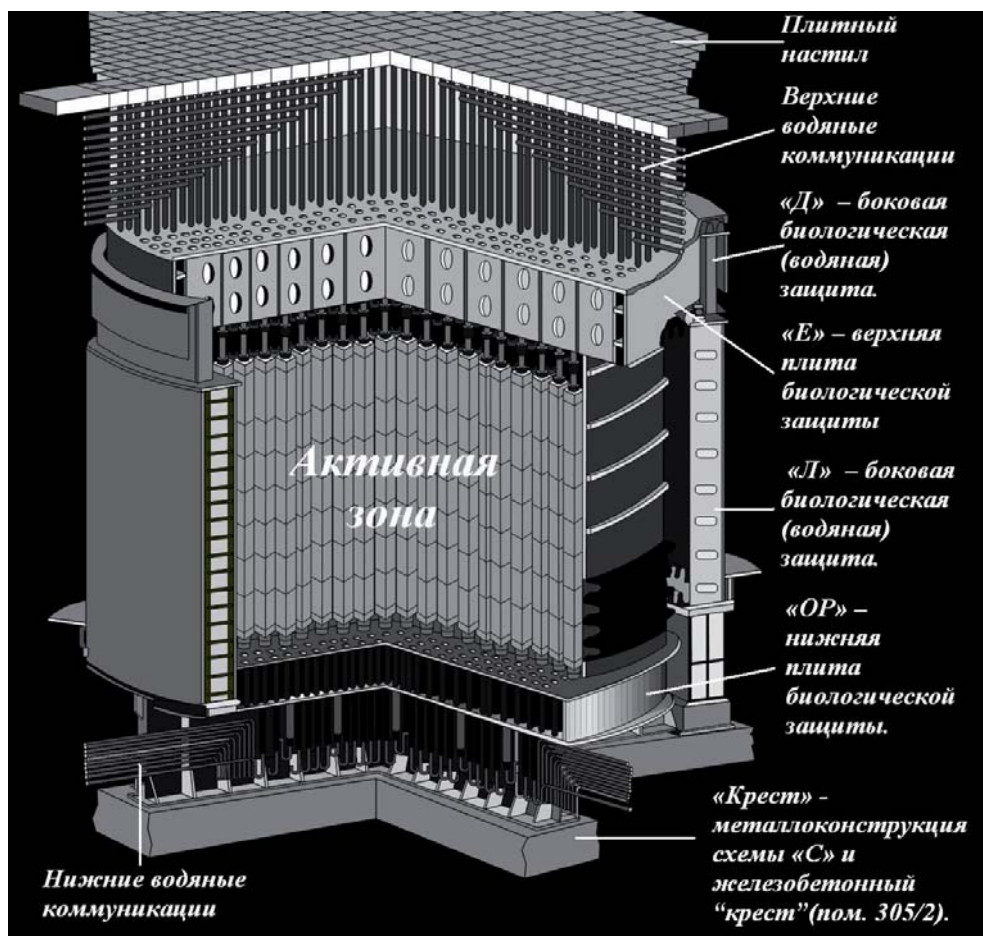


Рис. 13. Схема расположения конструкций, находящихся в шахте реактора (до аварии)

3.4. Состояние внутренних конструкций после аварии (см. [2, 3] и др.)

До аварии конструкции, находящиеся в шахте реактора выглядели так, как это показано на рис. 9 и более подробно на рис. 13.

Рис. 14, рис. 16 и 17 (выполнены А.С. Лагуненко [10]) дают представление о картине разрушений и схеме распространении ТСМ, сложившейся в основном к началу 1989 г. благодаря исследовательским скважинам и дополненной информацией, полученной в последующие годы. Отмечены помещения, в которых находились значительные скопления топлива.

Верхняя плита биологической защиты реактора (схема «Е») вместе с трубами пароводяных коммуникаций (ПВК), остатками технологических каналов, обломками железобетонных конструкций, застрявшими между верхними трактами наращивания, стоит на ребре под углом $\sim 15^\circ$ от вертикали, опираясь на северо-востоке на металлоконструкцию схемы «Д», а на юго-западе — на железобетонную плиту, лежащую на схеме «Д». Нижняя кромка схемы «Е» на-

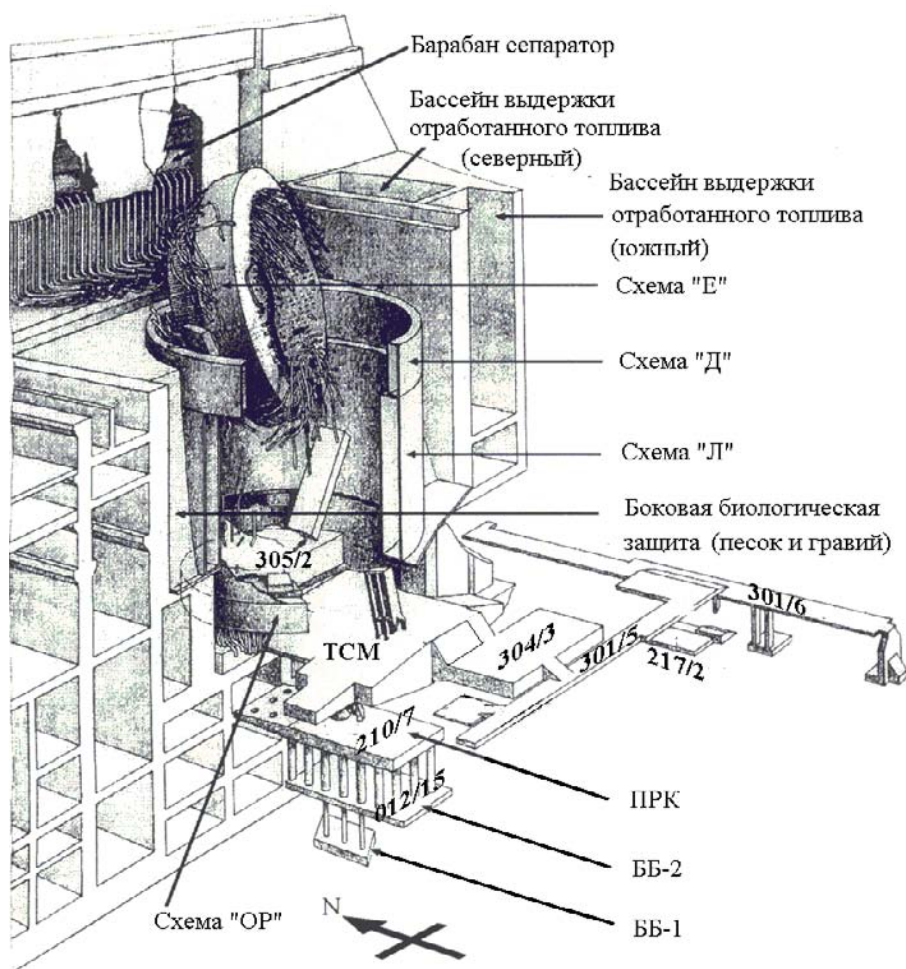


Рис. 14. Разрушения в шахте реактора, вызванные аварией (для наглядности юго-западный сектор шахты вырезан). Завал из конструкций на сх. «ОР» в пом. 305/2 на рис. не детализирован

ходится на отметке +25.000, верхняя — на отметке +43.000, т.е. ее геометрический центр поднят на ~5 м по сравнению с его доаварийным уровнем.

Практически все пространство между схемой «Е» и схемой «Д», стенами шахты реактора на северо-западе заполнено верхними трактами наращивания и спутанными пучками труб ПВК, в которых застряли фрагменты строительных конструкций и оборудования.

Центральная часть бывшей нижней поверхности схемы «Е» выглядит более чем наполовину лишенной ТК. Они оторваны у самого основания, сохранилась небольшая часть по периферийному кольцу схемы «Е».

Наблюдаемая визуально часть технологических каналов («волосы Елены») находится в области с координатами 44-46, Л-Н. В реакторное пространство со схемы «Е» свисает ~40 каналов.

Основание реактора — схема «ОР» сместилась вниз и раскололась. Основная часть «ОР» (~3/4) находится на 3,8 м ниже своего штатного положения. Ее отколотая часть (1/4) отсутствует. Таким образом шахта реактора (пом. 504/2) оказалась объединенной с пом. 305/2.

Сверху на схеме «ОР» (на завале) в северо-восточном секторе, под углом 60° стоит ж/б плита, упавшая из ЦЗ.

Конструкции схемы «С» оказались смяты опустившейся схемой «ОР». Смяты и прижаты к бетонной плите пола пом. 305/2 многочисленные трубы нижних водяных коммуникаций.

В дальнейшем исследовании с помощью скважин продолжались, большой объем данных был получен и при работе разведывательных групп (рис. 15–17), постепенно проникавших все дальше во внутренние помещения блока. Об этом рассказывается в следующих разделах.

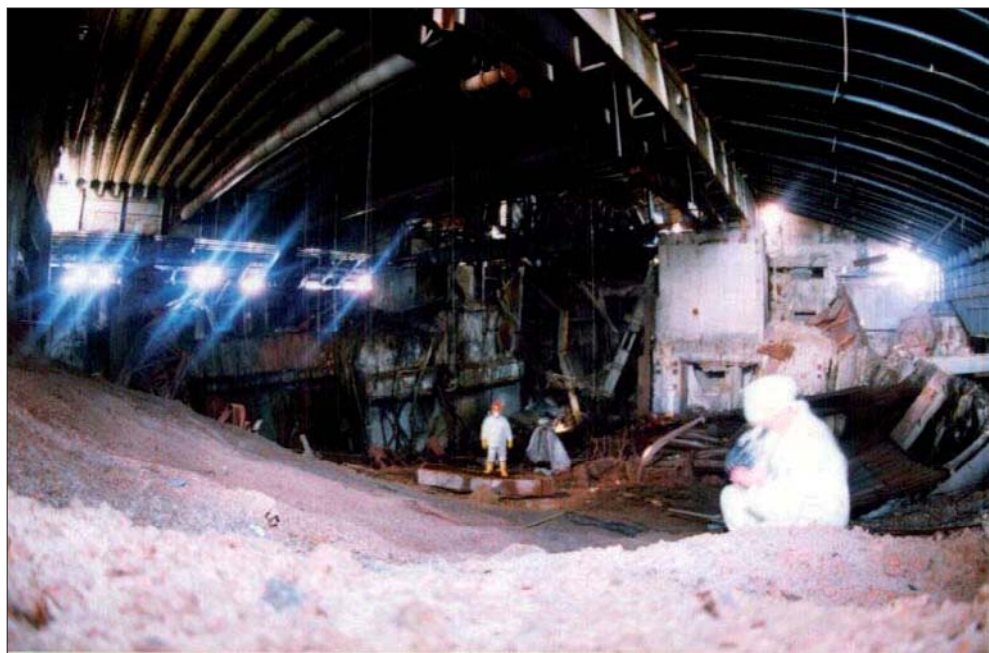


Рис. 15. Разведчики в ЦЗ «Укрытия». 1999 г.

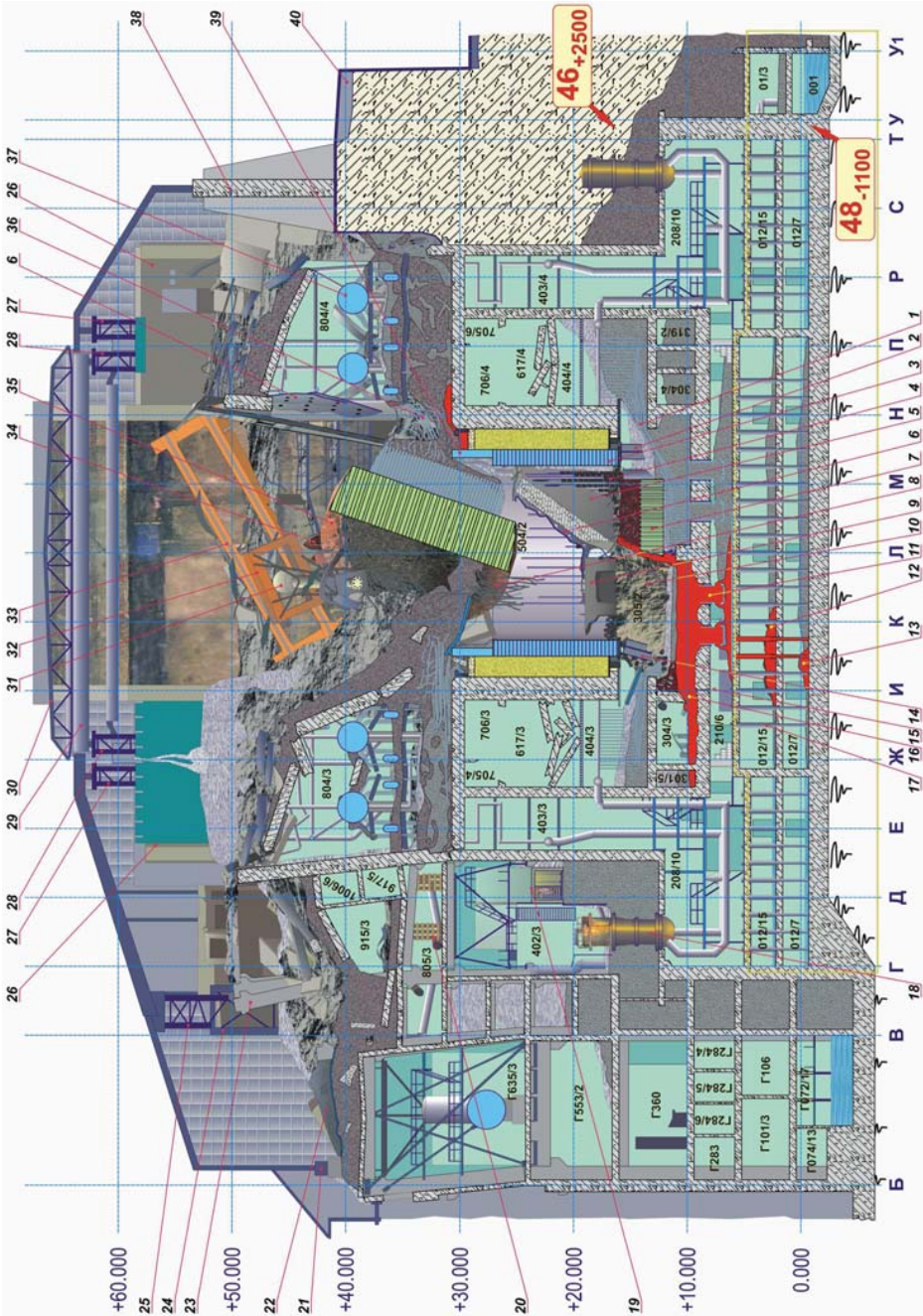
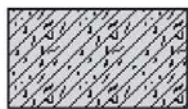


Рис. 16. Объект «Укрытие». Разрез по оси 46⁺²⁵⁰⁰

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.

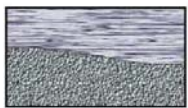
Обозначения материалов:



— железобетон строительных конструкций



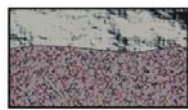
— металлоконструкции



— бетон 1986 года



— песчано-гравийная засыпка



— завал в центральном зале и других помещениях



— завал и ТСМ в помещении 305/2



— ЛТСМ



— вода

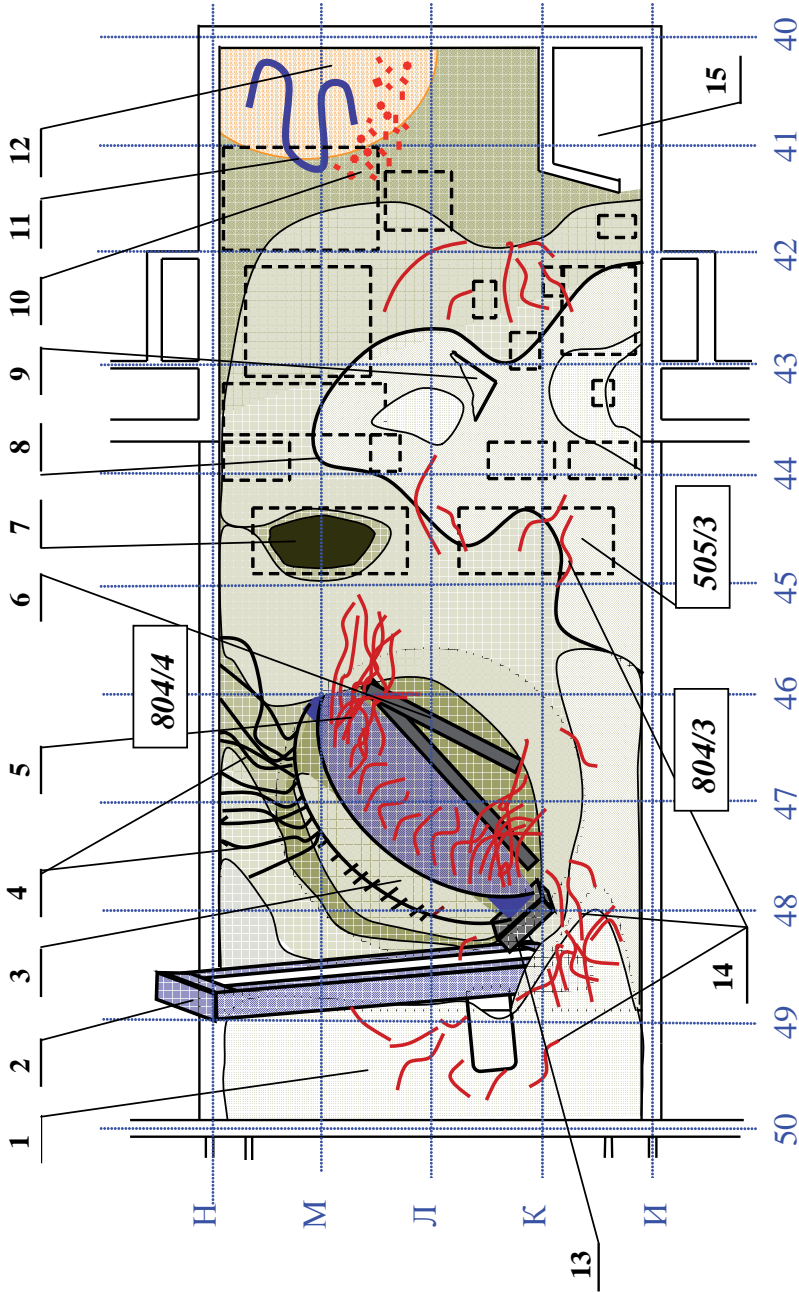


Рис. 17. Схема ЦЗ после аварии. Обозначения: 1 – половая «терраса»; 2 – мост РЗМ; 3 – сх. «Е»; 4 – ПВК; 5 – смятые трубы; 6 – балки перекрытия; 7 – провал в пом. 504/4; 8 – насыпь; 9 – стальной лист; 10 – АЗФ, сброшенные с крыши; 11 – облицовка теплозащиты?; 12 – зона предполагаемого расположения кассет со свежим топливом; 13 – ж/б плита; 14 – ТВС и их фрагменты; 15 – пультовая

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Боровой А.А., Велихов Е.П. К 25-летию аварии на Чернобыльской АЭС. Работы «Курчатовского института» по ликвидации последствий аварии. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2011 г., 129 с.
4. 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.
5. 20 лет участку буровых работ, <http://new.chnpp.gov.ua/news.php?lng=ru&id=6>
6. Ануфриев Б.А., Константинов Е.А., Морозов В.В. и др. Подготовка помещений объекта «Укрытие» для организации работ по бурению скважин в шахту реактора и особенности их проведения. Всесоюзный семинар «Научные проблемы ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС». Звенигород, 15–19 октября 1990 г. Тезисы докладов.
7. Боровой А.А., Лапшин Л.М., Янгүлов А.С. и др. Технология проникновения в аварийный 4-ый блок ЧАЭС. Всесоюзный семинар «Научные проблемы ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС». Звенигород, 15–19 октября 1990 г. Тезисы докладов.
8. Боровой А.А., Огородник С.С., Попов В.Д. и др. Исследовательские скважины объекта «Укрытие». Всесоюзный семинар «Научные проблемы ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС». Звенигород, 15–19 октября 1990 г. Тезисы докладов.
9. Боровой А.А. Мой Чернобыль. Новый мир № 3, 1996 г., с. 132–180.
10. 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. РАДИАЦИОННЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СКВАЖИН

4.1. Измерения дозовых полей

В настоящем разделе мы в основном будем следовать работам [1–4].

Измерения дозовых полей ставили своей главной целью обнаружение скоплений ТСМ в помещениях, в которые проникли скважины, или в близких к ним.

Кроме того, при помощи этих измерений определялась доступность помещений для работы разведывательных групп.

В период наиболее интенсивных исследований с помощью скважин — (1988–1991 гг.) гамма-излучение топлива 4-го блока формировалось за счет средне- и долгоживущих излучателей. Характеристики наиболее интенсивных из них представлены в таблице 1. (см. также рис. 13 Глава 1).

Таблица 1. Характеристики основных γ -активных нуклидов в топливе 4-го блока на момент аварии

	Радионуклид	Период полураспада	Активность общая, Бк	Активность на 1 г урана, Бк
1	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	28,6л	$2,3 \times 10^{17}$	$1,2 \times 10^9$
2	$^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$	368д	$8,6 \times 10^{17}$	$4,5 \times 10^9$
3	^{125}Sb	2,77л	$1,5 \times 10^{16}$	$7,9 \times 10^7$
4	^{134}Cs	2,06л	$1,7 \times 10^{17}$	$8,9 \times 10^8$
5	$^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$	30л	$2,6 \times 10^{17}$	$1,37 \times 10^9$
6	$^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$	284д	$3,9 \times 10^{18}$	$2,1 \times 10^{10}$

На рис. 1 приведены величины относительных вкладов излучения этих элементов в суммарную гамма-активность ядерного топлива в зависимости от времени после аварии. Специально отмечено время начала измерений гамма-полей с помощью скважин (май 1988 г.)

Измерения дозовых полей проводились, главным образом, с помощью ионизационной камеры РД — «Сплав» (рис. 2).

Характеристики РД «Сплав» [5].

- интервалы измерения — от 10 Р/час до до 2×10^5 Р/час;
- время, измерения: максимальное — 1 минута;
- допустимая интегральная доза 10^6 Р при окружающей температуре ниже 40С;
- время непрерывного действия ограничено накоплением допустимой интегральной дозы.

Условия работы.

- окружающая температура — $(-40 \div 150)$ °С;
- относительная влажность — до 100 % при 100 °С;

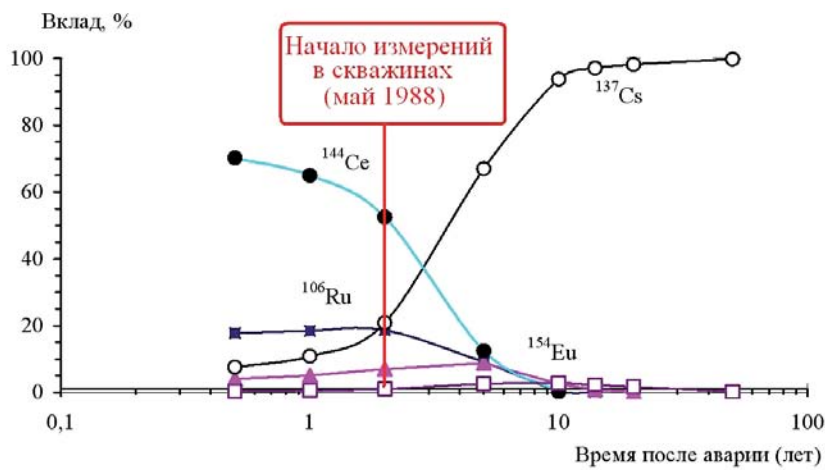


Рис. 1. Относительный вклад излучателей в суммарную γ -активность топлива в зависимости от времени после аварии



Рис. 2. Внешний вид прибора для измерений дозовых полей с помощью камеры «Сплав»

- вибрация с частотой менее 100 Гц и ускорения менее 100 м²/секунд;
- атмосферное давление до 2 атмосфер.

Размеры.

Диаметр — 60 мм, длина — 200 мм, масса — 0,8 кг.

Точность измерений ~20%.

Основным чувствительным элементом РД — «Сплав» для измерений больших величин МЭД (более 10 Р/час) являлась ионизационная камера, выполненная в виде двух коаксиальных цилиндров.

Эта камера вместе со специальной электронной схемой представляла собой релаксационный генератор, частота колебаний которого (ω) была пропорциональна току ионизационной камеры (I). Последний однозначно свя-

зан с мощностью дозы γ -излучения. Таким образом, регистрация МЭД велась по схеме:

МЭД \rightarrow I \rightarrow ω \rightarrow Показания регистрирующего прибора.

До 1992 г. измерения камерами РД «Сплав» были выполнены в ~ 1400 точках внутри скважин.

Изготовители гарантировали десятилетний срок их работы, и этот срок реально выполнялся для камер, работающих в системе «Финиш».

Пример результатов, полученных с помощью РД «Сплав», для двух скважин, пробуренных с западной стороны блока, представлен на рис. 3 и 4.

Из рисунков 3¹ и 4² видно, что в конце скважин радиационные поля резко возрастают и достигают тысяч Р/час.

Обе скважины проходят внутри опорной бетонной плиты — пола пом. 305/2.

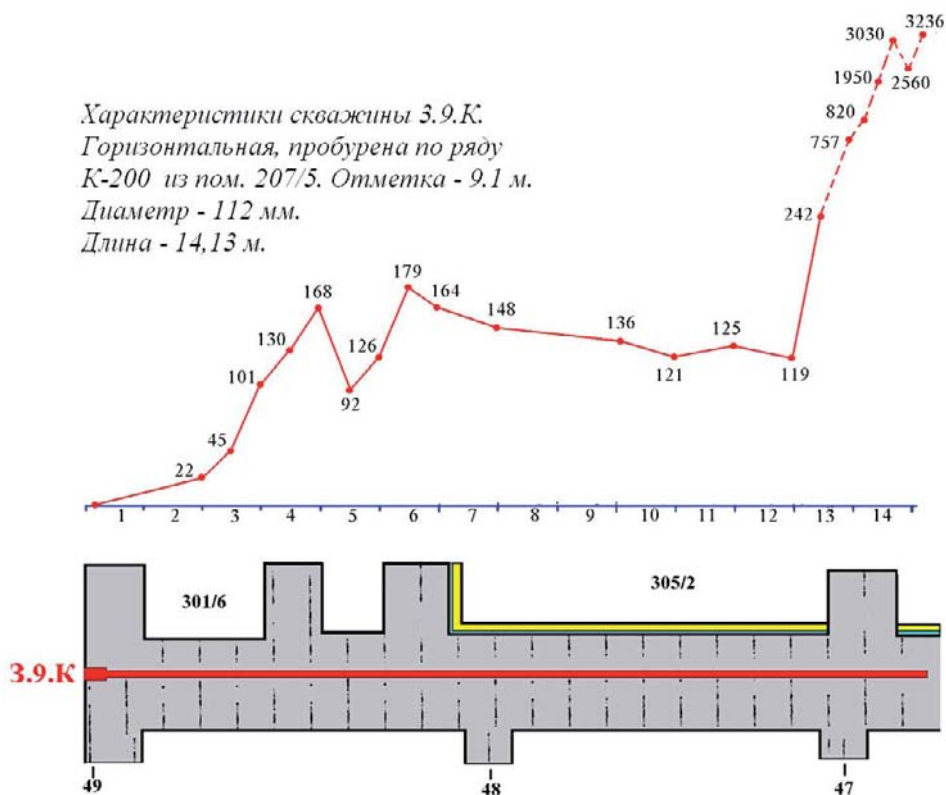


Рис. 3. Измерения мощности дозы (МЭД, Р/час), выполненные в скважине 3.9.К с помощью РД «Сплав» 02.11.88 г.

¹Рисунок взят из рабочего журнала 1988 г. На нем не показан возможный прожег опорной плиты.

²На рис. 4 (2008 г.), согласно современным представлениям, представлено расположение застывших лавообразных ТСМ (красный цвет), прожегших опорную плиту и проникших из помещения 305/2 на нижние отметки здания.

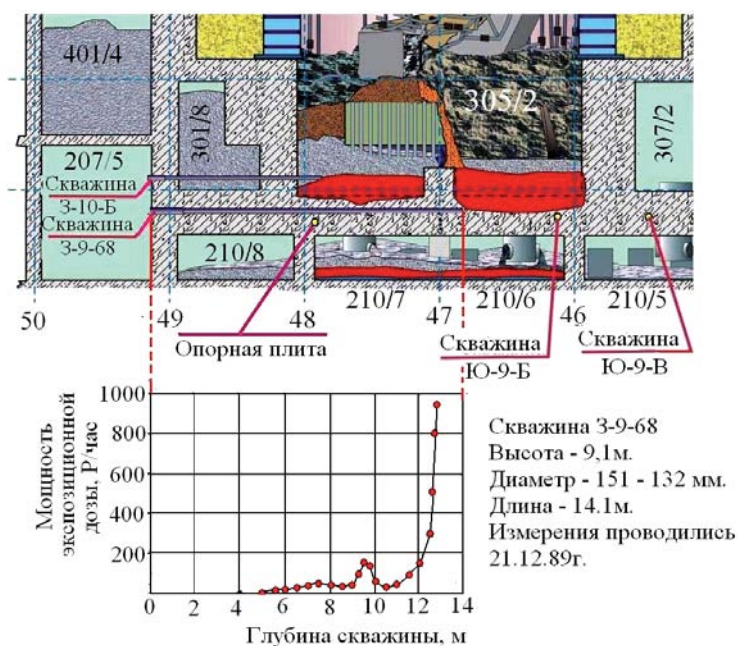


Рис. 4. Измерения мощности дозы (МЭД, Р/час), выполненные в скважине 3-9-68 с помощью РД «Сплав» 21.12.89 г.

Повышение МЭД свидетельствует о том, что топливная лава, скопившаяся в юго-восточном квадранте помещения, прожгла эту плиту на значительную глубину. Именно ее излучение зарегистрировала камера «Сплав» на восточном конце скважины (см. рис. 3 и 4).

Это заключение подтвердили и анализы материала кернов, отобранных при бурении.

Сам процесс бурения обеих скважин пришлось прервать, поскольку топливо стало попадать в извлекаемые керны, их активность возросла и стала превышать контрольные уровни, установленные из соображений безопасности персонала.

Отметим, что данные о большом скоплении ТСМ в юго-восточном квадранте подаппаратного помещения 305/2 нашли свое подтверждение при измерениях МЭД во многих других скважинах, а также при исследованиях тепловых полей с помощью скважин (см. ниже).

4.2. Измерения тепловых полей

В настоящем разделе мы в основном будем следовать работам [1–4].

В 1988 – 1991 гг. остаточное тепловыделение топлива 4-го блока быстро уменьшалось.

Это хорошо видно на рис. 5, на котором представлен график изменения температуры в опорной плите реактора за 1988–1994 гг. (данные взяты из рабочих тетрадей).

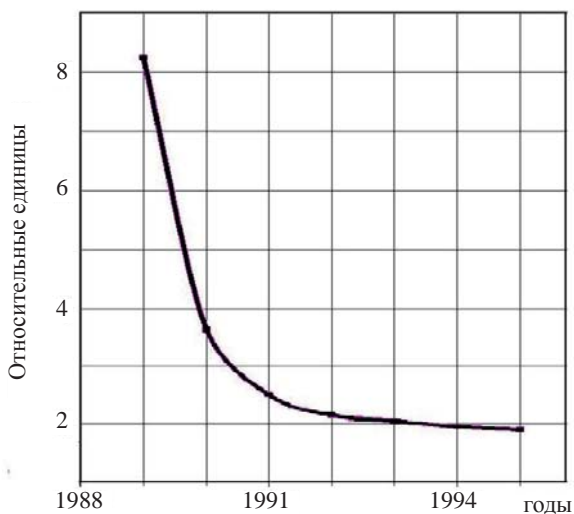


Рис. 5. Динамика изменения температуры в опорной плите реактора за (1988–1994 гг.).

Следующий рис. 6 иллюстрирует расчеты по динамике остаточного энерговыделения топлива за 1988–1991 гг. [6].

При обследовании с помощью скважины использовался специальный тепловой зонд, разработанный и изготовленный специалистами НАН Украины (см. рис. 7).

Конструкция зонда обеспечивала хороший контакт датчиков со стенками скважины в месте измерения. Измерительная схема и чувствительность преобразователей подобраны таким образом, что на цифровом табло переносного прибора В7-35 при переключении тумблера высвечиваются четырехзначные числа, равные значениям температуры в градусах Кельвина и плотности теплового потока в Вт/м.

Вращая зонд вокруг его оси, можно было определить максимум теплового потока. В этом случае перпендикуляр к плоскости регистраторов указывает направление в сторону теплоизлучающего источника.

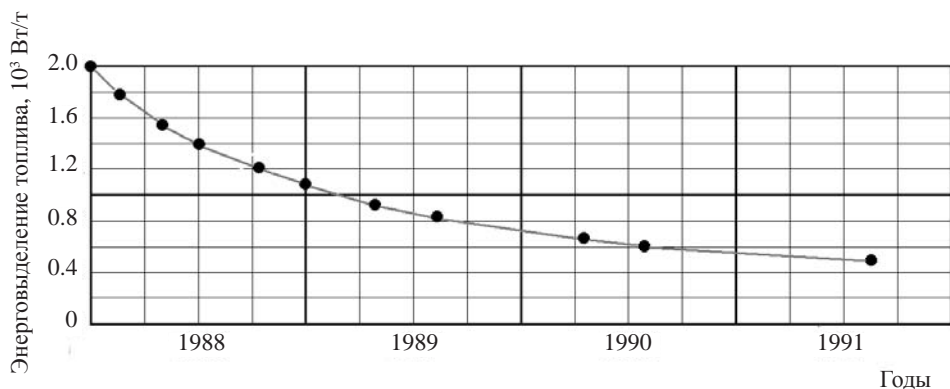


Рис. 6. Остаточное энерговыделение топлива 4-го блока в 1988–1991 гг.



Рис. 7. Подготовка к работе теплотрического зонда для измерений в скважинах

Перемещая оборудование вдоль оси скважины можно было построить эпюру тепловых потоков. Максимум на эпюре располагается в точке находящейся на минимальном расстоянии от излучающего источника.

Характеристики датчиков теплового потока:

диапазон рабочих температур — $(-30 \div 130)^\circ\text{C}$;

максимальный тепловой поток — 10 кВт/м^2 ;

время релаксации при измерении $< 25 \text{ с}$.

Габариты измерительной части теплотрических зондов:

максимальный диаметр — 800 мм;

длина — $(0.75 \div 3.0) \text{ м}$.

Предварительно прибор калибровался в материале с излучением тепла, соответствующим излучению тепла исследуемой массы. Во время тестирования прибора диаметром 60 мм в бетонной массе коэффициент чувствительности — $0.2 \dots 0.5 \text{ мВ/Вт/кв.м}$

На рис. 8 приведены изотермы и направления тепловых потоков, определенные на основании измерений в скважинах опорной плиты (пом. 305/2, 1988–1990 гг.). В качестве измерительного прибора использовался теплотрический зонд.

Полученная картина указывает на то, что основные источники тепла, а следовательно, и основные массы ТСМ, находятся в юго-восточном квадранте подаппаратного помещения.

Впоследствии данные тепловых измерений помогли определить границы распространения ЛТСМ в пом. 305/2 и оценить полное количество топлива, находящееся в этом помещении и шахте реактора (см. Гл. 6).

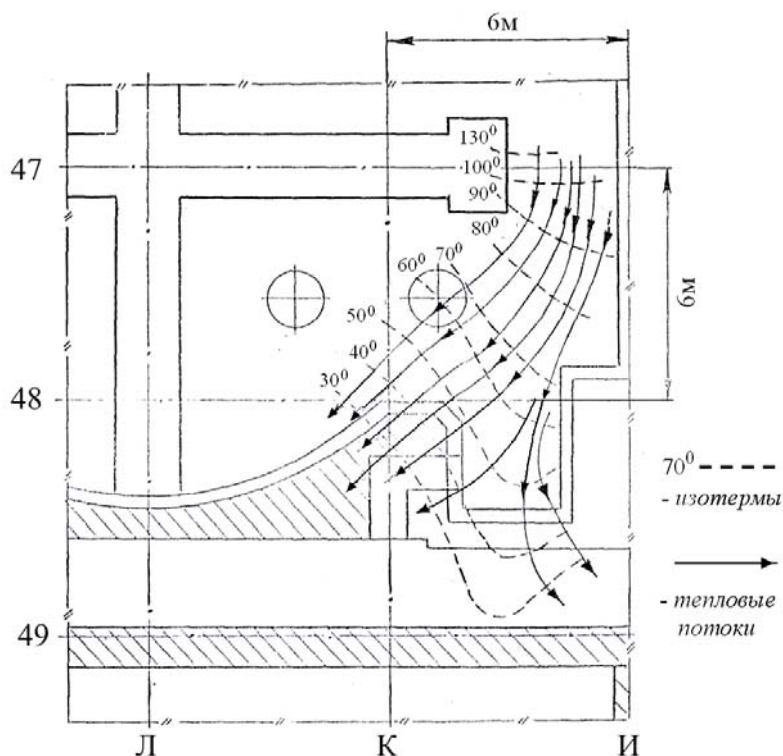


Рис. 8. Изотермы и направления тепловых потоков, полученные на основании измерений в скважинах опорной плиты в юго-западном квадранте пом. 305/2, 1990 г. (рисунок из рабочего журнала)

4.3. Нейтронные исследования

4.3.1. Задачи нейтронных исследований

Систематическое изучение нейтронно-физических характеристик топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» с помощью скважин было начато сотрудниками «Курчатовского института», работавшими в составе НИО КЭ, в марте 1988 г. [7].

Исследования были направлены на решение следующих основных задач:

- поиск больших скоплений ТСМ и изучение их нейтронно-физических параметров, таких, как плотности нейтронных потоков, их спектральные свойства и т.п.;
- оценка глубины подкритичности ТСМ, доступных для проведения измерений;
- создание и обеспечение непрерывного функционирования системы нейтронных детекторов, предназначенных для долговременного контроля нейтронных полей вблизи скоплений ТСМ.

Работы по поиску больших скоплений ТСМ и изучение их нейтронных полей опирались на то, что ядерное топливо 4-го блока имело, в среднем, значительное выгорание и содержало целый ряд спонтанно делящихся трансурановых элементов. В таблице 2 представлены эти элементы.

Таблица 2. Основные характеристики спонтанно делящихся изотопов, находящихся в топливе 4-го блока ЧАЭС [8].

Изотоп	Период полураспада по спонтанному делению, лет	Число нейтронов на деление
U-238	$8,2 \cdot 10^{15}$	1,98
Pu-238	$4,7 \cdot 10^{10}$	2,24
Pu-239	$5,5 \cdot 10^{15}$	2,30
Pu-240	$1,16 \cdot 10^{11}$	2,17
Pu-242	$6,7 \cdot 10^{10}$	2,10
Cm-242	$7,1 \cdot 10^6$	2,48
Cm-244	$1,34 \cdot 10^7$	2,69

Временная зависимость числа нейтронов, излучаемых 1 г топлива (по урану) представлена на графике рис. 9.

Кроме нейтронов от спонтанного деления существовал и второй источник этих частиц. Это – (α –n) реакции, которые идут на ядрах легких элементов, входящих в состав ТСМ. К сожалению, информация об этих нейтронах достаточно неопределенна. Некоторые оценки содержатся в работе [9], где делается вывод, что поток таких нейтронов сравним с потоком нейтронов от спонтанного деления (в 1988 г.).

Оценка глубины подкритичности ТСМ, доступных для проведения измерений, проводилась как пассивными, так и активными методами, о чем будет более подробно рассказано ниже.

Наконец, необходимость создать максимально полную систему контроля и диагностики разрушенного блока, заставляла разработать систему детекторов для долговременного контроля нейтронных полей.

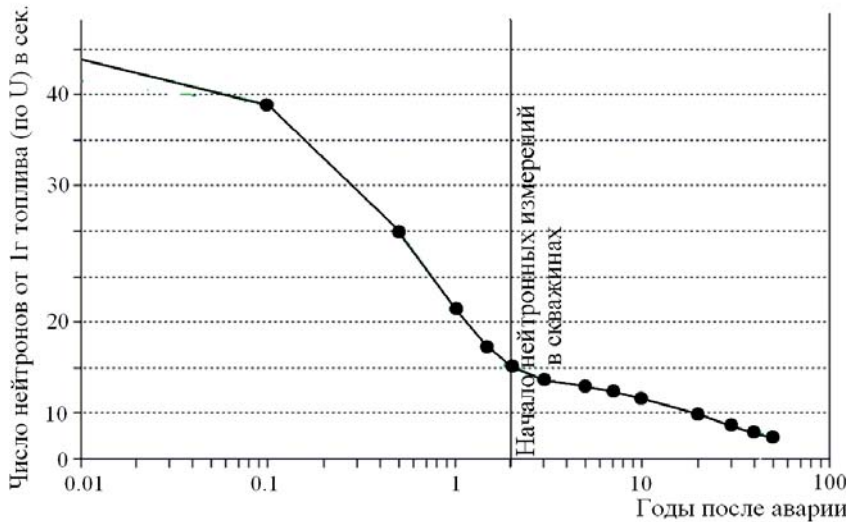


Рис. 9. Число нейтронов спонтанного деления, излучаемых 1 г топлива за 1 с

4.3.2. Выбор детекторов

Специфичность условий, в которых проводилась работа, а также неординарность исследуемого объекта потребовали разработки и создания оригинальных методик проведения исследований.

Прежде всего, выбор собственно детекторов нейтронов. С физической точки зрения они были должны при максимально возможной чувствительности к нейтронам обладать, возможно, более низкой чувствительностью к гамма-излучению.

Конструкционно детекторы не должны были иметь в своём составе элементов, подверженных разрушению в мощных дозовых полях.

Поскольку введение детекторов в ТСМ и прилегающие к ним области чаще всего было возможно только через специально пробуренные к ним скважины диаметром от 60 мм до 150 мм и длиной до 25 м, то первостепенное значение приобрела минимизация их габаритных размеров.

При обследовании ТСМ в помещениях, не оборудованных скважинами, где доставка детекторов к месту измерения была возможна лишь с помощью длинных штанг, большую роль начинал иметь вес детектора.

После испытаний ряда нейтронных счётчиков (СНМ-18 на основе ^3He , камер деления КНК-15, КНТ-31, КНТ-31-1, КНТ-54 и др) в качестве базовых нейтронных детектоов были приняты стандартные камеры деления отечественного производства КНК-15 и КНТ-31. Характеристики камер представлены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики камер, использовавшихся при измерениях

Название	КНТ-31	КНК-15
Диаметр, мм	32	50
Длина, мм	235	259
Материал радиатора	^{235}U (95%)	^{235}U (95%)
Чувствительность к тепл. нейтронам, имп./($\text{н}/\text{см}^2$)	0.25	0.5
Длина чувствительной части, мм	200	176
Толщина радиатора, $\text{мг}/\text{см}^2$	1	1
Площадь радиатора, см^2	500	1000
Газ наполнитель	98% Ar + 2% N_2	96% Ar + 2% N_2 + 2% He
Масса, кг	0.37	0.7

На основе КНТ-31 было разработано три основных типа нейтронных детекторов, которые использовались для различных исследовательских целей:

- сторожевой нейтронный детектор;
- разведывательный нейтронный детектор;
- детектор со съёмными фильтрами.

4.3.3. Сторожевой нейтронный детектор (СНД)

СНД были предназначены для контроля временной стабильности нейтронных потоков и использовались главным образом в системе сторожевых детекторов, контролирующей долговременную стабильность параметров ТСМ.

СНД представляет собой камеру деления КНТ-31, окружённую дополнительным замедлителем из оргстекла толщиной 15 мм. Детектор снабжен перемещаемым кадмиевым чехлом толщиной 1 мм, который может надвигаться на замедлитель и отводиться от него. Чехол движется с помощью электромотора, вращающего ось перемещения. Вся конструкция установлена внутри сварного герметичного кожуха из нержавеющей стали (рис. 10).

Наличие дополнительного замедлителя увеличивает чувствительность камеры и ослабляет ее зависимость от спектра падающих нейтронов. Недостатком детектора является его большой вес (~10 кг) и габариты, затрудняющие его доставку в места расположения ТСМ.

В связи с этим иногда использовался упрощённый вариант СНД без перемещаемого кадмиевого чехла, что позволило уменьшить длину детектора до 350 см.

СНД широко использовались на объекте «Укрытие». Установка камер в местах скоплений ТСМ производилась, в основном, с помощью скважин.

4.3.4. Разведывательный нейтронный детектор (РНД)

РНД был предназначен для оперативных исследований пространственных распределений нейтронных полей, создаваемых ТСМ.

Этот же детектор был применён для прямой экспериментальной оценки глубины подкритичности ТСМ.

РНД представляет собой камеру КНТ-31, помещённую в тонкостенный кожух из нержавеющей стали. На кожух может устанавливаться съёмный кадмиевый чехол толщиной 1 мм.

При небольших габаритных размерах (диаметр 40 мм длина 30 см) вес детектора не превышал 2 кг. Недостатком его являлась сильная зависимость чувствительности от спектрального состава нейтронного поля.

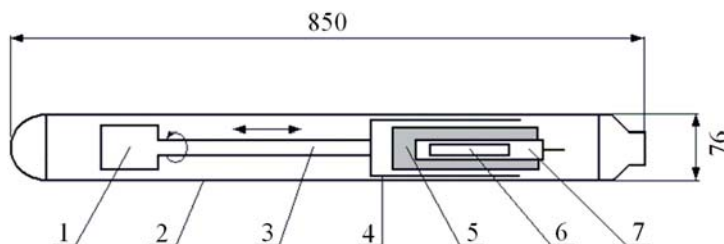


Рис. 10. Схема сторожевого нейтронного детектора: 1 — электродвигатель; 2 — герметичный кожух; 3 — винт перемещения чехла; 4 — кадмиевый чехол; 5 — замедлитель (пластик); 6 — чувствительный объем камеры деления; 7 — камера деления КНТ-31

В особо «горячих скважинах»³ использовался сдвоенный вариант разведывательного детектора, представляющий собой две камеры КНТ-31, помещённые в один кожух длиной 70 см и диаметром 40 мм. Одна из камер постоянно закрыта кадмиевым чехлом. Каждая из них была подключена к автономному предусилителю.

Сдвоенный детектор позволял определять кадмиевое отношение без извлечения детектора из области нейтронного потока.

4.3.5. Детектор со съёмными фильтрами (ДСФ)

ДСФ использовался для оценок спектральных распределений нейтронных потоков. Измерения проводились методом установки на камеру деления фильтров из веществ, эффективно поглощающих нейтроны с сечением $\sim 1/V$, где V — скорость нейтронов.

В выполнявшихся измерениях для поглощения нейтронов использовался мелкодисперсный порошок карбида бора.

Детектор представляет собой камеру КНТ-31, установленную во внутреннее отверстие фильтра, выполненного в виде двух коаксиальных цилиндров, сваренных между собой. Стенки фильтра изготовлены из тонкостенной нержавеющей стали. В пространство между цилиндрами засыпался порошок карбида бора и устанавливался вытеснитель из дюралюминия. Толщина слоя карбида бора регулировалась подбором толщины вытеснителя.

В зазор между КНТ-31 и фильтром при необходимости мог вводиться кадмиевый чехол толщиной 1 мм.

4.3.6. Калибровка детекторов (см. [7])

Плотность потока нейтронов в месте расположения детектора Φ определяется как $\Phi = k \times I$, где I — скорость счета камеры, k — обратная чувствительность камеры, коэффициент равный $1/(N_U \times \langle \sigma \rangle)$; N_U — число ядер ^{235}U в камере; $\langle \sigma \rangle$ — среднее по спектру сечение деления ^{235}U .

Для определения величины k проводилась калибровка детекторов, применяемая в дозиметрии тепловых и быстрых нейтронов. Для калибровки по быстрым нейтронам использовался $\text{Pu}(\text{Be})$ нейтронный источник.

При калибровке по тепловым нейтронам использовался тот же источник, помещавшийся в центр парафиновой сферы диаметром 15 см. Активность источника составляла $0,92 \times 10^6$ н/с ($\pm 10\%$).

При калибровке РНД по тепловым нейтронам величина $k = (6,5 \pm 1,5)$ ($R^4 = 20 \div 30$). При калибровке по быстрым нейтронам величина $k = (600 \pm 200)$ ($R = 1,2$).

Приведенная погрешность в величине k отражает разброс параметров отдельных камер и их порога дискриминации, а также погрешности калибров-

³Скважины, в которых измеренная величина МЭД превышала 50 Р/час.

⁴ R — кадмиевое отношение.

ки, связанные с трудностью учёта нейтронов, рассеивающихся на стенах помещения, воздухе и затем попадающих в детектор. Из приведенных результатов видно, что чувствительность РНД чрезвычайно сильно зависит от спектра нейтронного потока.

Значения k для СНД оказались зависящими от спектра гораздо слабее. Для тепловых нейтронов величина $k = (6,0 \pm 1.5)$ ($R = 5$). Для быстрых нейтронов $k = (28 \pm 3)$ ($R = 1.07$). Меньший разброс значений k связан с наличием чехла – замедлителя. Это дало возможность для оценки величины плотности потока использовать среднее значение $\langle k \rangle = (6 + 28)/2 = 17$.

Поскольку спектры нейтронного потока в любой области разрушенного реактора должны быть заведомо мягче, чем спектр нейтронов от Pu (Be) источника, и жестче, чем спектр тепловых нейтронов, то величина $\langle k \rangle$ может быть использована для определения Φ с точностью до фактора $(2 \div 2.5)$.

Эта оценка возможна при полном отсутствии информации о спектре нейтронного потока в месте измерений. Если же ориентироваться на величину R , получаемую при измерениях с СНД, то точность определения Φ можно улучшить до 50%.

В случае, когда требовалась большая точность данных, использовался детектор со сменными фильтрами.

Измерения с ДСФ были выполнены в реакторном пространстве разрушенного блока и в скважинах 3.15.Г, 3.15.Д, 3.15Ж, и 3.9.Ж.

В реакторном пространстве использовались борные фильтры толщиной 0,065, 0,25, 1, 3 и 9 мм. В скважинах толщина фильтров составляла 1, 3 и 9 мм.

В результате были получены соответствующие зависимости скорости счёта I от толщины d борных фильтров. Обработка полученных зависимостей позволила с помощью специальных программ определить нейтронные спектры, наилучшим образом согласующиеся с экспериментальными данными⁵. После чего рассчитывалось $\langle k \rangle$ для данного спектра.

4.3.7. Исследования ТСМ с помощью «пассивных» нейтронных методов (см. [7, 10, 11])

Под «пассивными» методами подразумеваются такие, при которых регистрируется нейтронное поле собственно ТСМ (они не подвергаются облучению внешними источниками).

Уже первые оценки плотностей нейтронных потоков в доступных областях, где сосредотачивались ТСМ, показали, что по порядку величины они незначительны – около $100 \text{ н}/(\text{см}^2 \times \text{с})$.

С одной стороны, это говорило о глубокой подкритичности топлива в этих областях, с другой стороны, затрудняло исследования в плане определения спектрального состава нейтронных полей и других их характеристик.

Основные результаты измерений нейтронных потоков, проведенных в 1988–90 гг. показаны на рис. 11.

⁵В качестве критерия согласия использовалось среднеквадратичное отклонение расчетных значений от экспериментальных точек.

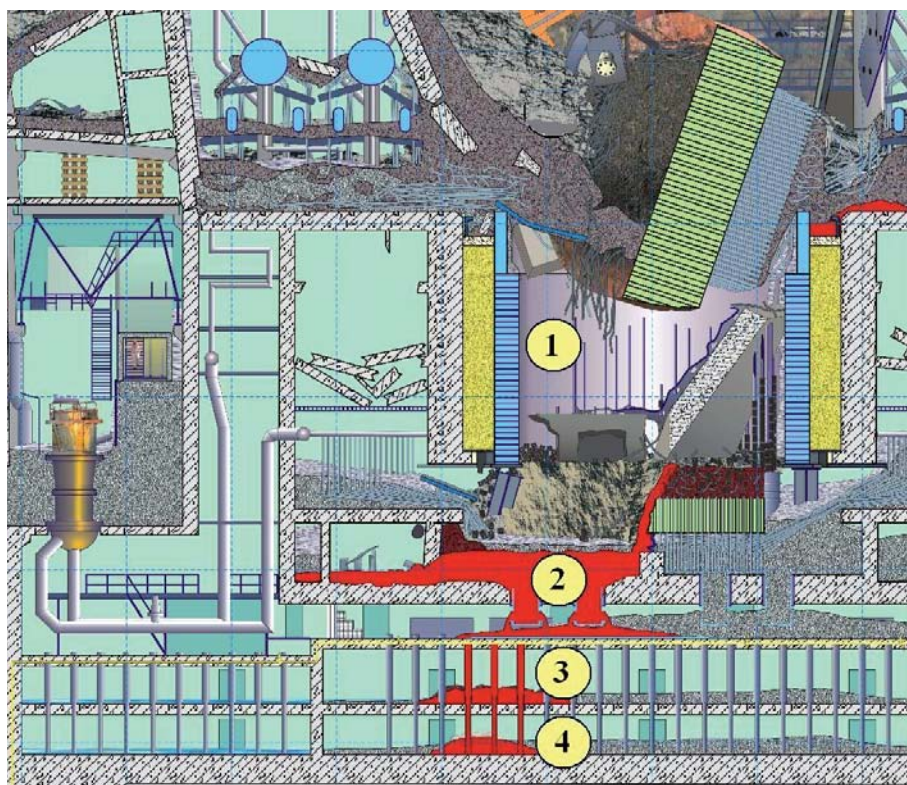


Рис. 11. Потoki нейтронов на различных отметках объекта «Укрытие». Обозначения.

1. Реакторное пространство, отметки +24.000 и +21.000 м.

Плотность нейтронного потока в шахте РП меняется от 80 до 300 н/(см²×с), вклад тепловых нейтронов ~15 н/(см²×с).

Реакторное пространство, отметка +15.000 м.

Пространственное распределение плотности потока нейтронов и их спектральный состав внутри шахты на этой отметке имеет сложный нерегулярный характер, причем вариации наблюдаются на характерных расстояниях (1–1,5) м; плотность нейтронных потоков не превышает 150 н/(см²×с) при вкладе тепловых нейтронов не более 10 н/(см²×с).

2. Пом. 305/2, опорная плита. Скважины на отметках +9.000, +10.000 и +11.000 м.

Из тепловых и гамма измерений было известно, что на этих отметках сосредоточено заметное количество топлива, однако большая часть скважин пробурена лишь до границ скопления топлива, где наблюдаются большие градиенты плотности нейтронных потоков с максимальной величиной потока до 300 н/(см²×с), тепловой поток 20 н/(см²×с).

Внутри топливных масс (скважина 3.9.Ж, в месте ее прохождения через паросбросные клапаны подапаратного помещения) величина плотности полного потока 1400 н/(см²×с) и тепловых нейтронов ~60 н/(см²×с).

3. Помещения парораспределительного коридора. Отметка +6.000.

Основными источниками нейтронов в ПРК являются потоки лавы перед фланцами аварийных парораспределительных клапанов, а также сами клапаны. Максимальная плотность потоков нейтронов здесь ~250 н/(см²×с).

4. Помещения 1-го и 2-го этажей бассейна-барботера. Отметки +0.000 и +3.000м. Около скоплений ЛТСМ в бассейне-барботере потоки достигают 100 н/(см²×с).

Анализ кадмиевых отношений, полученных в областях с повышенным значением потока нейтронов, показал, что термализация нейтронов в этих областях незначительна.

Наблюдаемые потоки нейтронов можно полностью объяснить спонтанным делением радионуклидов в топливных массах без заметного размножения.

Это служило доказательством подкритичности топлива, находящегося в исследованных областях.

В ходе исследований В.И. Морозовым был предложен метод оценки $K_{эфф.}$ на основе определения соотношения $Q_{вын.}/Q_{сп.}$, где $Q_{вын.}$ – скорость генерации нейтронов вынужденного деления единицы объема среды, а $Q_{сп.}$ – скорость генерации нейтронов спонтанного деления единицы объема среды (подробнее см. [7]).

Опираясь на расчетные величины для спонтанного деления (см. раздел 1), были сделаны оценки $K_{эфф.}$ по результатам измерения в скважинах на отметках 9, 10, 11 и 15 м.

Общий вывод – в исследованных областях и в стационарном состоянии ТСМ ядерной опасности не представляют. Топливо в них находится в глубоко подкритичном состоянии (по оценкам $K_{эфф.} < 0.4$).

На рис. 12 для иллюстрации результатов, полученных «пассивными» методами, приведены графики зависимости I, R и Φ от глубины введения нейтронного детектора в скважину 3.9.Е.

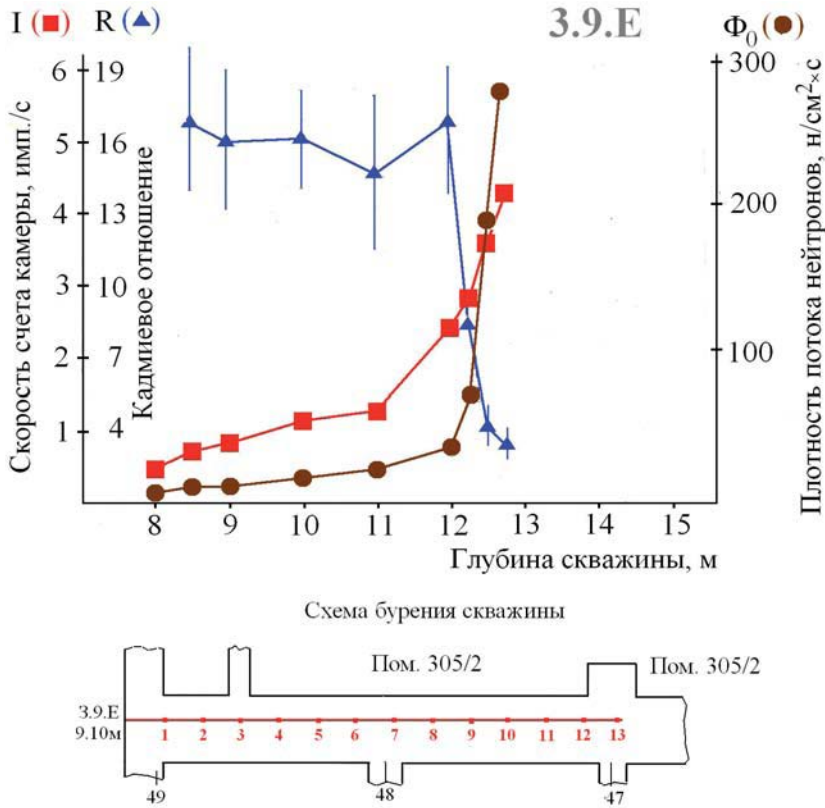


Рис. 12. Графики зависимости I (скорость счета камеры), R (кадмиевое отношение) и Φ (плотность потока нейтронов) от глубины для скважины 3.9.Е и схема ее бурения

4.3.8. Исследования ТСМ с помощью «активного» нейтронного метода (см. [12, 13])

Для «активного» воздействия на среду, при определении величины эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{\text{эфф.}}$, применялся метод «стреляющего источника». В качестве источника нейтронов использовался либо калифорниевый источник интенсивностью $2 \cdot 10^7$ н/сек, либо импульсный генератор нейтронов ТГИ-112 (с трубкой типа ТСП) обеспечивал выход 10^{13} н/имп.⁶ Детектором служила камера КНК-И5.

Сущность метода заключалась в том, что ТСМ какое-то время облучались нейтронами (10–15 мин.), а затем источник быстро убирался (менее чем за 0.5 с) или выключался генератор и регистрировался характер спада нейтронной активности.

После чего с помощью уравнений кинетики реактора в точечном приближении рассчитывался $K_{\text{эфф.}}$ среды.

Общий вывод из экспериментов, в которых определялась величина $K_{\text{эфф.}}$, состоял в том, что в исследованных областях ТСМ ядерной опасности не представляли. Топливо в них находится в глубоко подкритическом состоянии (по оценкам $K_{\text{эфф.}} < 0.7$).

Эти выводы были приведены в работе «Техническое обоснование ядерной безопасности объекта Укрытие» [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Borovoi A.A. Analytical Report (Post-Accident Management of Destroyed Fuel from Chernobyl), IAEA, Work Material, 1990, p. 1–99.
2. 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.
3. 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.
4. Боровой А.А., Велихов Е.П. К 25-летию аварии на Чернобыльской АЭС. Работы «Курчатовского института» по ликвидации последствий аварии. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2011 г., 129 с.
5. Отчет по гамма-камерам «Сплав». Отчет ОГ ИАЭ им. И.В. Курчатова, № 124-01/111 от 22.10.87 г., 6 с.
6. Боровой А.А., Довбенко А.А., Смолянкина М.В., Строганов А.А. Определение ядерно-физических характеристик топлива 4-го энергоблока ЧАЭС. Отчет ИБРАЭ АН СССР, 52/11-20, Москва, 1991, 63 с.
7. 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.

⁶Частота запуска генератора варьировалась в диапазоне (10–30) Гц.

8. 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.
9. Ананич Н.И., Герасько В.Н., Гульник С.И. и др. Вклад реакций (α , n) в выход нейтронов в ЛТСМ 4-го энергоблока ЧАЭС. Препринт МНТЦ «Укрытие» № 97-2, Чернобыль, 12 с.
10. Бондаренко Л.Н., Боровой А.А., Васильев А.А. и др. Исследование характеристик нейтронных потоков на 4 блоке ЧАЭС. ВАНТ, Серия: общая и ядерная физика, Харьков, 1990 г. стр. 136–138.
11. Беляев С.Т., Бондаренко Л.Н., Боровой А.А. и др. Нейтронные исследования на объекте «Укрытие». Март 1988 г. — август 1990 г. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова, № 5313/3, Москва, 1991, 50 с.
12. Лебедев Г.В. и др. Разработка методики и результаты измерений подкритичности ТСМ объекта «Укрытие», Отчет, № 35/1–117–88.
13. Арсеньев И.Г., Бродкин Э.Б., Волынкин М.С., Лебедев Г.В. Результаты нейтронно-физических исследований ТСМ в ПРК объекта «Укрытие». Отчет КЭ при ИАЭ № 11.07-06/74, Чернобыль, 1989 г., 5 с.
14. Беляев С.Т., Боровой А.А., Волков В.Г. и др. Техническое обоснование ядерной безопасности объекта Укрытие. КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова, Чернобыль, 1990 г., 160 с.

5. ЛАБОРАТОРНЫЕ АНАЛИЗЫ МАТЕРИАЛОВ КЕРНОВ

5.1. Общая схема выполнения анализов

Из кернов, извлеченных при бурении, отбирались образцы, которые проходили предварительную подготовку в лаборатории, находящейся непосредственно на объекте «Укрытие»¹.

Сначала проходила паспортизация образцов, указывалось место и условия отбора, описывался их внешний вид. Затем образцы взвешивались на аналитических весах и после этого полностью растворялись в смеси азотной и плавиковой кислот.

С целью минимизации количества активности, вывозимой с объекта, проводились первоначальные измерения спектров и интенсивности гамма-излучения растворов. На основе полученных результатов отбиралось необходимое их количество.

Последующая обработка проб проходила в лаборатории, расположенной в Чернобыле.

Общая схема выполнения анализов приведена на рис. 1.

На рис. 2 и 3 приведены фотографии лаборатории КЭ в г. Чернобыле.

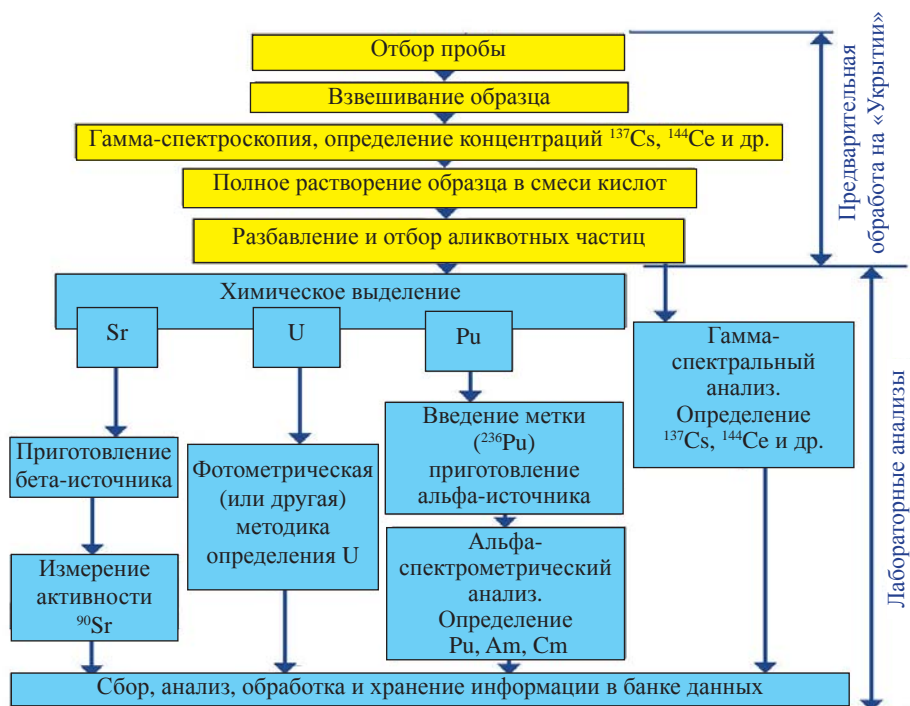


Рис. 1. Общая схема проведения анализа образцов, взятых на объекте «Укрытие»

¹Аналогичную процедуру проходили и другие образцы в виде твердых крупинок, порошков и т.п., отобранные в помещениях «Укрытия».



Рис. 2. Лабораторный корпус в г.Чернобыль. Лаборатории начали проводить анализы образцов кернов в 1988 г.



Рис. 3. Проведение радиохимического анализа в лаборатории г. Чернобыль

5.2. Лабораторные анализы (радиохимия, спектрометрия) (см. 1–5)

В лаборатории, после удаления фтор иона упариванием с азотной кислотой, соли растворяли в азотной кислоте (7N). Раствор переносили в мерную колбу и доводили до определенного объема. Этот проградуированный по объему раствор (исходный раствор) использовался для проведения количественного анализа по определению содержания в образцах радионуклидов: осколков деления, урана и трансурановых элементов.

После определения концентрации в образце ^{144}Ce проводили оценку ожидаемого содержания стронция, урана и плутония в исследуемой пробе по эмпирическим корреляционным коэффициентам (см. ниже).

Полученные таким образом оценки использовались для определения объема аликвот, в которых напрямую определялось содержание стронция, урана и плутония.

Методы определения урана, плутония и других трансурановых элементов в течение прошедших лет постоянно изменялись и совершенствовались, поэтому ниже приводятся только несколько примеров таких методов.

Плутоний.

Для определения концентрации плутония в образцах ЛТСМ, в основном, применялся метод экстракции его из пробы 10%-м раствором триоктиламина (ТОА) в о-ксилоле с последующей альфа – спектрометрией.

Уран.

Среди методов определения урана использовались следующие.

Корреляционный гамма-метод (КГМ) – косвенный метод количественного определения содержания урана в образцах ТСМ по измеренной интенсивности гамма-излучения ^{144}Ce . Метод пригоден для случаев, когда уран, трансурановые и редкоземельные элементы связаны общей топливной матрицей (находятся в составе топливных частиц). В этом случае можно использовать расчетное отношение концентрации урана к содержанию ^{144}Ce в топливе 4-го энергоблока ЧАЭС.

Для образцов топлива с малым выгоранием и при воздействии процесса выщелачивания урана из ТСМ результаты, полученные КГМ, будут занижены.

Фотометрический метод (ФММ)

Этот метод основан на способности урана образовывать окрашенный комплекс с Арсеназо-3. Точность определения урана этим методом лежит в интервале $(1 \div 5)\%$. Предел обнаружения при использовании фотометра составляет $0,01\text{--}0,02$ мкг/мл.

Лазерно-люминесцентный метод, основанный на способности атомов U(VI) генерировать излучение в видимой части спектра с длиной волны 530 нм (зеленое свечение) под влиянием коротковолнового излучения, лежащего в ультрафиолетовой части спектра².

Относительная погрешность определения концентрации урана (при доверительной вероятности 0.95) составила $\pm 15 \div 20\%$ (отн.).

Исследования гамма-спектров.

Такие исследования (растворов образцов, аликвотных проб и т.п.) проводились на полупроводниковом гамма-спектрометре с Ge(Li) -детектором.

Разрешение прибора составляло около 3,5 кэВ для линии ^{60}Co с $E = 1332$ кэВ.

Градуировка спектрометра (определение эффективности регистрации гамма-квантов) для «точечных» источников осуществлялась с помощью образцовых гамма-источников (ОСИ) в диапазоне энергий от 60 до 1500 кэВ.

²Для возбуждения люминесценции UO_2^{2+} применялся импульсный азотный лазер ИЛГИ-503 с трубкой ТЛГИ-1. Характеристическая спектральная линия урана (530 нм) выделялась посредством монохроматора МЛД-12. В качестве матрицы применялся 15% раствор полисиликата натрия в воде.

Для «объемных» образцов эффективность регистрации гамма-квантов определялась с использованием источников различных «стандартных» геометрических форм и размеров с «чернобыльским» радионуклидным составом. Обработка результатов измерений проводилась на персональных компьютерах по программе WALL.

Исследования альфа-спектров.

Измерения альфа-спектров исследуемых образцов ЛТСМ, как правило, проводились на альфа-спектрометре ALPHA-KING 676A фирмы EG&G ORTEK³. По паспортным данным собственное энергетическое разрешение спектрометра в диапазоне энергий альфа-частиц 4–7 МэВ составляет 20 кэВ.

В лаборатории в Чернобыле калибровка альфа-спектрометра по энергии и эффективности регистрации проводилась с помощью образцовых источников альфа-излучения ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm , изготовленных фирмой AMERSHTM. Полученное энергетическое разрешение составило 30 кэВ.

Особенностью методики альфа-спектрометрии является зависимость энергетического разрешения спектрометра от качества (в первую очередь, толщины) приготовления альфа-образца. Энергетическое разрешение, достигаемое при работе с образцами, изготовленными в описываемых условиях, было не лучше 40 кэВ, что не дает возможность разделить пики ^{239}Pu и ^{240}Pu в измеренных альфа-спектрах.

Таким образом, использование альфа-спектрометрии давало возможность определить величину альфа-активности ^{238}Pu , а также суммарную активность излучения изотопов ^{239}Pu и ^{240}Pu .

В ряде случаев, когда необходимо было знать абсолютную альфа- или бета-активность приготовленных источников, использовались газоразрядные проточные детекторы заряженных частиц. Обе установки (разработка КИ и УДИС-ОЗП), а также методика измерений на них были метрологически аттестованы.

5.3.3. Лабораторные анализы (элементные анализы)

Химический элементный анализ образцов ЛТСМ проводился эмиссионно-спектральным методом на установке, смонтированной на базе спектрографа СТЭ-1. Выбор спектрографа определялся высокой светосилой (относительное отверстие 1:15), высокой разрешающей способностью (работа в 4-м и 5-м диапазоне дифракции).

Возбуждение спектра образца осуществлялось в дуге переменного тока с помощью генератора дуги ДГ-2.

Перед выполнением анализа в горячей камере проба ТСМ массой 0,2–0,3 г размельчалась в стальной ступке и затем, после усреднения, 50–100 мг порошка растиралось в агатовой ступке до состояния пудры.

³Поскольку альфа-активность образцов ТСМ обычно на 3–4 порядка ниже их гамма-активности, для измерения альфа-спектров изотопов Pu требуется специальная подготовка образцов, заключающаяся в радиохимическом выделении Pu (о чем упоминалось выше).

На аналитических весах отбиралась навеска 10 мг, смешивалась с буферной смесью, содержащей носитель и угольный порошок. Далее смесь растиралась во фторопластовой ступке.

Размельченная проба, смешивалась с носителем общей массой 30 мг. В качестве носителя применялся фторид висмута.

Регистрация спектра производилась с помощью фотопластинок типа СП-1.

Фотометрирование спектральных линий производилось посредством микрофотометра МФ-2 при ширине рабочей щели 0,3 мм и высоте щели 10 мм. Условия съемки: сила тока дуги – 14 А, время экспозиции 30 с. Относительная погрешность определения концентраций элементов (при доверительной вероятности 0.95) составила $(15 \div 20)\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Analytical methods in nuclear fuel cycle. IAEA, Vienna, 1972., Safeguards techniques. Vol. 2, IAEA, Vienna, 1970.
2. Квасницкий И.Б., Кочергин С.М., Обухова Л.А. и др. Отчет КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова № 11.07/117 от 18.03.91.
3. Pella F.S., Bachman A. Anal. Chim. Acta, 47, IBI, 1069.
4. Кулаков В.М. и др. Отчет ИАЭ №50.05/41 1988 г.
5. Богатов С.А., Лисин С.К., Никулин С.А., Обухова Л.А. и др. Отчет КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова № 11.07/30 от 30.04.90 г.

6. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗОВАВШИЕСЯ ПОИСКОВЫМИ ГРУППАМИ В 1988–92 гг.

Параллельно с исследованием недоступных помещений «Укрытия» с помощью скважин в 1988–1992 гг. специалисты КИ, РИ, других институтов, работавших на базе КЭ, продолжали поиски и изучение скоплений ядерного топлива в составе отдельных групп.

Ряд методов, применявшихся для этого, будет описан в настоящем разделе.

6.1. Континуальные дозиметрические шнуры

В 1988–1991 годах группой исследователей из «Курчатовского института» под руководством А.Ф. Усатого (см. [1–2] и ссылки в них) посредством континуальных дозиметрических шнуров были проведены масштабные исследования гамма-полей в центральном зале.

В результате проведенной работы удалось выяснить распределение наиболее интенсивных источников гамма-излучения в ЦЗ и связать их с крупными скоплениями топлива на (или вблизи) поверхности завалов.

Метод континуальных шнуров для измерения пространственных гамма-полей был разработан в Отделении ядерных реакторов КИ.

Сами шнуры состояли из распределенных регистрирующих элементов и (или) цепочек дискретных детекторов. При экспозиции в гамма-поле в материале шнуров возникают радиационные дефекты с концентрацией пропорциональной накопленной дозе¹. Для регистрации этих дефектов использовался метод электронного парамагнитного резонанса.

Использовавшиеся детекторы состояли из континуальной дозиметрической основы в виде стеклянного шнура, дублирующей ее несущей части из полимерной струны или шпагата и контрольных дискретных колечек из специального силикатного стекла, распределенных с определенной скважностью (чаще всего – 1 м).

Контрольные колечки обертывались алюминиевой фольгой для обеспечения электронного равновесия и коррекции хода с жесткостью гамма-излучения.

Весь шнур помещался в гибкую полимерную трубку (ПВХ), которая обеспечивала защиту датчиков от радиоактивного загрязнения и от воздействия быстрых электронов.

Калибровка показаний датчиков производилась в известных полях гамма-излучения ^{60}Co и ^{137}Cs . Окончательно сложившаяся процедура измерения со-

¹В зависимости от выбранного типа рабочего материала регистрируются неспаренные электроны, возникающие в результате облучения при стабилизации свободных электронов в ловушках или вакансиях (неорганические материалы), или свободные радикалы, образующиеся при разрыве химических связей (органические, в том числе полимерные материалы).

стояла в обмере пронумерованных контрольных колец (точность $\pm 7\%$, чувствительность по накопленной дозе около 1000 Рад).

Потребность в детализации хода накопленной по длине шнура дозе возникла примерно в 10% случаев, когда наблюдалась резкая пространственная неоднородность поля излучения.

КДШ были опущены в центральный зал объекта «Укрытие» через технологические люки. Это позволило измерить гамма-поле в области размером $40 \times 40 \times 70$ м, локализовать несколько высокоинтенсивных гамма-источников и оценить их изотопный состав.

На рис. 1 приведена фотография кровли, а на рис. 2 схема опускания КДШ через технологические люки в кровле центрального зала.



Рис. 1. Расположение технологических люков в кровле центрального зала, через которые опускались КДШ

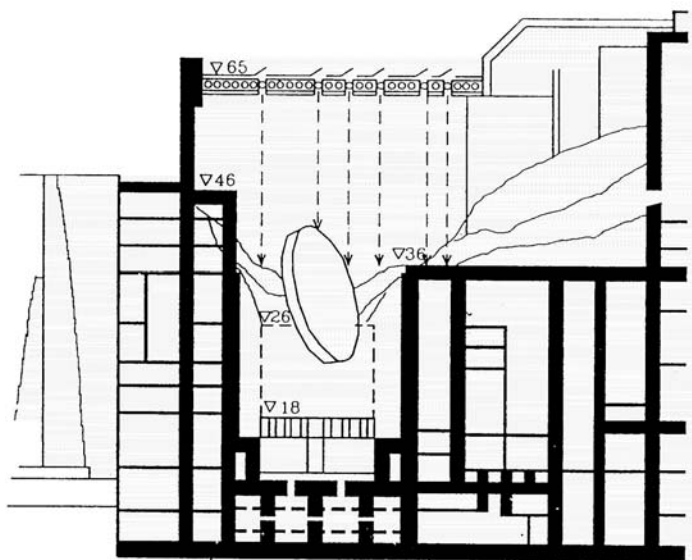


Рис. 2. Схема опускания КДШ через технологические люки в кровле центрального зала

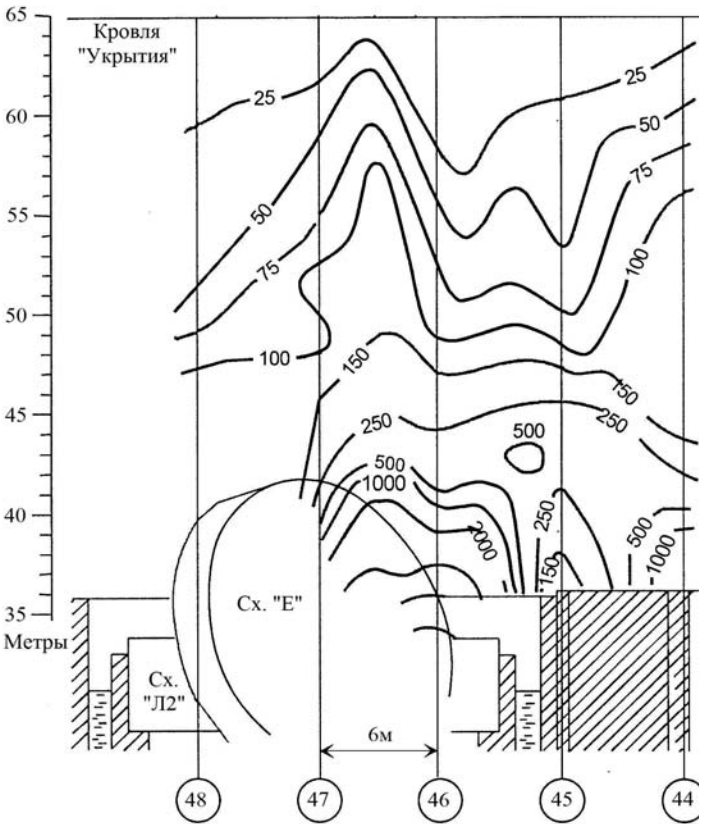


Рис. 3. Построенное на основании измерений с КДШ поле гамма-излучения. Вертикальное сечение по оси «Л». Цифры у кривых – мощность экспозиционной дозы в Р/ч. Измерения проведены в 1988 г.

На рис. 3 дано вертикальное сечение (по оси «Л») гамма-поля в центральном зале. Измерения проводились в 1988 г.

На рис. 4 приведены результаты измерений МЭД (с помощью КДШ) на поверхности развала в центральном зале.

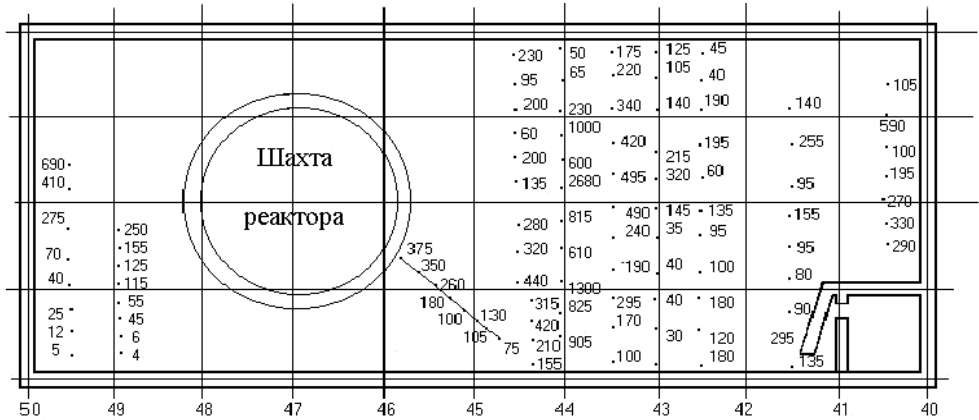


Рис. 4. Измерения величин мощностей экспозиционной дозы (Р/ч) в ЦЗ, проведенные в 1988 г. с помощью непрерывных дозиметрических шнуров

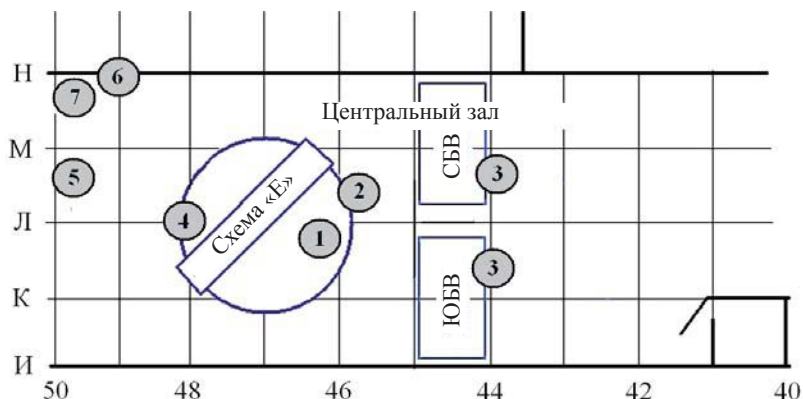


Рис. 5. Схема расположения источников сильного гамма-излучения в центральном зале и их предполагаемая активность: 1 — около 70 ККи; 2 — около 40 ККи; 3 — (10–20) ККи; 4 — около 100 ККи; 5 — ?; 6 — около 50 ККи; 7 — около 20 ККи

Проведенные измерения позволили (дополнительно используя фото- и видеосъемку ЦЗ) восстановить местоположение и активности основных источников гамма-излучения в центральном зале. Оказалось, что основных дозобразующих источников — семь.

На рис. 5 приведены результаты этого восстановления.

6.2. Коллимированный гамма-детектор

Другим примером применяемых методов исследования может служить работа, выполненная сотрудниками РИ, КИ и ЧАЭС по оценке количества топлива, сосредоточенного на верхней биологической защите (схеме «Е») в центральном зале разрушенного 4-го блока [3] (см. рис. 6).

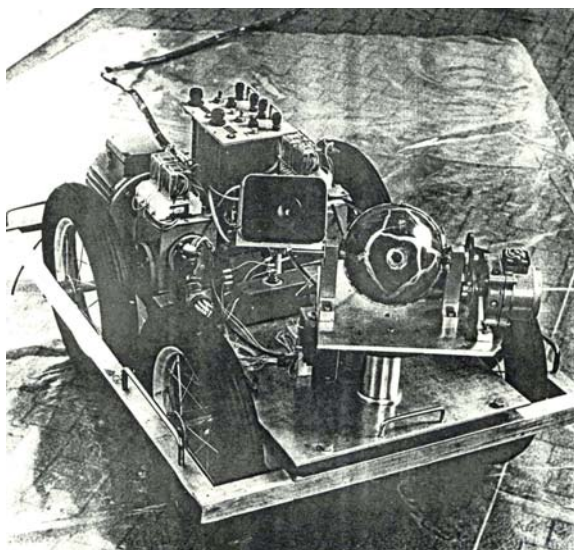


Рис. 6. Дистанционно-управляемый комплекс с коллимированным гамма-детектором, применявшийся для определения количества топлива в районе схемы «Е» (центральный зал)

В ходе этой работы были развиты экспериментальные и расчетные методы дистанционного определения количества ядерного топлива, основанные на регистрации его гамма-излучения. Создана оригинальная аппаратура, ориентированная на экстремальные условия проведения измерений.

Условия работы в центральном зале (высокие радиационные поля, сложный рельеф поверхности, обусловленный разрушениями и т.п.) диктовали достаточно жесткие требования к характеристикам созданной установки:

- управление установкой и проведение измерений должны были быть дистанционными;

- измерительная система должна была обладать работоспособностью в полях в сотни Р/ч, а конструкция коллиматора — обеспечивать надежное выделение «полезного» сигнала от удаленных источников гамма-излучения при высоком радиационном фоне;

- должна была быть обеспечена возможность ориентации коллимированного детектора в широком диапазоне углов с четким измерением этой ориентации, а также привязка результатов гамма-сканирования и визуальных (телевизионных) наблюдений;

- система в целом должна была иметь достаточно малые габариты и вес, обеспечивая в случае необходимости возможность ее ручной транспортировки.

В работе применялась регистрирующая система, выполненная на основе полупроводникового поверхностно-барьерного детектора с диаметром чувствительной зоны 5 мм и глубиной ~400 мкм. Его защита была выполнена в виде свинцовой сферы с эффективным радиусом 48 мм. Система цилиндрических отверстий обеспечивала угол коллимации, равный 7°.

Регистрирующая система помещалась на самоходной платформе и была связана с блоком регистрации кабелем длиной 150 м. Она находилась в помещении с приемлемым уровнем радиации.

Система горизонтального и вертикального поворота детектора обеспечивала сканирование в широком диапазоне азимутальных углов и углов места с шагом в 2.8° — по вертикали и 3.5 — по горизонтали.

Соосно с гамма-детектором на тележке была установлена телевизионная камера.

Платформа управлялась по тому же 150 метровому кабелю. При необходимости могла осуществляться и ручная транспортировка комплекса.

Место размещения дистанционного комплекса, обеспечивающее максимальный обзор западной стороны ЦЗ и максимально приближенное к схеме «Е», было выбрано на потолочном перекрытии заваленного обломками конструкций южного барабан-сепаратора (между осями 45 и 46, ряд «И», см. рис. 7).

Был разработан оптимальный маршрут доставки дистанционного комплекса к месту измерений, обеспечивающий минимальные дозовые нагрузки на персонал. Дистанционный комплекс перемещался в точку измерений с использованием самоходной тележки, а в труднопроходимых местах (лестницы, завалы и т.п.) — вручную.

Сканирование по вертикальным и горизонтальным углам проводилось в направлении, перпендикулярном плоскости схемы «Е». «Поле зрения» коллиматора на поверхности схемы «Е» представляло собой круг с диаметром ~2 м.



Рис. 7. Фото верхних отметок разрушенного 4-го блока. Отмечено место расположения коллимированного детектора

Калибровка детектора проводилась с помощью практически точечного фрагмента топливной таблетки, создающего МЭД гамма-излучения 1.4 Р/ч на расстоянии 10 см.

Запись изображения с телевизионной камеры осуществлялась на видеоманитофон, на который записывались также результаты измерений регистрирующей аппаратуры.

Одновременно с этим из точки измерений была проведена панорамная фотосъемка западной части центрального зала (см. рис. 8).

Съемка велась из точки, находящейся вблизи расположения коллимированного детектора (см. рис. 1). Показан размер «поля зрения» коллиматора на схеме «Е».

Сканирование позволило установить, что наиболее интенсивным источником гамма-квантов является хаотическое нагромождение технологических



Рис. 8. Фрагмент панорамной фотографии части центрального зала со схемой «Е»

каналов, начинающееся выше и правее геометрического центра схемы «Е». Это может быть объяснено наличием остатков топлива в этих каналах.

При этом, несмотря на экранирование металлоконструкциями рухнувшей разгрузочно-погрузочной машины, интенсивности потоков гамма-квантов, связанных с излучением заэкранированной поверхности, сравнимы по величине с незаэкранированными областями.

На рис. 9 представлены в относительных единицах (карта изосчетностей) результаты сканирования области расположения схемы «Е».

После проведения достаточно сложной обработки экспериментальных данных авторы пришли к следующим выводам:

«Если потоки гамма-квантов, зарегистрированные детектирующим устройством, связаны с топливом, то его количество равно (10–36) тонн.

Нижняя величина — 10 тонн — получена из обработки результатов с использованием метода Монте-Карло в предположении, что все топливо сосредоточено в тонком слое.

Верхняя оценка — 36 тонн — получена в предположении, что коллимированным детектором «просматриваются» неповрежденные кассеты».

При этом сами авторы считают, что последний вывод предпочтителен.

6.3. Оценка количества топлива в подаппаратном помещении 305/2

В 1988 гг. был разработан план, согласно которому мог быть измерен полный тепловой поток, выходящий из подаппаратного помещения, однозначно связанный с массой топлива, находящегося в нем.

Для его осуществления требовалось определить два основных потока тепла, идущие вниз и вверх из этого помещения, поскольку согласно расчетам потоки через боковые стены были существенно меньше.

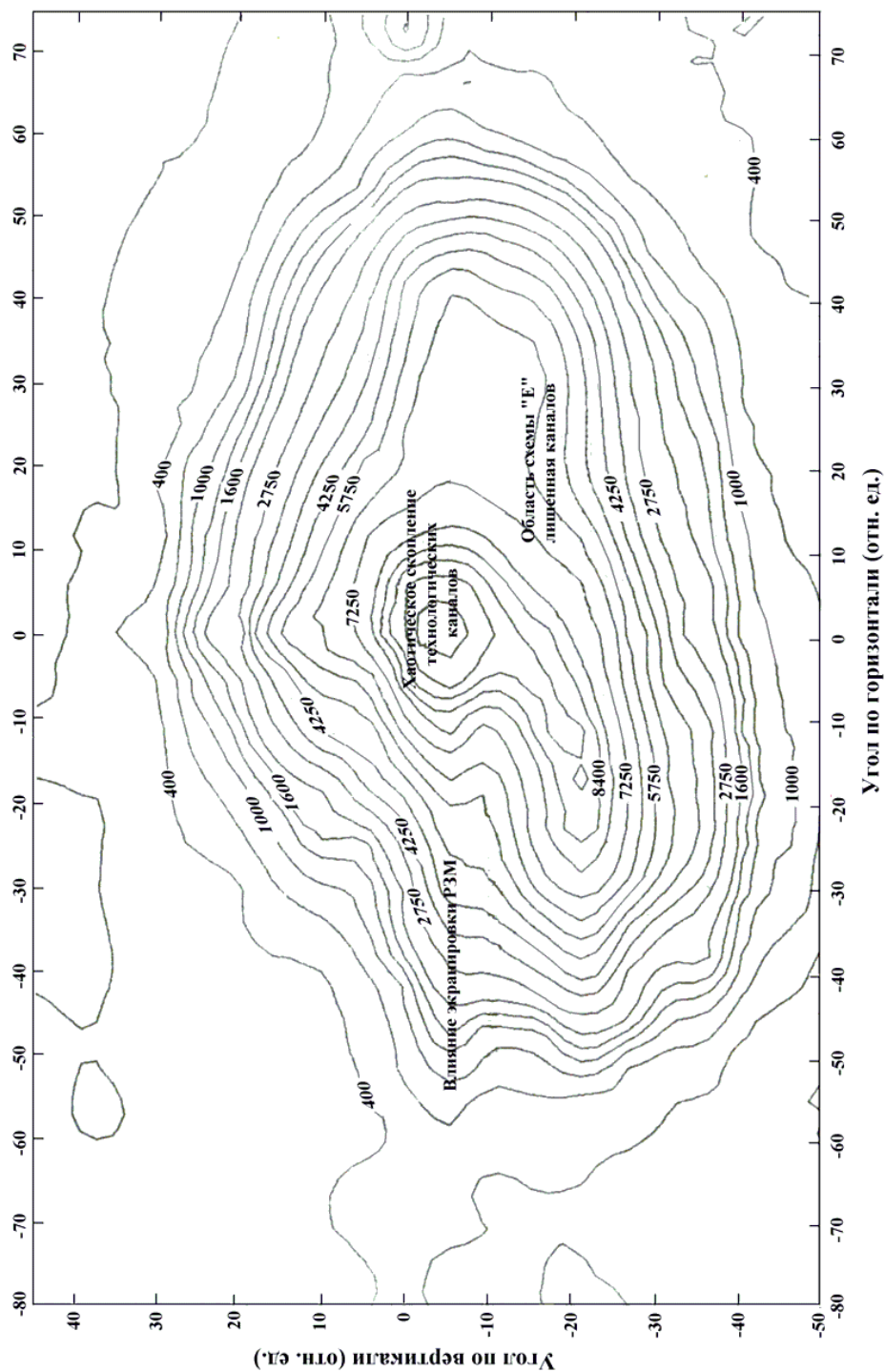


Рис. 9. Карта изосчетностей, построенная по результатам экспериментальных измерений — сканирования области схемы «Е»



Рис. 10. Фрагмент разреза 4-го блока по ряду К (в осях 50—45). Показаны скважины, проходящие в этом сечении в опорной плите

Снизу скопление ТСМ в этом помещении охлаждается путем теплопроводности через опорную бетонную плиту и далее — через помещения ПРК (210/8÷210/5) и другие нижние помещения 4-го блока (см. рис. 10 — фрагмент рис. 16, гл. 3).

Сверху охлаждение происходит за счет потоков воздуха, которые спускаются из центрального зала через шахту реактора к верхней поверхности завала на полу пом. 305/2.

Они охлаждают эту поверхность и затем поднимаются опять через шахту реактора в центральный зал и далее в атмосферу.

Определение величины тепловых потоков, идущих вниз, было сделано на основании измерений в скважинах (см. гл. 4)

Кроме того, в целом ряде мест было необходимо провести измерения тепловых потоков непосредственно на поверхности потолка ПРК (т.е. нижней поверхности опорной плиты).

Для этого в ИПЭ АН УССР были сконструированы и изготовлены оригинальные переносные зонды (рис. 11 а и 11 б).

Каждый из них представляет собой легкую телескопическую штангу, на конце которой с помощью шарнирного соединения был закреплен измеритель (преобразователь) теплового потока и температуры.

Измерительная схема была подобрана таким образом, что на цифровом табло переносного прибора В7-35 при переключении тумблера высвечивались четырехзначные числа, равные значениям температуры в градусах Кельвина и плотности теплового потока в Вт/м.

Для измерения температур использовались никелевые термометры сопротивления ТСН-500

План был реализован и уже к началу 1989 г. получены первые результаты.

На рис. 12 представлены данные измерений температуры², выполненных в опорной плите с помощью скважин и переносных приборов [4].

²Учитывая, что измерения проводились в «горячий» период, когда шел интенсивный спад остаточного тепловыделения, все данные были пересчитаны к единой дате.

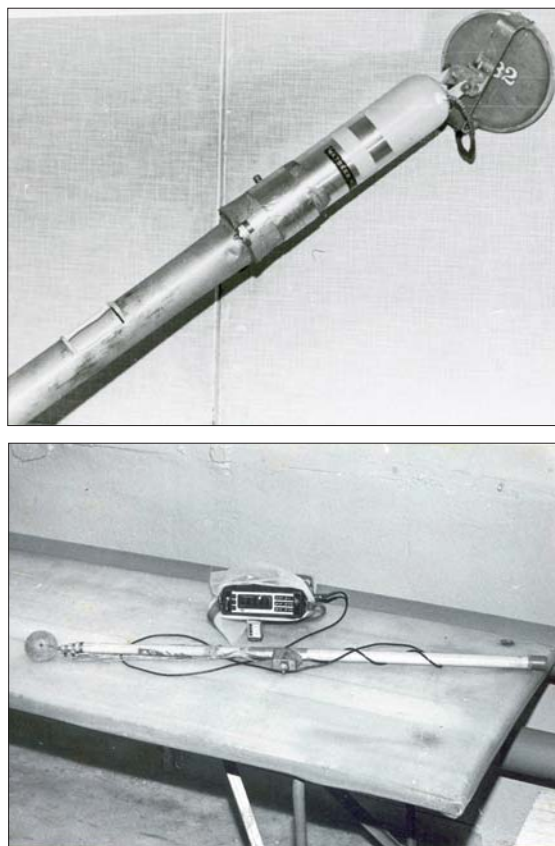


Рис. 11 а и 11 б. Автономный теплотрический зонд и регистрирующая аппаратура, использовавшаяся при измерениях теплового потока и температуры на плоской поверхности

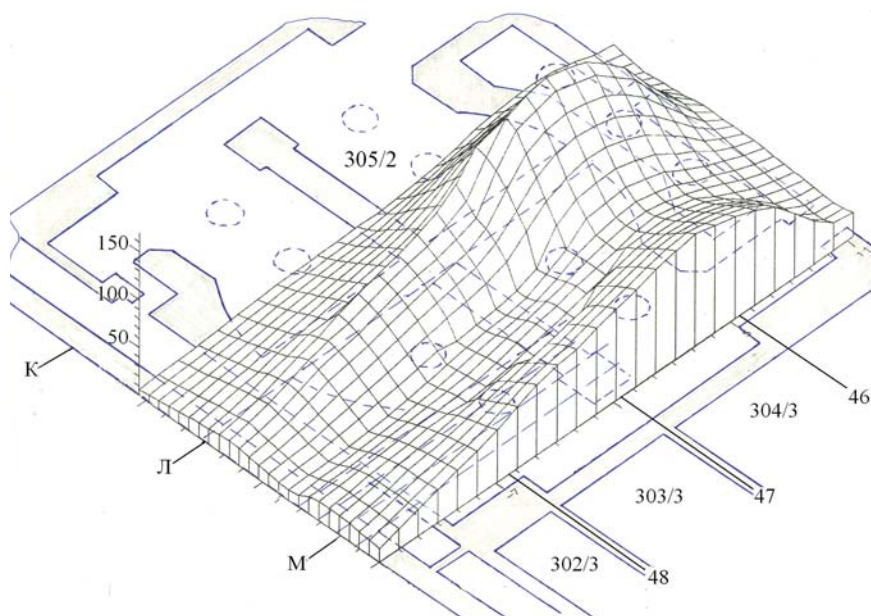


Рис. 12. Температурное поле в опорной плите реактора по результатам исследований, выполненных в 1988—1989 гг.

Эти измерения позволили оценить мощность тепловыделения, выносимую воздушными массами с верхней поверхности ТСМ из пом. 305/2 — $N_2 = 35$ КВт

С нижней поверхности ТСМ (потолка ПРК) с учетом снижения остаточного тепловыделения (за время прошедшее с июля 1989 г.) отводится $N_1 = 25$ КВт. Суммарная мощность тепловыделения топлива составляет 60 КВт.

Она соответствует массе топлива в помещении $305/2 = (75 \pm 25)$ т [5].

6.4. Работы непосредственно не связанные с 4-ым блоком [6]

Кроме работ непосредственно связанных с разрушенным блоком и объектом «Укрытие» КИ и его ОГ по поручению Правительственной комиссии проводила многие исследования, связанные с подготовкой к пуску 1-го, 2-го и, особенно, 3-го блоков ЧАЭС и с радиационными загрязнениями в 30-ти километровой зоне.

В качестве примера приведем работы, выполненные сотрудниками ОГ при дезактивации машинного зала блока № 3.

Согласно решению Правительства о возобновлении работы ЧАЭС и принятого плана 1 октября 1986 года был запущен первый энергоблок, а 5 ноября произведен пуск энергоблока № 2. Ввод в строй 3-го блока существенно задерживался в силу объективных причин — его помещения оказались загрязненными при аварии во много раз сильнее, чем считали первоначально³.

ОГ активно участвовала в дозиметрической разведке, планировании дезактивационных мероприятий и в контроле их эффективности, начиная с кровлей блока, постепенно переходя в помещения, находящиеся на нижних отметках.

В это время особую тревогу Правительственной комиссии стало вызывать положение, сложившееся в машинном зале 3-го блока. Несмотря на то, что его дезактивация проводилась многократно и с особой тщательностью, величина уровней внешнего облучения на рабочих местах все еще в десятки (а в ряде мест и в сотни) раз превосходила допустимую.

ОГ было поручено обнаружить источники излучения и выработать рекомендации по их подавлению. Используя специальные коллимированные детекторы и экраны, ставя перед детекторами различные поглотители, проводя расчеты, исследователи показали, что радиационная обстановка в МЗ определяется тремя видами источников:

- загрязнениями помещения и оборудования,
- радиоактивностью кровли МЗ,
- гамма излучением от внешних объектов (в том числе «Укрытия»), проникающим, в основном, через кровлю МЗ.

Основным источником излучения были названы загрязнения кровли. Отчеты о работе были предоставлены в Правительственную комиссию (см. рис. 14).

Приведенные в отчетах рекомендации — очистить кровлю МЗ (лучше все-

³3-й энергоблок ЧАЭС планировалось запустить в промышленную эксплуатацию в октябре 1987 г. (через ~1,5 года после аварии).

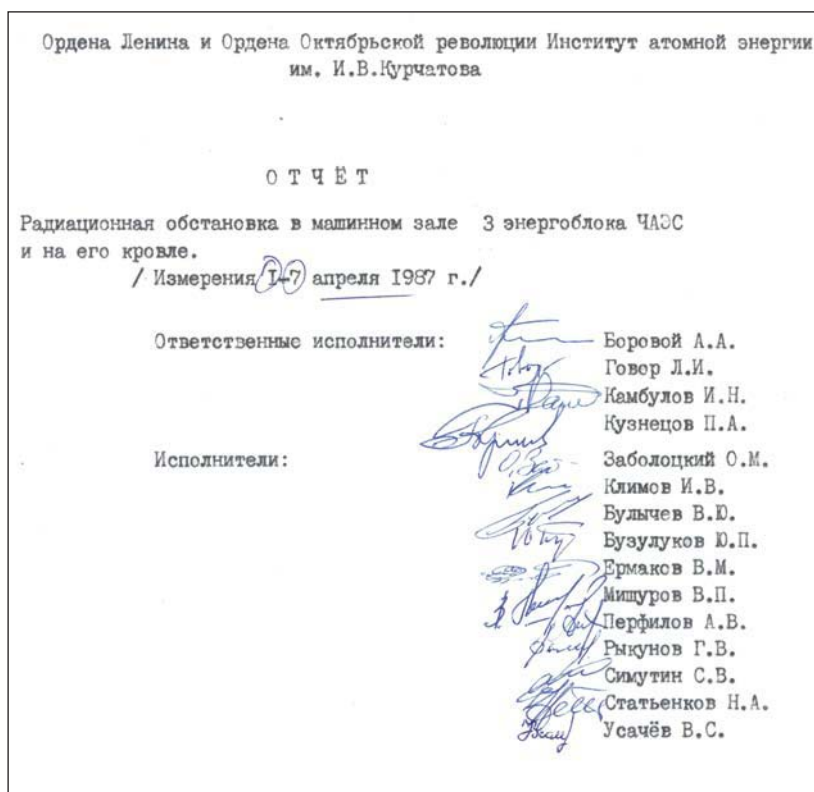


Рис. 14. Обложка одного из отчетов ОГ об исследовании дозовых полей в машинном зале 3-го энергоблока

го — заменить ее) и провести повторную дезактивацию самого помещения, поставили ПК в сложное положение. Необходимый для их выполнения большой объем радиационно-опасных работ мог на месяцы задержать пуск блока и тем самым окончательно сорвать планы, утвержденные Правительством.

Поэтому особое внимание привлекло обращение в ПК одного из руководителей подразделений КИ, в котором говорилось, что специалисты ОГ ошибаются.

Наибольший вклад в дозу у турбогенераторов в машинном зале 3-го блока вносят не загрязнения кровли, а рассеянное атмосферой γ -излучение⁴, идущее от «Укрытия» — эффект *sky shine* (см. рис. 15).

Бороться с *sky shine* предлагалось путем забрасывания центрального зала свинцовыми шарами, которые должны были поглотить излучение, идущее вверх, через крыши «Укрытия». Свое предложение со специалистами ОГ автор не обсуждал, а сразу обратился в Минсредмаш и ПК.

Эта идея была поддержана заинтересованными организациями — руководством Минобороны, отвечающим за проведение дезактивации и строителями. Более того, начались переговоры об изготовлении свинцовых шаров на одном из заводов.

⁴Рассеянное излучение за счет «комpton эффекта».

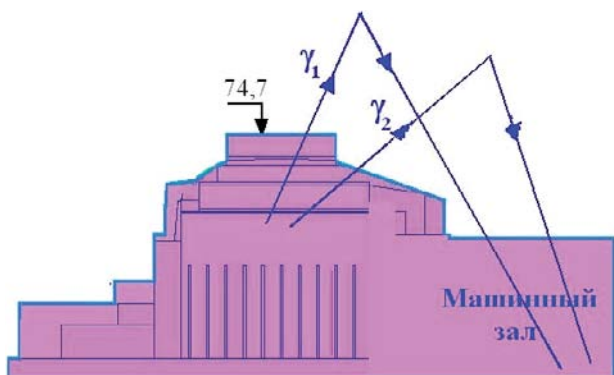


Рис. 15. Схема комптоновского рассеяния γ -излучения, идущего от развала реактора

В результате состоялось специальное заседание ПК, посвященное этому вопросу.

Выступление научного руководителя ОГ содержало следующие доводы против выдвинутого предложения.

Во-первых, вклад от рассеянного воздухом γ -излучения «Укрытия» в величину МЭД в различных точках МЗ 3-го блока согласно расчетам специалистов ОГ составляет не более 10%. По-видимому автор, предложения ошибся в расчетах.

Во-вторых, забрасывание развала в ЦЗ «Укрытия» свинцом (а для эффективной защиты от γ -излучения его потребуется многие сотни тонн) почти неминуемо приведет к обрушению поврежденных взрывом и пожаром конструкций. А это будет сопровождаться выбросом огромного количества радиоактивной пыли, которая загрязнит не только 3-ий блок, но и 1-ый и 2-ой, и всю только что очищенную площадку ЧАЭС.

После этого сотрудники ОГ продемонстрировали плоский свинцовый контейнер, в котором находился фрагмент кровли МЗ 3-го блока ($\sim 0,15$ м²), вырезанный ими за день до заседания. Когда свинец сняли, контрольный дозиметр в помещении выдал звуковой сигнал опасности и присутствующие смогли убедиться, что МЭД поблизости от фрагмента составляла десятки мР/ч.

Эта демонстрация послужила завершением дискуссии.

В.А. Легасов вспоминал: «...в конце концов, оказалось, что основным источником загрязнения являются те загрязнения, которые находились на крыше 3-го блока — это было главное. Поэтому было принято решение полностью сменить крышу 3-го блока, поставить новую с соответствующими защитными устройствами, которые позволили бы продолжить необходимые работы...» [7].

Энергетический пуск 3-го энергоблока ЧАЭС произошел 04.12.1987 — на несколько месяцев позже запланированного срока.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. Zeleny Mys, Ukraine, 14-18 March 1994. — p.185-195.
2. Usatyj A.F., Verein N.V. EPR – based Dosimetry of Large Dimensional Radiation Fields (Chernobyl Experience and New Approaches)/ Appl. Radiat. Isot., Vol.47, #11/12, 1996, pp.1351 – 1356.
3. 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.
4. Оперативный контроль и диагностика состояния объекта «Укрытие» в период с 01.01.87 по 20.12.87. Отчет Оперативной группы ИАЭ им. И.В. Курчатова. Утвержден руководителем оперативной группы 22.12.87. Чернобыль, 1987, 32 с.
5. Боровой А.А., Огородник С.С., Попов В.Д. и др. Оценка количества топлива в скоплениях ТСМ в подаппаратном помещении. Отчет КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова 11.07/26, Чернобыль, 1990 г.
6. Боровой А.А., Велихов Е.П. К 25-летию аварии на Чернобыльской АЭС. Работы «Курчатовского института» по ликвидации последствий аварии. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2011 г., 129 с.
7. Легасов В.А. Мой долг рассказать об этом. «Энергия» № 9, 1996. с. 41–49.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СКОПЛЕНИЙ ЛАВООБРАЗНЫХ ТСМ В ОБЪЕКТЕ

7.1. Модификации ядерного топлива в «Укрытии»

7.1.1. «Слоновья нога»

Первое подтверждение того, что в 4-ом блоке начал развиваться «китайский синдром» было получено сотрудниками ОГ осенью 1986 г. Началось все с того, что при дозиметрическом обследовании пом. 017/2, находящегося на отм. +3.000, стало понятным, что на отм. +6.000 должно находиться значительное скопление топлива. Понадобилось еще ~3 месяца, чтобы исследователи смогли проникнуть в пом. 217/2 и обнаружить в нем большую (несколько м³) расплывшуюся и застывшую «каплю» с черной блестящей поверхностью. Это образование было названо — «слоновья нога» (рис. 1).

По оценкам мощность экспозиционной дозы на ее поверхности составляла 8000 Р/ч.

«Сразу же возникло множество вопросов, но, конечно, первый из них, из какого материала создала авария «Слоновью ногу»? Своим тусклым блеском, этот материал очень напоминал свинец. Значит, свинец, который сбрасывали с вертолетов и который должен был взять на себя тепло ядерного топлива, наконец найден?

...Распоряжения ПК были короткими и ясными: сфотографировать, взять пробы и провести их полное исследование.

...Попытки взять пробу вещества «Слоновьей ноги» одна за другой терпели неудачу. Сначала исследователи соорудили систему из самоходной тележки и



Рис. 1. «Слоновья нога»: «лава», застывшая в такой необычной форме в помещении 217/2

установленной сверху электродрели. Это сооружение подобралось к «ноге», но не смогло просверлить в ней дырку – материал оказался слишком твердым.

...После нескольких посягательств на целостность «ноги» удалось набрать немного вещества на анализ. Исследования показали, что никаких следов свинца нет, зато есть своеобразная стекловидная масса, содержащая в себе весь набор радионуклидов ядерного топлива» [1].

Так оказалось, что кроме фрагментов активной зоны и топливной пыли в объекте существует лавообразный материал, который представляет собой застывший расплав двуокиси кремния, содержащий 4÷10 процентов облученного урана и ряд других элементов. В дальнейшем в том же помещении 217/2 (см. рис. 2) были найдены другие скопления ЛТСМ. Они получили названия «капля», «сталактит» (см. рис. 3) и др.

Результаты анализов проб керамики, отобранных в пом. 217/2, показали, что в ее состав входит ~4,5% урана, а содержание радионуклидов близко к их содержанию в отработавшем топливе 4-го блока, за исключением летучих изотопов цезия и рутения (см. рис. 4).

В таблице 1 приводится средний элементный состав ЛТСМ в пом. 217/2.

Таблица 1. Помещение 217/2. Усредненный элементный состав проб ЛТСМ (25 проб)

Массовая доля, %															
Si	Ca	Ti	Zr	Cu	Na	Ba	U	Al	Mn	Mo	Fe	Mg	Cr	Ni	B
31,1	6,1	$1,6 \times 10^{-1}$	4,3	$1,5 \times 10^{-3}$	4,1	$1,3 \times 10^{-1}$	4,4	4,6	3,0	$4,4 \times 10^{-3}$	0,56	2,3	$2,2 \times 10^{-1}$	$1,5 \times 10^{-1}$	$9,7 \times 10^{-2}$

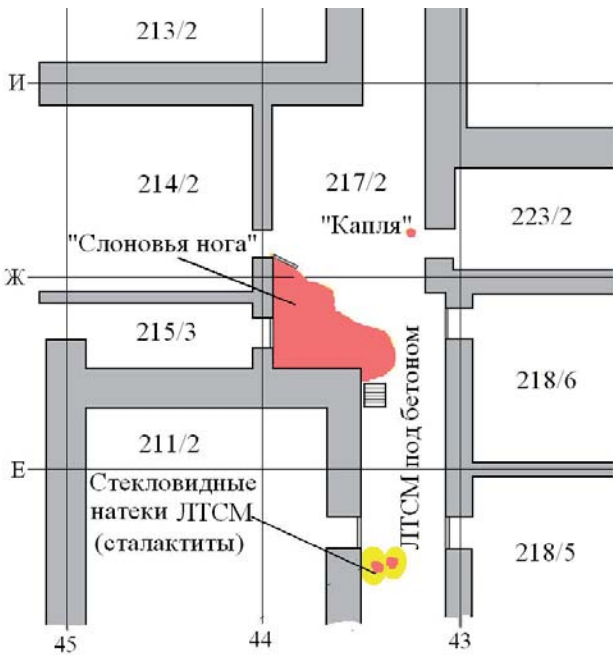


Рис. 2. Скопления ЛТСМ в пом. 217/2 на отм. 6.000 м. Последующие исследования показали, что лава проникла в пом. 217/3 с отм. 9.000 (горизонтальный поток) через технологические проходки



Рис. 3. Скопление ЛТСМ, получившее название «сталактит»

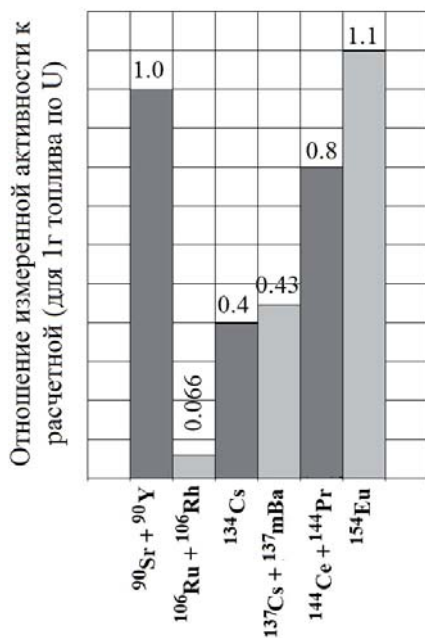


Рис. 4. Результаты сравнения активности некоторых радионуклидов в ЛТСМ из пом. 217/2 (данные по 27 пробам) с расчетными значениями для отработавшего топлива 4-го блока. Брались отношения активностей для 1г топлива (по У). Видно, что при плавлении ЛТСМ потеряли часть цезия и практически весь рутений

Впоследствии лавообразные, содержащие ядерное топливо материалы (ЛТСМ) были обнаружены во многих подреакторных помещениях. В их составе содержалась значительная часть урана, находившегося до аварии в активной зоне. Поэтому ЛТСМ стали предметом особо внимательного изучения (наиболее полно вопросы, связанные с черновильскими лавами рассмотрены в работе [2]).

7.1.2. Модификации лавообразных ТСМ

Сложившаяся к настоящему времени классификация различных типов топливосодержащих материалов, находящихся в объекте «Укрытие» представлена на диаграмме (рис. 5).

В таблице 2 приводятся наиболее важные характеристики различных модификаций ЛТСМ (см. [2]), а на рис. (6–10) фотографии их образцов.

На нижних отметках блока встречаются скопления застывшего расплавленного металла. Они не относятся непосредственно к ТСМ, поскольку не содержат собственно частиц топлива, но лишь отдельные осколки деления (например, рутений-106). Однако своему образованию эти скопления обязаны тем же процессам высокотемпературного взаимодействия топлива с конструкционными материалами, что и ТСМ (рис. 11).

Перейдем теперь к особенностям методов, которые использовались для определения основных характеристик ТСМ, приведенных в таблице 2.

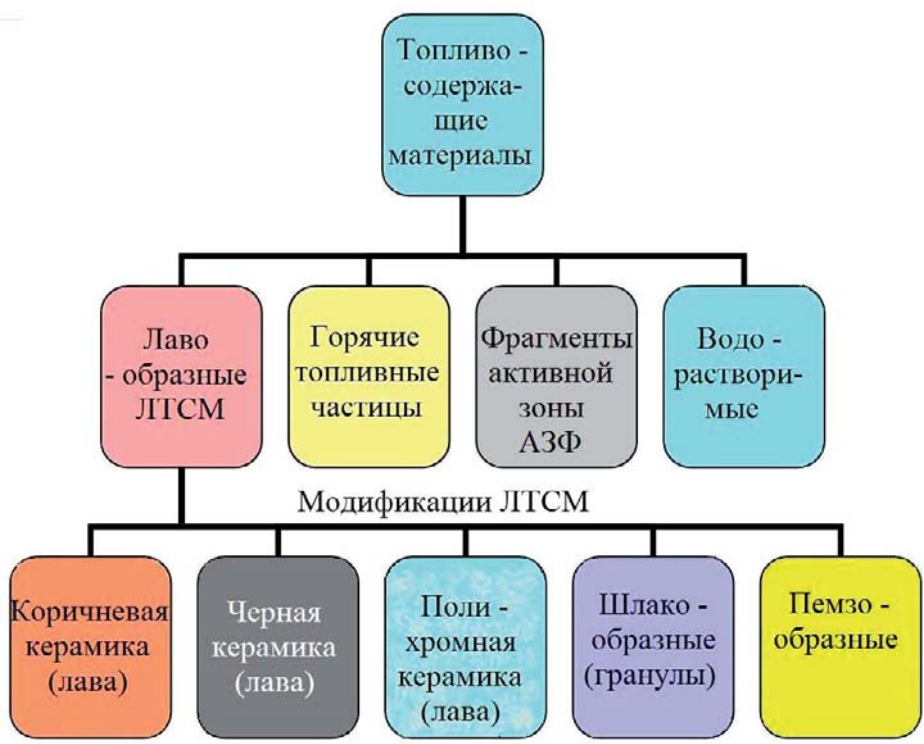


Рис. 5. Топливосодержащие материалы в «Укрытии». Модификации ЛТСМ



Рис. 6. Коричневая лава из парораспределительного коридора

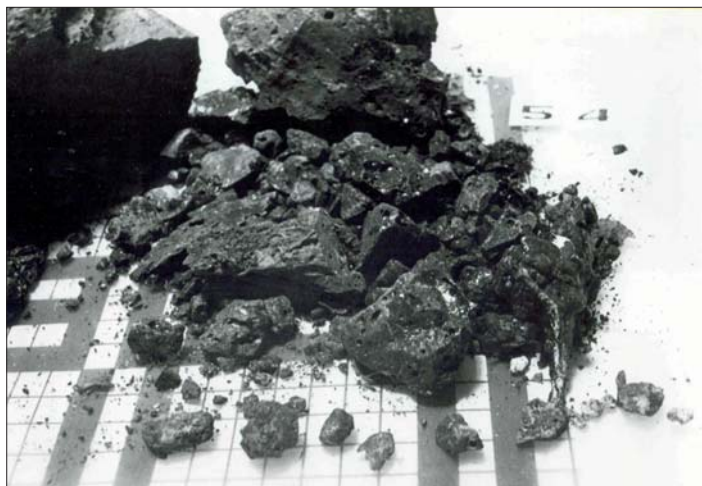


Рис. 7. Черная лава из парораспределительного коридора



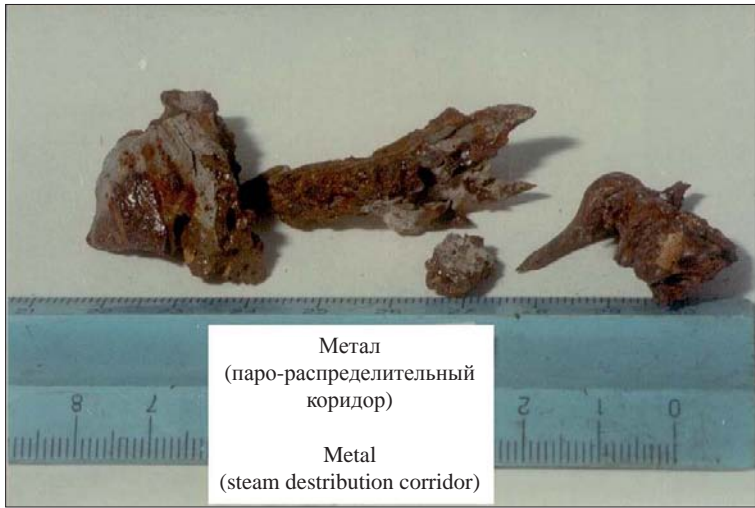
Рис. 8. Полихромная лава (сталагмит) в подапаратном помещении 305/2



Рис. 9. Шлакообразные ЛТСМ в бассейне-барботере



Рис. 10. «Пемза» в бассейне-барботере



Металл
(паро-распределительный
коридор)
Metal
(steam distribution corridor)

Рис. 11

Таблица 2. Характеристики различных модификаций ЛТСМ

Название модификации ЛТСМ	Краткое описание	Плотность, г/см ³	Содержание урана, %	Выгорание топлива, МВт×сут/кг U	Обеднение по цезию и рутению
Коричневая керамика	Цвет — коричневый. Хрупкое вещество, пронизанное множеством пор различного диаметра. Внешняя поверхность чаще всего блестящая	2,5–3,0	10 ± 2	12,6 ± 0,4	Обеднение по цезию во всех пробах составляло 2,2–2,5 раза по сравнению с его расчетным количеством и не зависело от типа керамики. Обеднение по рутению составляло ~25 раз
Черная керамика	Цвет — угольно-черный. Поверхность, в основном, матовая с большим количеством пор большого размера (1–2) дм ²	0,7–2,7 (разной пористости)	5,5 ± 1,5	12,5 ± 0,5	
Полихромная керамика	Застывший поток многоцветной (полихромной) лавы. Наблюдаются синий, коричневый, желтый и другие цвета	2,8 (синяя лава)	5,7 (синяя лава) 7,6 (коричневая)	13,0 ± 0,5	
Шлакообразные ЛТСМ	Покрываются стеклообразной коркой. Под ней — гранулы неправильной формы с вариацией цвета — от серого до коричневого	—	—	—	
Пемзообразные ТСМ	Цвет — темный. Хрупкое вещество, легко разрушающееся при сжатии	0,14÷0,18	—	—	

Плотность.

Как уже указывалось, ЛТСМ — чрезвычайно разнородный материал, плотность которого в значительной степени определяют газовые пустоты. При классическом методе определения плотности по этим пустотам внутрь ЛТСМ попадает вода, что приводит к ошибкам в измерениях¹. Поэтому для определения истинной плотности ЛТСМ были разработаны специальный прибор и гидрофобное покрытие, позволившее избежать нежелательных эффектов.

Содержание урана.

Некоторые методы определения содержания урана в лавах описаны в Главе 5.

¹«Доступная» для воды пористость ТСМ изменяется от 90% для образцов пемзы, до 8–9% для коричневой керамики и 3–4% для большей части черной [3].

Выгорание топлива.

Выгорание является важной характеристикой отработавшего ядерного топлива.

В применении к топливу 4-го блока ЧАЭС эта величина является одной из определяющих при расчете подкритичности отдельных скоплений ТСМ. Другими словами, она дает возможность оценить ядерную безопасность объекта «Укрытие» в целом. Кроме того, сравнение степени выгорания ядерного топлива в различных модификациях чернобыльских лав позволяет судить о степени их гомогенизации, что важно для создания модели образования и растекания ЛТСМ.

Как правило, в лаборатории КИ (а позднее – МНТЦ) величина выгорания топлива в пробах, отобранных в 4-м блоке и ближней зоне, рассчитывалось по результатам гамма – спектрометрического анализа – по величине отношения изотопов цезия $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ – рис. 12 [4].

В литературе до сих пор дискутируется вопрос о правомерности использования цезиевого отношения для определения выгорания ядерного топлива. Этот вопрос возникает в связи с тем, что при делении ядер урана различным изотопам цезия соответствуют различные предшественники: ^{137}Cs получается из продуктов деления по цепочке бета-распадов, последний член которой – ^{137}Xe . ^{134}Cs получается из ^{133}Cs путем нейтронного захвата.

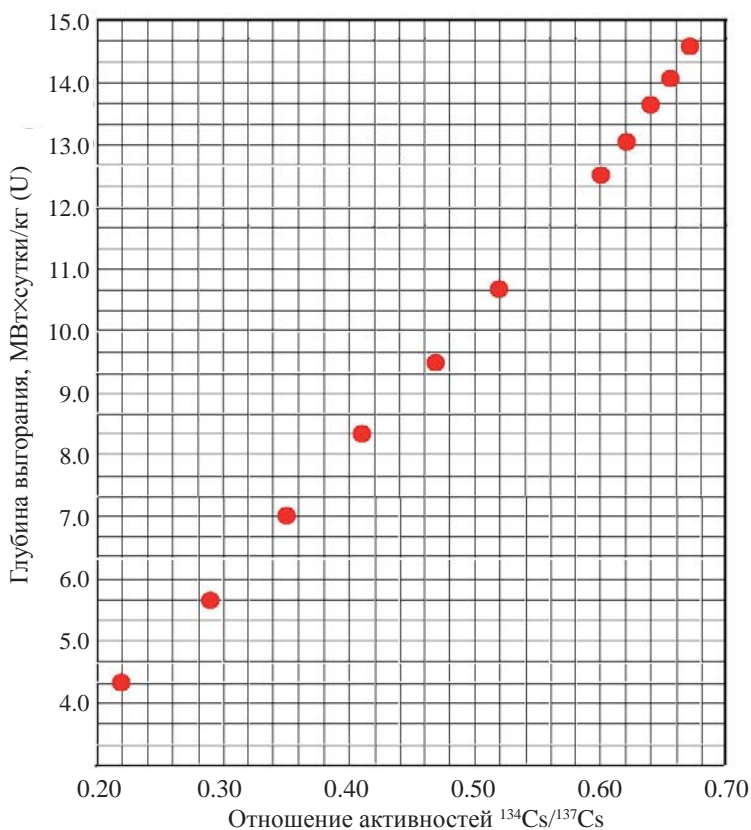


Рис. 12. Связь между глубиной выгорания топлива 4-го блока и отношением активностей радионуклидов цезия (на момент аварии – 26.04.86)

Поэтому такие различные по своим химическим свойствам элементы, как цезий и ксенон, могут не одинаково располагаться по регулярным местам кристаллической решетки диоксида урана и, обладая различной летучестью, не аналогично вести себя в экстремальных условиях чернобыльской аварии [5].

В связи со всем вышеизложенным, было проведено сравнительное определение выгорания в наиболее характерных образцах лавообразных топливосодержащих масс (ЛТСМ) 4-го блока ЧАЭС различными независимыми методами (см., например, [5–7]).

В таблице 3, взятой из рабочего журнала, приводятся некоторые результаты определения разными методами выгорания отработанного ядерного топлива, содержащегося в образцах бетона из объекта «Укрытие».

Таблица 3. Сравнение результатов определения разными методами выгорания отработанного ядерного топлива, содержащегося в образцах бетона из объекта «Укрытие».
 $(t_{\text{прошедшее после 26.04.86}} = 5,52 \cdot 10^8 \text{ с})$

№ пробы	Выгорание, определенное по отношению $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, (МВт·сут./кг U)	Выгорание, определенное по отношению $^{238}\text{Pu}/^{238}\text{Pu} + ^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$, (МВт·сут. / кг U)
580	12,3	12,9
581	11,9	13,1
582	12,6	14,8
661	11,8	13,0
662	12,0	13,4
663	12,0	13,5
665	12,0	13,1
667	12,2	13,4
669	12,5	13,2
671	12,2	13,3
672	12,0	13,5
Среднее	$12,1 \pm 0,2$	$13,4 \pm 0,5$

Экспериментальные данные подтверждают правомерность использования цезиевого отношения для расчета выгорания отработавшего ядерного топлива в ЛТСМ. Трудозатраты же при определении этого отношения, получаемого по результатам гамма-спектрометрии, не идут ни в какое сравнение с трудоемкостью других методов.

Как видно из таблицы 2, результаты исследования более чем 200 проб показали, что черная и коричневая керамика имеют практически одинаковое выгорание, а именно: коричневая керамика — $(12,6 \pm 0,4)$, черная — $(12,5 \pm 0,5)$ МВт·сут./кг (U).

При этом среднее выгорание топлива в ЛТСМ $\sim 12,5$ МВт·сут./кг(U) выше, чем среднее расчетное выгорание по всей активной зоне, составляющее $\sim 10,9$ МВт·сут./кг (U).

Рис. 13 иллюстрирует реальное распределение проб ТСМ, отобранных из подаппаратного пом. 305/2 по глубине выгорания.

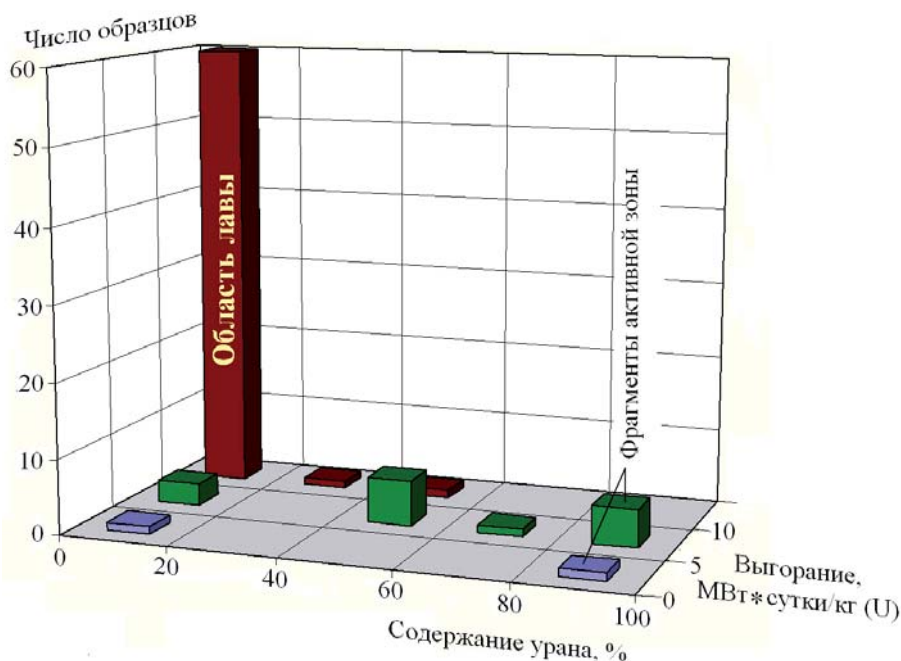


Рис. 13. Распределение проб ТСМ, отобранных из помещения 305/2 по содержанию урана и выгоранию

Обеднение по цезию и рутению.

Выброс летучих радионуклидов, в том числе ^{134}Cs и ^{137}Cs , происходил во время активной стадии аварии, когда проходили процессы образования и растекания лавы. В результате топливо, содержащееся в ЛТСМ, оказалось обедненным этим радионуклидом. Если в исходном топливе перед аварией активность цезия-137 составляла 1.4×10^9 Бк/г (U), то в лаве она уменьшилась в (2.2–2.5) раза.

Таким образом, ~63% цезия из лавы было выброшено².

Исследования фрагментов активной зоны, сохранившихся непереплавленными, показали, что содержание в них цезия практически не отличается от доаварийного.

Таким образом весь выброшенный из блока ^{137}Cs до аварии находился в лаве.

Это позволяет оценить интегральное количество ядерного топлива (U), которое содержится в ЛТСМ, находящихся в «Укрытии».

На основании исследования тысяч проб почвы известно, что полный выброс ^{137}Cs из разрушенного реактора составил ~2 МКи.

Значит в топливе, вошедшем впоследствии в состав лавы, ^{137}Cs вначале содержалось $2 \text{ МКи} / 0.63 \approx 3.2 \text{ МКи}$. Или ~46% от всего наработанного в реакторе ^{137}Cs , поскольку наработано было ~7 МКи.

Уран, в отличие от цезия, остался в лаве, его количество в ней так и составляет 46% от полного количества урана в реакторе до аварии или $192 \text{ т} \times 0.46 \approx 90 \text{ т}$.

²Это значение получено усреднением по 300 пробам.

Что касается рутения, то это весьма тугоплавкий материал ($T_{\text{пл}} \sim 2300^\circ\text{C}$), однако при повышении температуры ($\sim 400^\circ\text{C}$) он начинает заметно окисляться с образованием RuO_2 . При $\sim 800^\circ\text{C}$ RuO_2 взаимодействует с кислородом с образованием летучих RuO_3 и RuO_4 .

По-видимому, возгонка окислов, а также активное растворение соединений рутения в расплавленном металле привела к значительному обеднению ЛТСМ по его радионуклидам.

7.2. Образование и растекание ЛТСМ

7.2.1. Образование лавы

Модель образования ЛТСМ, разработанная КИ и ИБРАЭ³, описана в работах [2, 8, 9]. В настоящем разделе приводим только основные положения этой модели (см. [2]).

Центром процесса образования лавы стала юго-восточная часть подаппаратного помещения (305/2), а последовательность его стадий представляется следующим образом.

I. При вводе положительной реактивности ядерное топливо (UO_2), находящееся в ТВЭЛ-ах, из-за интенсивного тепловыделения и малого теплосъема нагрелось до температуры плавления циркония ($t_{\text{пл}} = 1852^\circ\text{C}$).

Циркониевая оболочка твэлов расплавилась и начала растворять в себе топливные таблетки с образованием жидкой уран-циркониевой эвтектики.

II. Взрывы, разрушившие активную зону, позволили этой эвтектике (и непосредственно топливу) вступить во взаимодействие с конструкционными материалами: металлом схемы «ОР» серпентинитовой засыпкой, песком, бетоном и т.д.

В «Курчатовском институте» была создана модель расположения материалов 4-го блока в шахте реактора и подаппаратном помещении через полчаса после начала аварии — в момент начала активного образования лавы. Результат этой работы [10] представлен на рис. 14. Из него видно, как пространственно располагались материалы, многие из которых вошли в состав лавы⁴.

В таблице 4 приведены данные о материалах, находившихся в шахте реактора (пом. 504/2) и подаппаратном помещении 305/2 в стадии образования и растекания лавы и вошедших в состав ЛТСМ.

III. При контакте уран-циркониевой эвтектики с диоксидом кремния (бетон, песок и т. п.) образовалась тройная система $\text{UO}_2\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$. Минимальная температура поверхности ликвидуса этой системы равна температуре плавления тройной эвтектики и ориентировочно составляет $\sim 1500^\circ\text{C}$ [2].

³Основой разработки стала модель, предложенная Э.М. Пазухиным в 1994 г. [5].

⁴Не учитывались материалы, сброшенные с вертолетов, поскольку они практически не попали в шахту реактора.

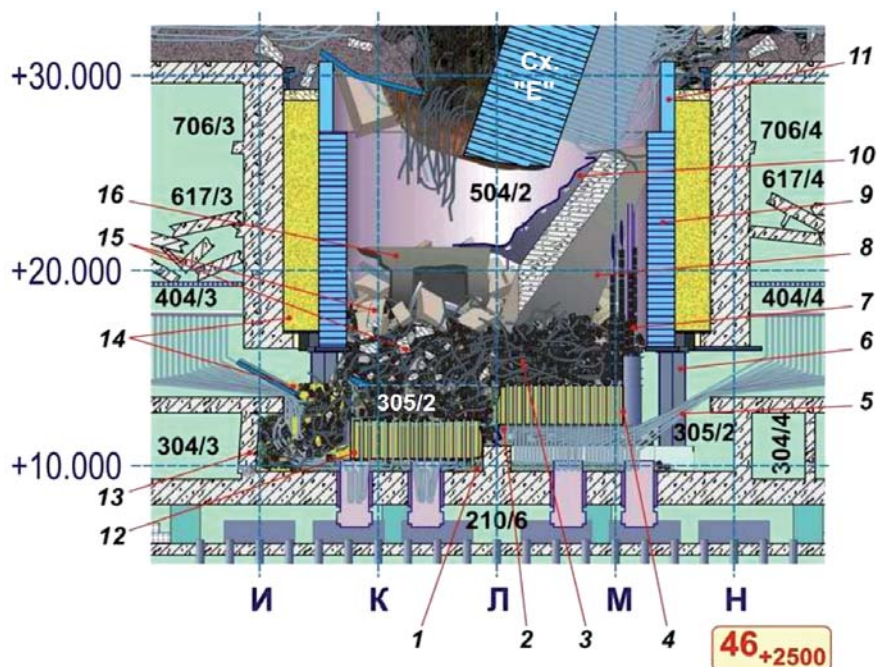


Рис. 14. Шахта реактора (пом. 504/2) и подаппаратное помещение (пом. 305/2) через полчаса после взрыва.

Обозначения.

1. Серпентинит схемы «ОР» и межкомпенсаторного зазора.
2. Смятая схема «С» («крест»), на которую опиралась схема «ОР».
3. Разрушенное топливо, топливные сборки, ТВЭЛ-ы, ТК, графитовые блоки, фрагменты бетонных конструкций и т.п.
4. Опустившаяся на 3.8 м основная часть (3/4) ОР.
5. Трубы НВК.
6. Дополнительная опора.
7. Отражатель (каналы и графитовые блоки).
8. Ж/б плита (фрагмент стены бокса сепараторов), упавшая в шахту реактора.
9. Бак сх. «Л».
10. Облицовка теплозащиты стены бокса сепараторов.
11. Бак сх. «Д».
12. Отколовшаяся часть (1/4) ОР, материалы которой в ходе образования лавы вошли в состав ЛТСМ.
13. Поврежденная стена.
14. Песок шахтной засыпки.
15. Обломки ж/б конструкций.

IV. Дальнейший процесс лавообразования происходил при температурах (1500÷2600) °С⁵. В состав ЛТСМ кроме урана, циркония, кремния, магния и кислорода вошли относительно небольшие примеси других элементов (в результате элементного анализа ЛТСМ их определено около двух десятков) (рис. 15).

⁵При образовании лав необходимо учитывать три источника тепла: остаточное тепловыделение ядерного топлива, горение графита и пароциркониевую реакцию.

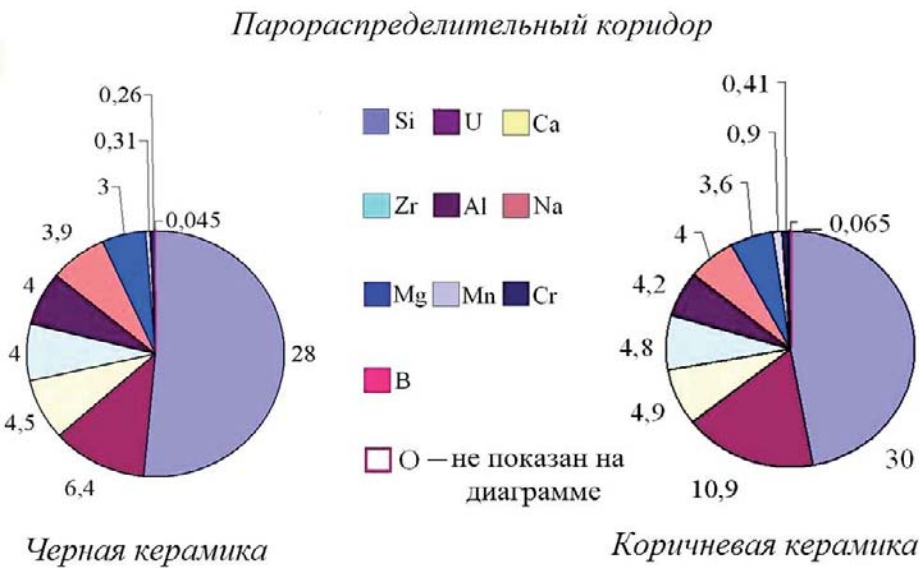
Таблица 4. Материалы, находившиеся в шахте реактора (пом. 504/2) и подапаратном помещении 305/2 в стадии образования и растекания лавы и вошедшие в состав ЛТСМ

Материал	Присутствовал в помещениях 504/2* и 305/2 после аварии, т	Вошел в состав ЛТСМ, т
Топливо (U)	120	90
Сталь	1300**	< 20***
Сerpентинитовая смесь	580	160
Бетон подреакторной плиты	—	130
Бетон строительных конструкций	950	480
Песок шахтной засыпки	300	280
Цирконий	?	45
Графит	750	Практически нет

*В границах реакторного пространства.
**Не учтены материалы схемы «С» и не расплавившиеся коммуникации низа реактора.
***330 т расплавилось и растеклось по подреакторным помещениям в металлическом виде.

Анализ установленных и возможных событий, происходивших в первое время после аварии, показывает, что существовало множество вариантов композиций топлива с остальными материалами, попавшими в помещения 305/2 и шахту реактора после взрыва.

При этом естественно предположить существование нескольких очагов образования лав, каждый из которых имел свои характерные температуры и образовывал характерные для этого очага лавы с определенным составом. Если основная часть ЛТСМ образовывалась при температуре ~1600 °С, то в



отдельных очагах лавообразования были возможны и температуры, при которых просто происходило плавление таблеток UO_2 (2850 °C и выше).

V. Несмотря на множество потенциальных возможностей подавляющая часть ЛТСМ, которые обнаружили в помещениях блока, имеет близкий химический состав.

Это могло объясняться тем, что процесс образования расплава сопровождался перемешиванием за счёт газовыделения и конвективных потоков и закончился раньше, чем началось растекание расплавленных ЛТСМ по подреакторным помещениям. Т.е. растекался уже сформировавшийся расплав [5].

7.2.2. Растекание лавы по помещениям 4-го блока

Образовавшийся в пом. 305/2 расплав, вообрал в себя материалы юго-западного квадранта схемы «ОР» и достиг паросбросных клапанов. По трубам, предусмотренным для сброса пара в случае проектной аварии, он попал на нижние отметки 4-го блока – в помещения парораспределительного коридора (отм. +6.000) и двух этажей бассейна-барботера, расположенных на отметках +3.000 и 0.000 соответственно (см. рис. 16 и рис. 16 Гл.3).

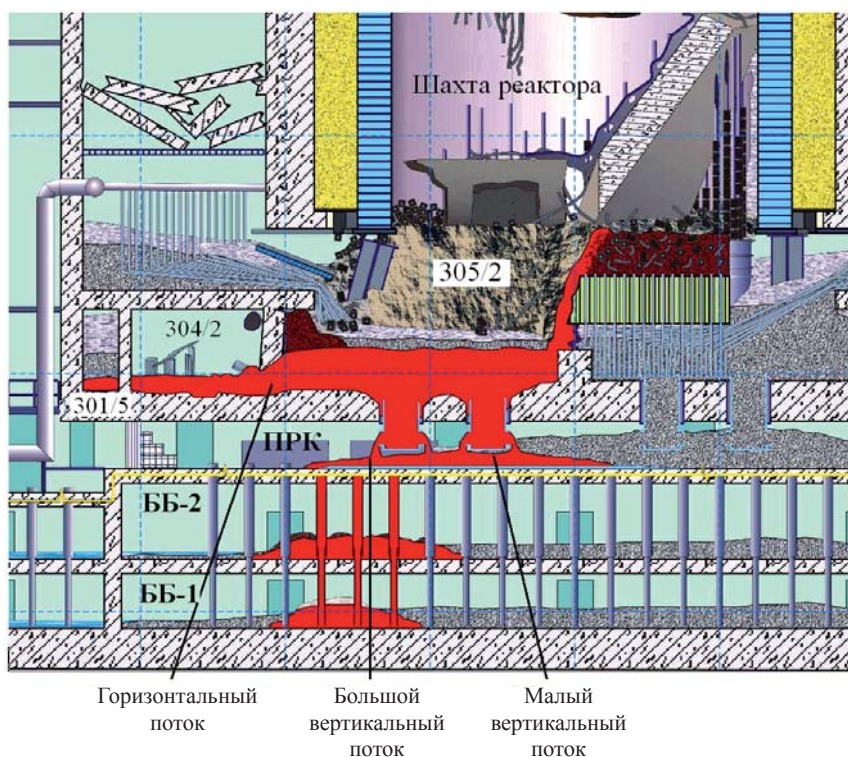


Рис. 16. Распространение лавы по паросбросным клапанам и трубам (фрагмент сечения объекта «Укрытие» по оси 46+2500). «Большой вертикальный поток»: пом. 305/2 → пом. 210/7(ПРК) → пом.012/15(ББ-2) → пом.012/7(ББ-1). «Малый вертикальный поток»: пом. 305/2 → пом. 210/6 (ПРК). Начало «горизонтального потока»: пом. 305/2 → пом. 304/3 → пом. 301/5. ЛТСМ обозначены красным цветом, потоки «свежего» бетона – серым

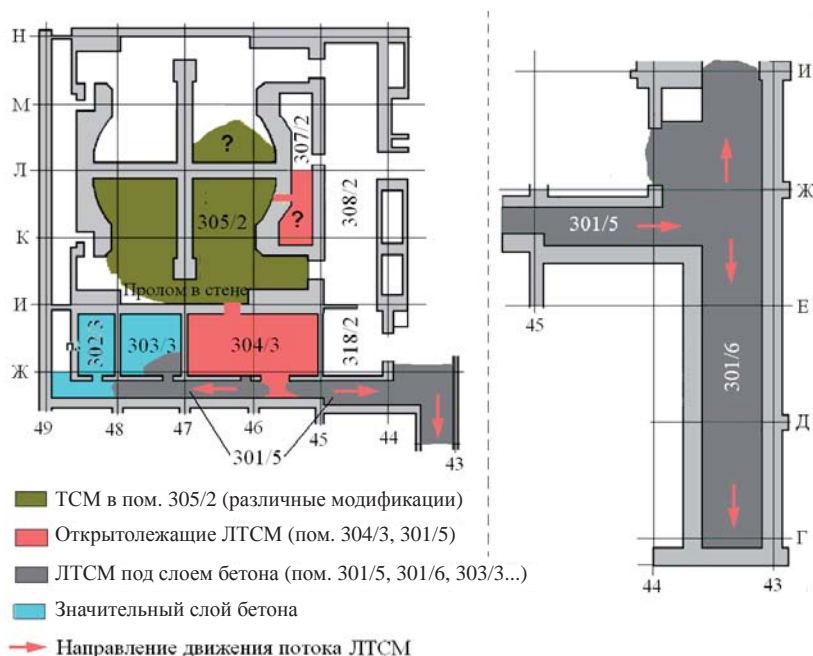


Рис. 17. «Горизонтальный поток» лавы на отм. +9.000 м

Одновременно расплав распространялся и в горизонтальном направлении, так как в стене между помещениями 305/2 и 304/3 при аварии образовался пролом («горизонтальный поток»).

Залив пом. 304/3, поток лавы через открытую дверь попал в коридор 301/5 (рис. 17). При строительстве «Укрытия» этот коридор был залит «свежим» бетоном с двух сторон — с запада и востока. Только небольшой участок пола между осями 45+2500 и 46-1500 оказался свободен от бетона и на нем видны открытые ЛТСМ (рис. 16, 17).

Из коридора 301/5 лава, двигаясь на запад, проникла в пом. 302/3 и 303/3 (частично залитые «свежим» бетоном). Двигаясь на восток, ЛТСМ должны были попасть и в коридор 301/6. Хотя позднее он оказалось залитым бетоном, но о существовании лавы на полу в пом. 301/6 можно судить по косвенным признакам. К ним относятся данные о ЛТСМ в пом. 301/5 и данные о проникновении ЛТСМ на нижние этажи «Укрытия».

На отметку 6.000 лава проникла из коридора 301/6 через технологические проходки, соединяющие отметки 9.000 м и 6.000м, и застыла в виде причудливых образований — «слоновьей ноги», «сталактита», «капли» (см. начало главы, рис. 1 и 2).

7.3. Основные скопления лавы в объекте «Укрытие» (см. [2])

7.3.1. Верхние отметки

В центральном зале и окружающих его помещениях ЛТСМ пока не обнаружены. Однако есть убедительные косвенные указания на то, что под завалами разрушенных конструкций и материалами, сброшенными с вертолетов во



Рис. 18. Расположение гипотетической области образования полихромных ЛТСМ в районе отметок +24.000 – +35.000[10]

время активной стадии аварии, может находиться какое-то количество полихромной керамики.

Возможность ее существования подробно рассматривалась в работе [10]. В ней предполагалось, что полихромные ЛТСМ образовались выше отметки +24.000 (см. рис. 18) по своему особому механизму.

Расплавленная полихромная керамика из гипотетического скопления стекла в шахту реактора по сх. «Л» и, застыв, образовала так называемую «сосульку» (рис. 19). Оторвавшаяся часть этой сосульки находится в пом. 305/2 («Сталагмит», рис. 20).

7.3.2. Средние отметки

Помещение 305/2

Понадобились несколько лет исследований, прежде чем на основе анализа данных, полученных при помощи скважин, материалам фото- и видеосъемки, чертежам и схемам, выполненными разведывательными группами, удалось реконструировать общий вид завала из различных материалов, находящихся в подаппаратном пом. 305/2 – центре образования ЛТСМ.

Полное описание основных скоплений топлива в этом помещении было приведено в работе «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации» (2001г.) [11] и потом многократно использовалось в других работах.

В «Анализе ...» было предложено разбить помещение на 7 участков, в каждом из которых предполагалось наличие значительного количества ТСМ (рис. 21)⁶.

⁶Участки, обозначенные цифрой 8 – гипотетические области с большим содержанием урана, расположенные под поверхностью завала. Подробно о них см. Гл. 8.

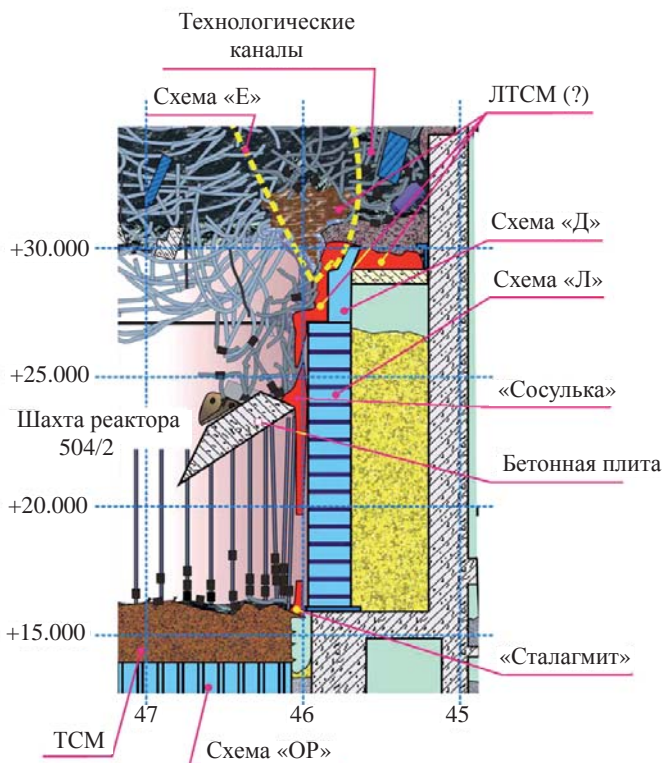


Рис. 19. Фрагмент разреза 4-го блока в районе ряда М. Красным цветом обозначены застывшие потоки полихромной лавы: «Сосулька», «Сталагмит» и ЛТСМ, которые могут находиться в реакторном пространстве, в районе отметок +24.000 – +35.000 [10]



Рис. 20. Скопление лавы – «сталагмит», являющийся продолжением «сосульки» ЛТСМ, свисающей с бетонной плиты

Участок 1

Расположен на месте расплавившегося юго-восточного сектора плиты «ОР». Центр образования основной массы ЛТСМ. Границы участка – железобетонный крест и стены помещения 305/2. ТСМ на этом участке скрыты под слоем «свежего» бетона толщиной 0,3–0,5 м и завалом конструкций. Тип ЛТСМ – преимущественно черная и коричневая керамика.

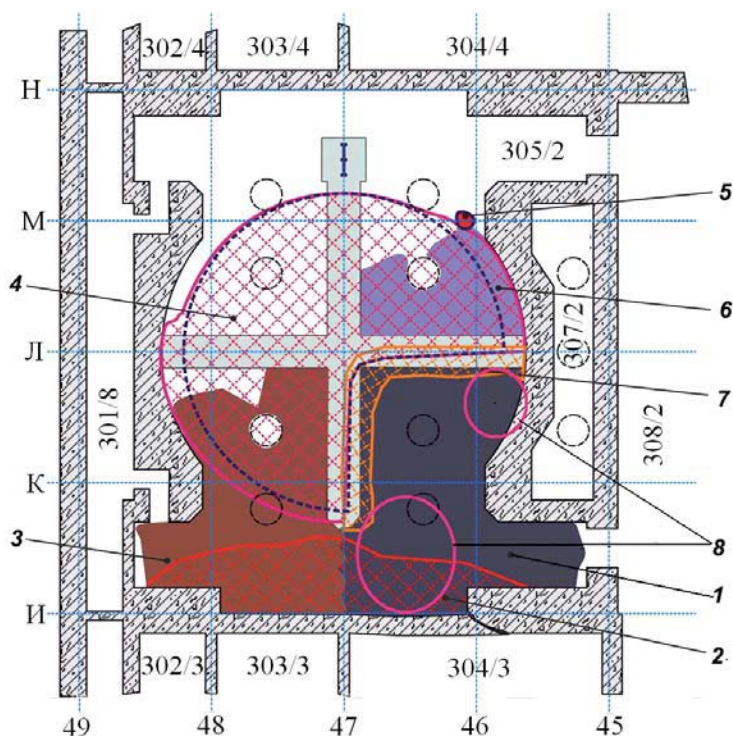


Рис. 21. Схема расположения участков с ТСМ в помещении 305/2

Участок 2

В него входит завал вдоль южной стены помещения 305/2, образовавшийся в результате обрушения металлоконструкций и смещения труб НВК (рис. 22). Завал содержит фрагменты активной зоны реактора. Западная часть завала частично залита бетоном. Тип ТСМ – АЗФ, ЛТСМ.

Участок 3

Юго-западная часть помещения. Границы участка – железобетонный крест, стены помещения 305/2. ТСМ на этом участке находятся под схемой «ОР» и завалом, расположенным вдоль южной стены помещения. Бетон под-реакторной плиты разрушен и лава может достигать отметки +9.000 и ниже. Тип ЛТСМ – преимущественно коричневая и черная керамика, возможно АЗФ.

Участок 4

Схема «ОР» и завал на ней. Предполагаемый тип топливосодержащих материалов – топливные сборки (не менее 50 шт.), ЛТСМ.

Участок 5

Так называемый сталагмит – застывший натек полихромных ЛТСМ, образовавшийся в районе верхней части большой железобетонной плиты. (см. рис. 20).

Участок 6

Наименее изученная северо-восточная часть помещения 305/2. Границы участка: пространство под «ОР» и сталагмитом. Возможно присутствие ЛТСМ.

Участок 7

Это скопление – полукруглая стена рыхлых ТСМ, образовавшаяся в процессе переплавки юго-восточного сектора «ОР» и лавовой шихты. Границы



Рис. 22. Южный квадрант пом. 305/2. Под согнутыми трубами НВК – обгоревшие графитовые блоки

участка — над железобетонным крестом вдоль границы отсутствующей юго-восточной части «ОР». Тип ТСМ — пористая керамика.

Оценки распределения ТСМ по помещению 305/2 представлены в таблице 5.

Таблица 5. Экспертные⁷ оценки распределения ТСМ по помещению 305/2 [2]

Помещение	№ участка, высотные отметки	Краткая характеристика ТСМ на участке	Оценка объема ТСМ, м ³	Оценка количества топлива по урану, т
305/2	№ 1, отм. +9.000 — +11.500	Черная и коричневая керамика, возможно АЗФ	150÷190	20 ± 3
	№ 2, отм. +11.000 — +14.000	ЛТСМ, шихта, АЗФ	9÷26	6 ± 4
	№ 3, отм. +9.000 — +12.000	Коричневая и черная керамика, возможно АЗФ	100÷180	33 ± 8
305/2 и 504/2	№ 4, отм. +12.000 — +24.000	ЛТСМ, шихта, АЗФ	70÷110	19 ± 7
	№ 5, отм. +16.000 — +24.000	Сталагмит — ЛТСМ	~0,7	0,12
305/2	№ 6, отметка +9.700	ЛТСМ ?	до 20 (?)	до 1,5 (?)
305/2 и 504/2	№ 7, отм. +11.000 — +16.500	Рыхлые ТСМ, пористая керамика	50÷60	5 ± 2

⁷В группу экспертов входили специалисты «Курчатовского института», ИБРАЭ РАН, МНТЦ «Укрытие», «Радиового института», ЧАЭС и ряда других учреждений.

Согласно выводам экспертов предельно осторожная оценка количества топлива в пом. 305/2 составляет – 60 т по урану [2].

«Горизонтальный поток» ЛТСМ

Совокупность данных по скоплениям ЛТСМ, входящим в «горизонтальный поток», представлена в таблице 6 [2]. На рис. 23–24 показаны фото ряда помещений (см. также рис. 1–3).

Таблица 6. Экспертные характеристики скоплений ЛТСМ, входящих в состав «горизонтального потока» (помещения на отметке +9.00 и на отметках +6.00 и 0.00, в которые поток попал по технологическим проходкам)

№ помещения	Краткая характеристика скопления ТСМ	Объем ТСМ, м³	Масса топлива (по урану), т	Примечание
304/3	Слой ЛТСМ на полу помещения толщиной 0,6÷1 м (см. рис. 23)	50÷70	6 ± 2	Учтен объем ТСМ, в проломе
303/3	ЛТСМ на полу под бетоном	2÷7	0,5 ± 0,3	
301/5	ЛТСМ, лежащие открыто и под бетоном (см. рис. 24)	8÷30	2,0 ± 1,5	
301/6	ЛТСМ на полу под бетоном	8÷30	2,0 ± 1,5	
217/2	«Слоновья нога», «сталактиты», «капля» (см. рис. 1, 2)	2÷4	0,4 ± 0,2	
017/2	Отдельные фрагменты ЛТСМ на «свежем» бетоне	Малый		Возможно присутствие ТСМ под бетоном



Рис. 23. Черная керамика на полу пом. 304/3. В это помещение лава проникла через пролом в стене из пом. 305/2. Здесь – начало «горизонтального потока»



Рис. 24. Коридор 301/5, вид с запада на восток. Следующее помещение «горизонтального потока», в которое лава попала из пом. 304/3 через открытую дверь. Основная часть ее находится под слоем «свежего бетона» и только небольшой «язык» открытых ЛТСМ пересекает коридор (см. также рис. 17)

Согласно выводам экспертов общий вес топлива в «горизонтальном потоке» и на нижних этажах, в которые он попал, составляет (11 ± 4) т по урану [2].

«Большой» и «малый» вертикальные потоки

Совокупность данных о скоплениях ЛТСМ, входящих в состав «большого и малого вертикальных потоков», представлена в таблице 7 (см. [2]).

На рис. 25–32 показаны схемы распространения ЛТСМ по помещениям ПРК, ББ-1, ББ-2 и фото отдельных скоплений. На схемах помещений приведены некоторые результаты измерений МЭД (Р/час.). В качестве детекторов использовались термолюминесцентные дозиметры — ТЛД, укрепленные на специальной рейке или на шнуре, которые забрасывались на поверхность ЛТСМ.

Таблица 7. Данные о ЛТСМ, входящих в состав «большого и малого вертикальных потоков»

№ поме- щения, отметка	Краткая характеристика скопления ТСМ	Объем ЛТСМ, м³	Масса топлива (по урану), т	Примечание
210/7 (+6.000). ПРК	Застывшая лава (преимущественно коричневая керамика) и металл, поступавшие из 4-го ПК (рис. 25)	13÷28	3,7÷0,4	Учтен объем ЛТСМ в ПК
210/6 (+6.000). ПРК	Застывшая лава (преимущественно черная керамика) и металл, посту- павшие из 3-го и 4-го ПК (рис. 26)	17÷30	2,4÷6,2	Учтен объем ЛТСМ в ПК
210/5 (+6.000). ПРК	Застывший металл на полу помещения (рис. 27)	—	—	Топлива в помещении не обнаружено
Всего в ПРК находится (11.4 ± 5.3) т топлива (экспертное значение ⁸)				
012/15 (+3.000) ББ -2	«Куча» второго этажа ББ (рис. 28, 29)	23 ± 6	5,2 ± 2	Учтено топливо в паросбросных трубах
012/14 (+3.00) ББ -2	Лава, в четырех трубах, в районе ряда Л.	До 1.4 (?)	(?)	
	Лава, под бетоном вдоль оси 46 ₊₁₀₀₀ между рядами К-М	До 20 (?)	(?)	
Всего в ББ-2 может находиться до 14 т топлива. Экспертное значение — (8 ± 3)				
012/7 (+0.00) ББ-1	«Куча» первого этажа ББ	2,5 ± 0,5	0,4÷1,3	Учтено топливо в паросбросных трубах
012/6 (+0.00) ББ-1	Застывшая лава, находящаяся в четырёх трубах, расположенных в районе ряда Л.	(?)	0,1(?)	
	Застывшая лава, находящаяся под бетонными аплывами вдоль оси 46 ₊₁₀₀₀ , между рядами К—М	(?)		
Всего в ББ-1 находится (1.0 ± 0,5) т топлива (экспертное значение)				

⁸В группу экспертов входили специалисты «Курчатовского института», ИБРАЭ, МНТЦ «Укрытие», «Радиового института», ЧАЭС и ряда других учреждений.



Рис. 27. ПРК. Застывший металл на полу пом. 210/5

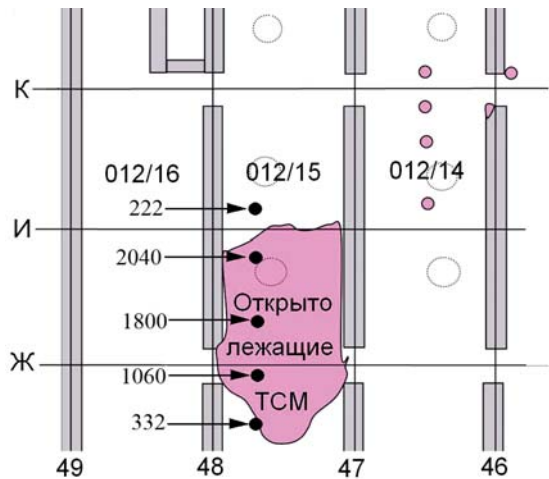


Рис. 28. Схема помещений ББ-2 и места расположения скоплений ЛТСМ. Приведены некоторые результаты измерений МЭД (Р/час), выполненные в январе 1989 г.



Рис. 29. Открыто лежащие ЛТСМ – «Куча» в ББ-2

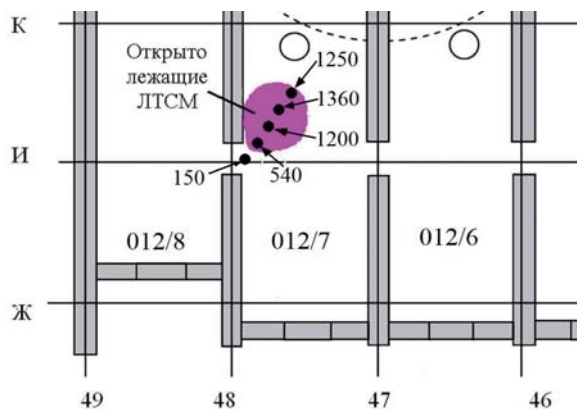


Рис. 30. Схема помещений ББ-1 и места расположения скоплений ЛТСМ. Приведены некоторые результаты измерений МЭД (Р/час), выполненные в январе 1989 г.



Рис. 31. Открыто лежащие ЛТСМ — «Куча» в ББ-1 (первоначальный вид)



Рис. 32. «Куча» в ББ-1 после нанесения слоя ЭКОР для предотвращения разрушения поверхности ЛТСМ и распространения пыли

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровой А.А. Мой Чернобыль. Новый мир № 3, 1996 г., с. 132–180.
2. 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.
3. Жидков А.В. Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния. В сборнике «Проблемы Чернобыля». Выпуск 7, Чернобыль, 2001. с. 23–40.
4. Боровой А.А., Довбенко А.А., Смолянкина М.В., Строганов А.А. Определение ядерно-физических характеристик топлива 4-го энергоблока ЧАЭС. Отчет ИБРАЭ РАН, 52/11-20, Москва, 1991, 32 с.
5. Пазухин Э.М. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока черновбыльской АЭС топография, физико-химические свойства, сценарий образования. Радиохимия, т. 36, вып. 2, 1994, с. 97–142.
6. Изучение физико-химических свойств ядерноопасных делящихся материалов Объекта «Укрытие», в том числе тех, которые влияют на степень ядерной, радиационной и радиозокологической безопасности Объекта «Укрытие» ОТЧЕТ МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 2000, 45 с.
7. Боровой А.А., Пазухин Э.М. Соотношения изотопов плутония в зависимости от степени выгорания ядерного топлива. Радиохимия, 2003, т. 45, № 2, с. 191–192.
8. Международный Научно-Технический Центр. Проект № 2916 «Разработка модели поведения ядерного топлива во время активной стадии черновбыльской аварии». Итоговый отчет (февраль 2005 г. — июль 2007 г.). Исполнители РНЦ «Курчатовский институт» и ИБРАЭ РАН. Руководитель Проекта Боровой А.А. Москва 2007 г., 50 с.
9. Богатов С.А., Боровой А.А., Лагуненко А.С., Пазухин Э.М., Стрижов В.Ф., Хвошинский В.А. Образование и растекание черновбыльских лав. Радиохимия т. 50, вып. 6, 2008, с. 565–568.
10. 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.
11. 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.

8. ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СКОПЛЕНИЙ ЛТСМ

8.1. 1986–1987 годы

Все прошедшие годы вопрос о ядерной безопасности скоплений ЛТСМ, находящихся в «Укрытии», являлся одним из ключевых вопросов, как для текущей эксплуатации объекта, так и для работ по его преобразованию. Наиболее полная информация о проведенных исследованиях, содержится в работах [1–3].

В предлагаемой главе основное внимание будет уделено тому, как по мере накопления экспериментальных данных и развития расчетных методик, происходила эволюция представлений о ядерной безопасности объекта «Укрытие».

Как говорилось в гл. 1, первые оценки возможности возникновения СЦР в топливе разрушенного реактора были сделаны через несколько дней после аварии и основывались на предположении о том, что в шахте реактора остался кластер уран-графитовой кладки. При определенных условиях он представлял бы ядерную опасность.

Однако отсутствие в отбираемых пробах воздуха короткоживущих радионуклидов, а в дальнейшем результаты измерений температуры и гамма-полей над развалом реактора и в доступных помещениях блока указывали на отсутствие признаков СЦР.

Тем не менее опасность повышения критичности ТСМ в объекте являлась постоянным источником беспокойства для Правительственной комиссии.

Приведем два примера.

В октябре 1986 г. в разгар работ по сооружению «Укрытия» у ПК неожиданно возникли подозрения в том, что «реактор заработал».

Почти одновременно произошли три события:

- с 15 октября температура в ряде нижних помещений блока стала возрастать;

- 21 октября активность фильтров аспирационных установок, находящихся около блока значительно повысилась;

- в этот же день вертолетчики, работавшие по программе «Галс» (см. гл. 2, рис. 29 и 30), произвели очередное измерение МЭД над развалом реактора на высоте 200 м и получили значение более 35 Р/час, в 4 раза большие, чем день назад.

С учетом того, что на площадке станции и в локальной зоне «Укрытия» находились многие сотни работающих людей, Председатель ПК поручил сотрудникам ОГ за кратчайшие сроки найти причины произошедших событий и дать свои рекомендации по контрмерам (см. [4]).

Причина одного из эффектов – повышение температуры в нижних помещениях блока, отмечавшееся уже несколько дней, обсуждалась в ОГ и оказалась достаточно тривиальной. В это время происходило дистанционное бетонирование фундаментов опор, на которые должны были опираться несущие балки создаваемого «Укрытия». Бетон от специальных насосов по трубопро-

водам поступал к опорам. Проконтролировать его укладку было чрезвычайно трудно из-за огромных радиационных полей и разрушенных конструкций. В результате значительная часть бетона утекала в нижние помещения, заливая их и перекрывая пути воздуху, который раньше охлаждал топливосодержащие материалы. Температура в этих помещениях начала повышаться. Этому способствовало и то, что бетон при отвердевании выделяет тепло.

Второй эффект — повышение активности фильтров оказался связан с тем, что строители в этот день изменили пути движения транспорта на площадке «Укрытия» и теперь почти непрерывный поток бензовозов проезжал в непосредственной близости от аспирационных установок, отбрасывая на них клубы поднятой радиоактивной пыли.

Третий эффект, вызвавший особое беспокойство ПК, как установили сотрудники ОГ, был связан с ошибкой обработки измерений, проведенных на вертолете. Экипажи вертолетов сменились, и вновь прибывшие летчики не были полностью ознакомлены с процедурой этой обработки.

В дальнейшем (22–24) курчатовцы сами провели измерения по программе «Галс», установив на вертолете несколько контрольных дозиметров производства СССР, США и Японии. Для ПК были сделаны фотографии, на которых одновременно видно показания дозиметров и приборов вертолета, показывающих координаты его положения. Никакого повышения радиационного фона по сравнению с предыдущими днями над развалом не наблюдалось. Измеренная величина МЭД составляла $(8,8 \pm 1,5)$ Р/час.

Задание ПК было выполнено [5].

Второй пример относится к лету 1987 г. Установившаяся очень жаркая и влажная погода привела к тому, что оставшиеся в развале реактора в центральном зале окислы ^{106}Ru стали энергично возгораться (см. Гл. 7 раздел 7.1.2.) и потоком воздуха выноситься под кровлю ЦЗ, где были установлены дозиметры контрольно-диагностической системы.

Опять сотрудники ОГ должны были в кратчайшие сроки доказать, что наблюдающееся повышение величины МЭД не связано с СЦР. Что и было выполнено с помощью спектрометрического анализа воздуха над центральным залом.

Отсутствие информации о параметрах конкретных скоплений ТСМ, находящихся в помещениях «Укрытия», не позволяло делать каких-либо выводов об их подкритичности и тенденциях к ее изменению. Приходилось довольствоваться интегральными оценками радиационных и тепловых характеристик объекта, как целого. Положение изменилось после начала бурения исследовательских скважин.

8.2. 1988–1990 годы

Бурение скважин позволило определить геометрию многих скоплений ТСМ, измерить нейтронные поля вблизи них и исследовать многочисленные пробы, отобранные с поверхности этих скоплений. К сожалению, в большинстве случаев при углублении бура в топливосодержащий материал бурение наталкивалось на огромные трудности, связанные с необходимостью защиты персонала от переоблучения. Освоить технику «горячего» бурения так практически и не удалось.

Оценки, сделанные на основании анализов проб лавы, показывали, что сухие ЛТСМ глубоко подкритичны и гипотетическую опасность лавы могут представлять только при попадании в них достаточного количества воды (это иллюстрирует рис. 1¹).

Расчеты параметров гомогенной системы ($\text{UO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$)² проводились много раз и все они привели к результатам близким к полученным в первой работе [6].

На рис. 2 представлена диаграмма состояний системы в зависимости от двух важнейших параметров — количества топлива и его выгорания. При расчетах содержание воды в каждой точке выбиралось таким, чтобы коэффициент размножения нейтронов — K_∞ был максимален (наиболее консервативный подход).

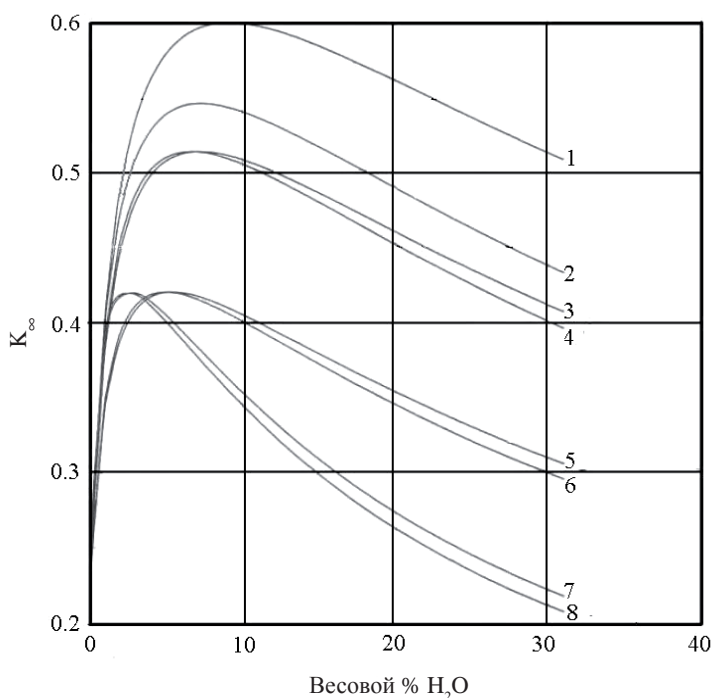


Рис. 1. Расчетная зависимость K_∞ от содержания воды. Параметры ЛТСМ:

- 1 — коричневая керамика, $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, содержание $\text{UO}_2 = 10\%$;
- 2 — коричневая керамика, $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, содержание $\text{UO}_2 = 8\%$;
- 3 — коричневая керамика, $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$, содержание $\text{UO}_2 = 7\%$;
- 4 — коричневая керамика, $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$, содержание $\text{UO}_2 = 8\%$;
- 5 — черная керамика, $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$, содержание $\text{UO}_2 = 5\%$;
- 6 — черная керамика, $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$, содержание $\text{UO}_2 = 5\%$;
- 7 — черная керамика, $\rho = 1,25 \text{ г/см}^3$, содержание $\text{UO}_2 = 5\%$;
- 8 — черная керамика, $\rho = 1,15 \text{ г/см}^3$, содержание $\text{UO}_2 = 5\%$;

¹Расчеты выполнены группой Г.А. Шароварова, ИРЭП.

²При замене сложного состава лавы на ($\text{UO}_2 + \text{SiO}_2$) оценки критических параметров получаются более консервативными.

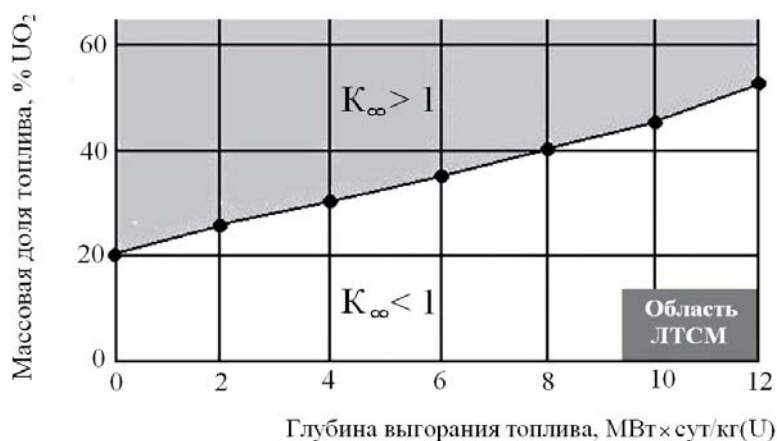


Рис. 2. Зависимость K_{∞} от содержания урана и выгорания топлива в системе (ЛТСМ + вода) [6]

Темная область — область, в которой возможна самоподдерживающаяся цепная реакция. Прямоугольник внизу — область параметров «чистой лавы»³.

Поэтому «чистая лава» в любой смеси с водой не способна к СЦР. Учет любых других параметров, например наличия других химических элементов в составе лавы, присутствие поглотителей, конечные геометрические размеры и т.п. только усиливает это утверждение.

Первым и общепризнанным документом, описывающим состояние ядерной безопасности объекта «Укрытие» было «Техническое обоснование ядерной безопасности» (ТОЯБ), выпущенное КИ в 1990 г. [7].

В этой работе были суммированы имевшиеся экспериментальные и расчетные данные о топливосодержащих материалах объекта «Укрытие» и на их основе сделаны выводы о ядерной безопасности объекта. Приведем некоторые выводы ТОЯБ.

«С момента завершения активной стадии аварии совокупность диагностических измерений указывает на подкритичность всех ТСМ, находящихся на объекте «Укрытие». Количественные показатели коэффициента размножения для лавообразных ТСМ, полученные в экспериментах:

- *менее 0,4 (на основе пассивных методов);*
- *менее 0,7 (на основе активных методов)»⁴.*

В работе отмечалось, что все исследования ТСМ проводились на поверхности скоплений, т.к. проникновению внутрь препятствовало отсутствие технологии извлечения высокоактивных кернов.

Расчетные исследования также подтвердили, что все обнаруженные к тому времени модификации ТСМ, в любых геометрических комбинациях, допускаемых размерами помещений «Укрытия», при отсутствии воды глубоко подкритичны.

³Со временем количество проанализированных проб «чистой лавы» увеличивалось, достигло ~300, но их характеристики (содержание топлива и выгорание, см. Гл. 7, раздел 7.1.2) не выходили за пределы указанных параметров.

⁴См. Гл. 4, раздел 4.3.

Оценки критичности смесей, состоящих из лавообразных ТСМ и воды, показали, что при исследованном составе лавы K_{∞} всегда меньше 1. (Опять-таки по результатам, полученным только для поверхностных образцов).

Как же оценивалась безопасность ТСМ, сосредоточенных в глубине скоплений?

Здесь обоснование безопасности опиралось на то, что проникновению воды внутрь скоплений лавы препятствовали два барьера:

- тепловой (большие скопления лавы должны были, по оценкам, иметь внутри температуру значительно превышающую 100 °С, поскольку на поверхности измеренная температура составляла 60–70 °С);

- наличие водонепроницаемой стеклообразной поверхности.

Дополнительным барьером безопасности служило то, что исследованные образцы воды в «Укрытии» содержали нейтронные поглотители – соли бора и гадолиния, которые растворялись в воде при ее протекании через материалы, находящиеся в Центральном зале (или вводились в объект при производстве работ).

Окончательный вывод ТОЯБ был следующий:

«...можно считать, что в настоящее время объект «Укрытие» является ядернобезопасным»

Кроме того, на основании исследования динамики поведения ТСМ указывались и неблагоприятные тенденции (например, охлаждение скоплений, разрушение их поверхности и т.п.), которые в будущем должны были привести к понижению подкритичности топливных скоплений и пересмотру выводов о ядерной безопасности объекта. Так и произошло.

8.3. 1990–1996 годы

8.3.1. «Аномальное нейтронное событие»

Во второй половине июня месяца 1990 г. информационно-измерительная система «Финиш», работающая на «Укрытии», регистрировала потоки нейтронов с помощью 5 детекторов. Напомним (см. Гл. 4, раздел 4.3), что каждый из них представлял собой камеру деления КНТ-31, окруженную оргстеклянным замедлителем (около 15 мм) и помещенную в стальной корпус.

Из 5 детекторов – два были установлены в реакторном пространстве на отметках +18.00 (Канал 48) и +15.00 (Канал 46), по одному детектору находилось в подаппаратном помещении 305/2, в ПРК (Канал 45) и в помещении 304/3 (Канал 50). Все детекторы были установлены с помощью скважин. Схема их размещения представлена на рис. 3.

24.06.90 г. оператор, дежуривший на пульте «Финиша» во вторую смену, обратил внимание на повышение скорости счета 50-го канала (примерно 4,0 имп./с вместо обычных ~2,5 имп./с). Нейтронный детектор этого канала был установлен 16.06.90 г. в помещении 304/3 через скважину 3-10-Г (из помещения 207/4) на расстоянии 16,5 м от превентора скважины непосредственно на поверхности ЛТСМ. После полной проверки 19.06.90 г. он был подключен к системе «Финиш».

В дальнейшем (25 – 29 июня) счет в канале продолжал повышаться и превысил обычный уровень приблизительно в 60 раз (на рис. 4).

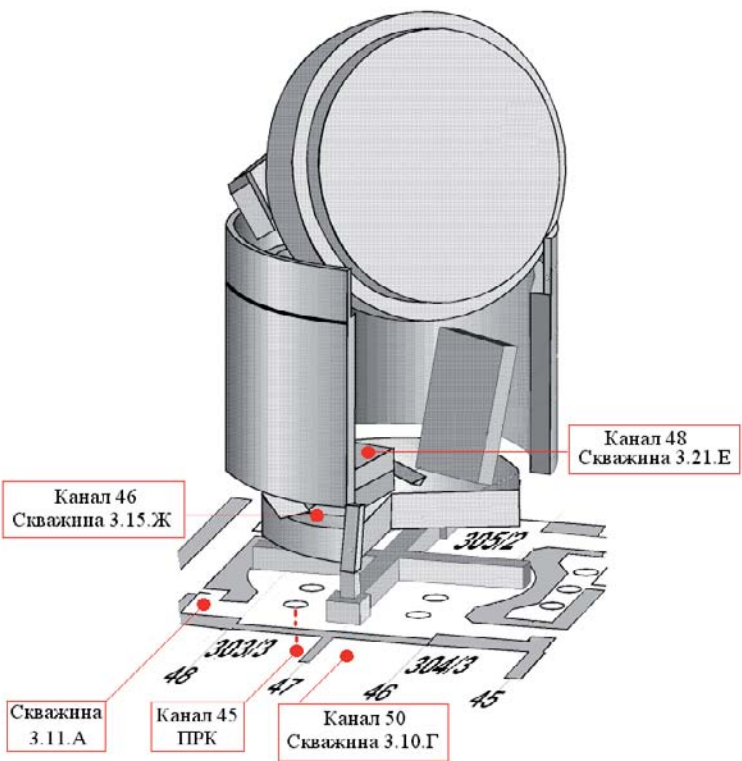


Рис. 3. Схема расположения нейтронных каналов системы «Финиш» летом 1990 г.

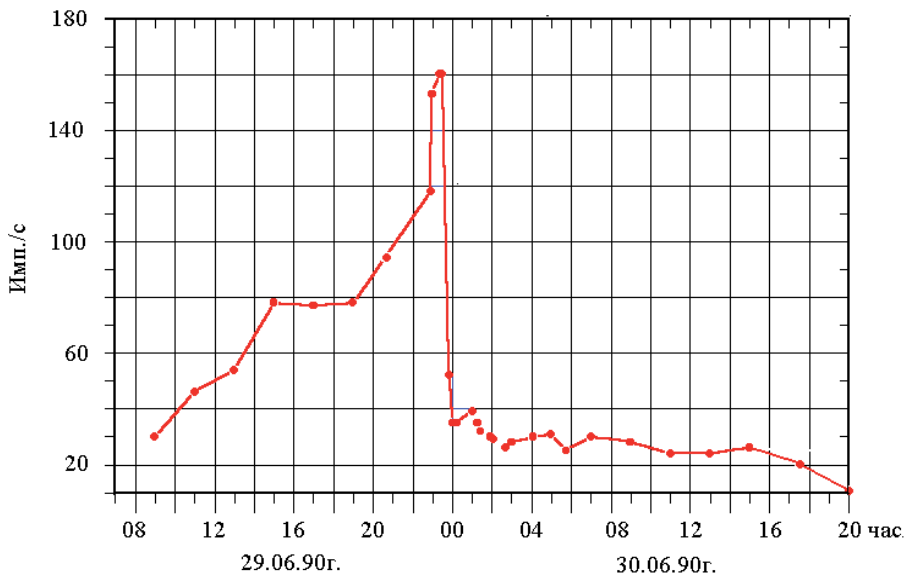


Рис. 4. Временная зависимость счета 50-го канала системы «Финиш» 29 и 30 июня 1990 г.

Все это время проводились мероприятия, по поиску причин аномального поведения 50-го канала. В течении 25 и 26 июня была проведена полная проверка всего счетного тракта 50-го канала «Финиша», которая не выявила приборных неисправностей.

Одной из причин изменения скорости счета детектора могло быть смещение его из начального положения. Поэтому 27.06.90 г. был произведен осмотр помещения 304/3 из помещения 318/2 с помощью перископа. Каких-либо изменений в помещении 304/3 обнаружено не было. В тот же день с целью проверки работоспособности детектора и всего тракта к детектору через скважину 3-10-Г. был доставлен на штанге источник нейтронов (^{252}Cf) интенсивностью $\sim 1 \cdot 10^7$ нейтр./с. Реакция счетного канала соответствовала ожидаемой и не выявила каких-либо аномалий⁵.

27.06 и 28.06 через скважину Ю.12.72 в помещении 304/3 был введен разведывательный нейтронный детектор. Результаты его счета: $(19,7 \pm 0,8)$ имп./с и $(34,4 \pm 1,2)$ имп./с соответственно. А проведенные в этой же точке измерения в феврале 1990 г. давали результат $(2,51 \pm 0,07)$ имп./сек.

В связи с дальнейшим повышением скорости счета в канале 50 системы «Финиш» (примерно до 160 имп./с) 29.06.90 г. было принято решение о заливке помещения 304/3 раствором азотнокислого гадолиния — поглощающим нейтроны. Он вводился двумя порциями по 80 л. Первая порция была вылита на западную часть помещения 304/3, вторая — на восточную часть. После первой заливки скорость счета упала до 30 имп./с. После второй заливки произошло снижение до 25 имп./с и затем, в течение суток, до 2,4 имп./с.

Все это время другие нейтронные каналы системы «Финиш» регистрировали обычную скорость счета.

8.3.2. Возможные причины «аномального события»

Наиболее подробное и авторитетное исследование причин аномального события в помещении 304/3 в июне 1990 г. было проведено специальной комиссией ИБРАЭ [8].

В первую очередь подробно анализировались возможные неисправности аппаратуры. Рассмотрение всех представленных актов проведенных проверок и результатов контрольных экспериментов не выявило таких неисправностей.

Второе, наиболее простое объяснение было связано с тем, что в результате большого количества осадков, выпавших в середине июня 1990 г., вода, постоянно проникающая в «Укрытие» через щели в кровле и стенах, могла подтопить помещения 305/2 и 304/3. Это вызвало бы изменение (смягчение) спектрального состава потока нейтронов от ТСМ и повышение счета детектора, который регистрирует тепловые нейтроны. Оценки влияния такого эффекта были сделаны в КИ. Позднее был выпущен отчет, содержащий эти оценки [9]. Приведем некоторые данные из этой работы.

На рис. 5 представлена геометрия измерений: детектор — ионизационная камера деления, окруженная замедлителем, лежащая на полу помещения и слой воды. Высота этого слоя (h) при расчетах варьировалась.

⁵Обычный эксперимент с нейтронным источником ^{252}Cf неожиданно стал толчком для появления через много лет фантастических рассказов на тему о том, что кто-то имитировал «аномальное событие», находясь в помещении 304/3 и постепенно пододвигая некий неучтенный источник нейтронов к детектору (в течение 6 дней и в поле примерно 200 Р/час!)

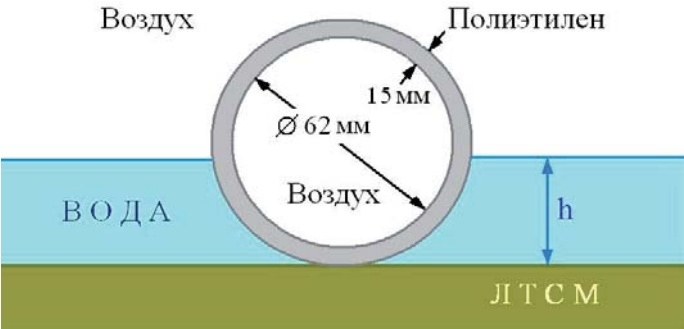


Рис. 5. Геометрия измерений

На следующем рис. 6 приведены (в виде диаграммы) данные расчетов относительной скорости счета камеры при различной высоте слоя воды. Видно, что существует сильная зависимость эффективности регистрации от h в случае, если камера не имеет замедлителя. Присутствие последнего резко уменьшает эту зависимость, и ни при каких величинах h не удастся даже приблизиться к наблюдавшейся величине – 60 раз.

После проверки всех гипотез «под подозрением» осталась одна – значительное увеличение генерации нейтронов (в пределе – возникновение СЦР) при попадании воды в скопление ТСМ, находящееся в помещении 305/2 у пролома в стене, ведущего в помещении 304/3.

В этом случае детектор реагировал на рассеянное нейтронное излучение, которое сначала возрастало, а затем стало активно поглощаться после залива

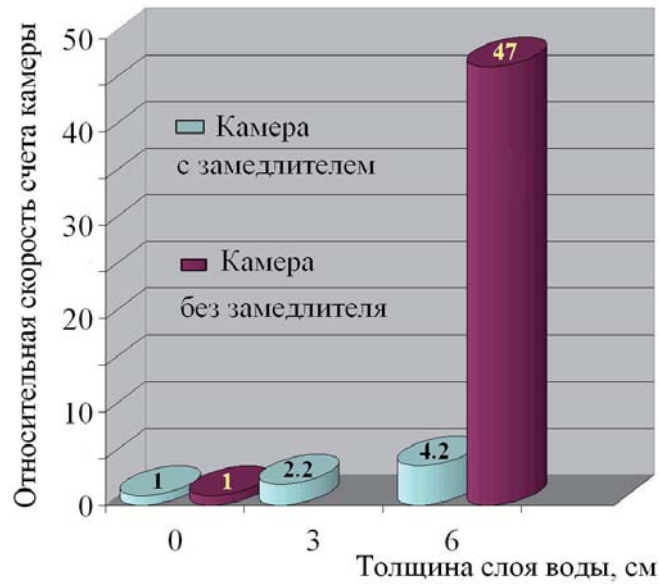


Рис. 6. Расчетные данные по зависимости скорости счета камеры деления от слоя воды, заливающей ее, для случая работы с замедлителем и без замедлителя

помещения раствором гадолиния. К такому же выводу пришли и специалисты ФЭИ [10]⁶.

Какие факты говорили о реалистичности такой гипотезы?

1. Указания на то, что в юго-восточном квадранте пом. 305/2 находятся значительные скопления топлива, были получены при проведении тепловых измерений в скважинах еще в 1988–1990 гг. (см. гл.4, раздел 4.2).

2. «Чистая лава» при любом содержании воды не способна значительно изменить свою подкритичность (см. рис. 2). Однако из глубины скоплений ЛТСМ пробы не отбирались и вполне можно было предположить, что там содержание урана (при среднем выгорании) значительно превышает его содержание в ЛТСМ на поверхности. Например, скопление может представлять собой смесь лавы с непереплавленными фрагментами активной зоны (АЗФ).

Расчеты критичности систем (ЛТСМ + АЗФ + вода) впервые были сделаны в «КИ» в 1992–93 гг. [11]. Исходные данные для этих расчетов выбирались следующими: изотопный состав топлива – 1 % ^{235}U , 0,2 % ^{239}Pu , выгорание ~ 10 МВт·сут/кг(U); состав ячейки: ТВЭЛ-ы РБМК, вода, ЛТСМ; состав ЛТСМ: UO_2 – 0,2 г/см³, SiO_2 – 2 г/см³; отражатель: бетон, 50 см. Количество воды: выбрано из условия K_∞ – максимально.

На диаграмме (на рис. 7) приведена зависимость диаметра критической сферы⁷ от отношения объема, занятого ТВЭЛ-ами к объему ЛТСМ.

Для топлива с меньшим выгоранием радиусы критических сфер уменьшаются. Если в воде содержится бор, то критические размеры и масса ТВЭЛ-ов начинают возрастать. Позднее системы, состоящие из (ЛТСМ + АЗФ + вода) различной геометрии (включая многослойные модификации) были исследованы в других работах [12–14].

3. Изучение материалов кернов, полученных при бурении скважин в юго-восточной части пом. 305/2 показало, что в них встречаются непереплавленные фрагменты топлива. Эта информация была впервые суммирована в отчете [15]. Она являлась косвенным указанием на то, что в глубине скоплений ТСМ может существовать композиция (ЛТСМ + АЗФ) с критическим соотношением объемов лавы и фрагментов АЗ.

Кроме того, продолжающиеся визуальные наблюдения зарегистрировали фрагменты зоны, находящиеся в непосредственном соприкосновении с лавой.

4. Вписывается ли критическая сфера с размеры скопления ТСМ, находящегося в пом. 305/2 на границе с пом. 304/3 у пролома? Ответ на этот вопрос можно получить из рис. 8, взятом из [16].

⁶По их оценкам аномалия возникла в результате поступления воды от атмосферных осадков в локальную зону ТСМ, вплоть до возникновения СЦР с числом деления 10^{18} и разгоном на запаздывающих нейтронах при эффективном коэффициенте размножения $K_{\text{эф}} \approx 1,4 \cdot 10^{-3}$ β. Эта аномалия была интерпретирована как холодный критический инцидент. Предполагается, что условия критичности могли быть достигнуты за счет процессов миграции воды при максимальной скорости введения реактивности 10^{-4} β/с.

⁷Области с размерами, допускающими возникновение СЦР при достижении остальных критических параметров.

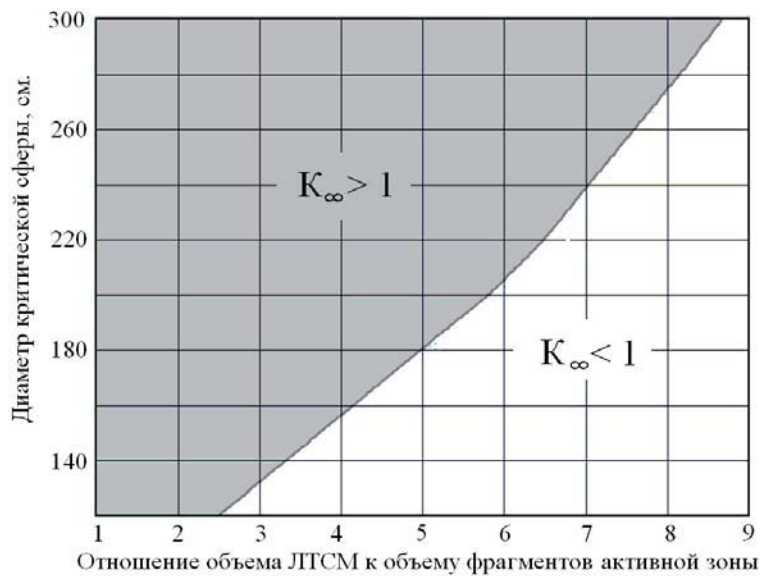


Рис. 7. Область возможных критических состояний системы (ЛТСМ + АЗФ + вода)

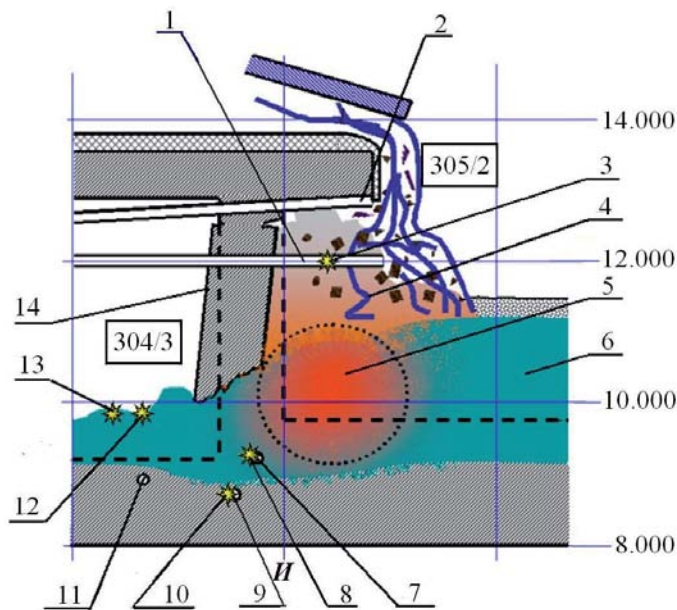


Рис. 8. Скопление ТСМ у пролома между пом.305/2 и 304/3. Сечение по оси 46+2800. Обозначения: 1 – скважина Ю.12.78 (МЭД до 2000Р/час); 2 – скважина Ю.12.83 (МЭД до 900 Р/час); 3 – детектор ИИС «Финиш», каналы 40, 42 (ось 46+2800); 4 – завал; 5 – область возможного расположения скопления ЛТСМ с включениями непереплавленного топлива; 6 – ЛТСМ, концентрация урана 4–6%; 7 – скважина 3.9.Ф (МЭД до 1200Р/час); 8 – детектор ИИС «Финиш», канал 3 (ось 46+3800); 9 – скважина 3.9.107 (МЭД до 500Р/час); 10 – детектор ИИС «Финиш», каналы 45, 55 (ось 46+3000); 11 – 3.9.Р (МЭД до 30Р/час); 12 – детектор СК ТСМ «Сигнал», каналы 5, 6, 7, 8 (ось 47-1500); 13 – детектор СК ТСМ «Сигнал», каналы 5, 6, 7, 8 (ось 47-1500); 14 – раздельная стена между помещениями 305/2 и 304/3

Из рисунка видно, что сфера с $\varnothing \sim 2$ м помещается в неисследованной области внутри скопления ТСМ.

Заключение о существовании в юго-восточном квадранте пом. 305/4 большого количества топлива в ТСМ находит свое подтверждение и в наблюдениях, сделанных в 1988–1990 гг. в парораспределительном коридоре. Бетонный потолок ПРК (подреакторная плита) под этим квадрантом оказался прожженным, деформированным. Его металлическая плакировка⁸ заметно прогнулась.

Следует также отметить, что к началу 1990 года температура в скоплении упала ниже 100 °С, что позволило воде свободно проникать в его глубину, поступать на нижнее перекрытие помещения 305/2;

8.3.3. «Аномальные события» 1996 г.

Двум событиям, зафиксированным 12 и 16 сентября 1996 г., предшествовали дождливые дни и протекали они по близкому сценарию.

12.09.1996 в 8 час. 43 мин. было установлено трехкратное превышение скорости счета по сравнению с обычным значением в каналах 7, 8 (плотность нейтронного потока) и в канале 29 (мощность дозы гамма-излучения), измерительной системы «Финиш» (см. таблицу 1).

Таблица 1. Некоторые характеристики аномального события, зарегистрированного системой «Финиш» 12.09.96 г.

Измерительный канал (детектор)	Измеряемая величина (единицы измерения)	Помещение, координаты	Показания			Контрольный уровень
			11.09.96 22 час 32 мин	12.09.96 08 час 43 мин	12.09.96 09 час 45 мин	
50 (7)	нейтр.·см ⁻² ·с ⁻¹	304/3, отметка +9.70 47 ₋₃₀₀₀ ; И ₋₂₀₀₀	95,2	316,03	95,71	—
53 (8)	нейтр.·см ⁻² ·с ⁻¹	304/3, отметка +9.00 46 ₊₃₈₀₀ ; И ₋₆₀₀	81,6	317,9	81,6	276
51 (29)	Р/час	реактор, отметка +15.00 47 ₊₁₇₀₀ ; К ₋₁₀₀₀	873,5	1863,6	871,0	1430

В 9 час. 45 мин. счет в каналах 50, 53 и 51 снизился до обычного значения, безо всяких воздействий со стороны персонала.

Параллельно с каналами системы «Финиш» в тех же помещениях работали нейтронные детекторы (№№ 6, 9 и 10) системы «Сигнал», которая находилась в режиме наладки. На них в это время также отмечалось увеличение счета.

Какого-либо увеличения концентрации радиоактивных аэрозолей в объекте и на его площадке зарегистрировано не было.

⁸Плакировка — слой металла, нанесенный на поверхность.

16.09.1996 в промежутке от 16 час 33 мин до 18 час 20 мин нейтронные каналы системы «Финиш» 50(7), 53(8) и 45(10) снова показали скорость счета, превышающую контрольный уровень (нейтронный детектор 45 канала установлен в помещении 210/7 на отметке +6.50; координаты: 47+1700; К-1000). В отличие от 12.09.96 увеличения мощности гамма-дозы установлено не было.

За относительно короткий срок инцидентов детальную информацию о них собрать не удалось. Это повлияло на решения многочисленных комиссий.

Вот некоторые выводы, сделанные на международном совещании экспертов, проведенном 5–6 ноября 1996 г. в г. Киеве:

«Исходя из имеющейся информации не представляется возможным однозначно определить непосредственные причины аномальных событий сентября 1996 г, которые могут быть как аппаратурного, так и нейтронно-физического характера.

Не вызывает сомнений, что коренной причиной событий является попадание влаги в объект «Укрытие», которая может привести как к аппаратурным помехам, так и к увеличению показаний детекторов за счет смягчения спектра нейтронов».

По мнению экспертов, признаков, указывающих на достижение критичности ТСМ ($K \geq 1$), не выявлено.

8.3.4. «Анализ текущей безопасности...» (1996 г.)

В 1996 г. был выпущен документ «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации» [16]. Цели «Анализа...» сформулированы в названии документа — определение существующего уровня безопасности, выявление наиболее опасных тенденций и определение приоритетов будущих работ по повышению безопасности «Укрытия».

Для написания этого документа была собрана и оценена информация о научных исследованиях, проводившихся в 1986–1995 гг. на объекте «Укрытие», проанализирована конструкторская и строительная документация, изучена нормативно-техническая база документов и документация по техническому обслуживанию объекта «Укрытие».

«Анализ...» стал необходимым документом для выдачи ЧАЭС лицензии на начало масштабных работ по преобразованию объекта в безопасное состояние.

Особое внимание в нем уделялось ядерной безопасности объекта.

Было отмечено, что ряд барьеров безопасности на пути возникновения СЦР (как и предсказывалось в ТОЯБ) заметным образом понизился.

Если ранее проникновению воды в лавообразные ТСМ препятствовали ее высокая температура и водонепроницаемость самого вещества, то сейчас ситуация изменилась. Наблюдения регистрировали значительное охлаждение лавы, ее растрескивание и превращение в водопроницаемую структуру.

По мере охлаждения топлива в «Укрытии» и уменьшения мощности технологических источников тепла все большее значение стала играть конденсационная вода, образующаяся на холодных поверхностях в помещениях объекта. В 1995–96 гг. ее количество измерялось сотнями кубометров в год. Эта вода уже не проходит через большое количество материалов и не содержит поглощающих нейтроны элементов.

Наконец исследования 1995–96 гг. показали, что в условиях «Укрытия» вода достаточно быстро очищается от нейтронно-поглощающих добавок. При прохождении слоя из осколков бетона, песка и др. строительных конструкций она практически полностью теряет растворенные соли гадолиния и бора.

Поэтому в «Анализе...» заключение ТОЯБ было пересмотрено (как, собственно, это и предсказывалось в ТОЯБ).

В этом документе были впервые предложены критерии классификации помещений объекта «Укрытие» по степени их ядерной безопасности, которые впоследствии широко использовались.

Сложившиеся в объекте композиции ТСМ были разбиты на 4 группы:

- реальные и могущие образоваться на их основе композиции, в которых, однако, возникновение СЦР невозможно (по ядерно-физическим, геометрическим или другим причинам) (группа 1);

- реальные и могущие образоваться на их основе композиции, для которых возникновение СЦР принципиально возможно, но это связано со стечением настолько маловероятных событий, что практически ядерная опасность отсутствует (группа 2);

- могущие образоваться новые композиции, в которых возникновение СЦР принципиально возможно, но на пути ее реализации существует ряд известных барьеров безопасности (группа 3);

- могущие образоваться новые композиции, в которых возникновение СЦР принципиально возможно, а о существовании барьеров безопасности достаточной информации нет (группа 4).

Соответственно этим группам по степени ядерной опасности были разбиты и помещения объекта «Укрытие», в которых реализовались те или иные композиции.

Было показано, что совокупность наших знаний о ряде скоплений ТСМ недостаточны, чтобы доказать невозможность (или вероятность $<10^{-5}$ 1/лет) возникновения в них СЦР, т.е. они относятся к 4 группе опасности.

К этим помещениям относятся центральный зал (ЦЗ), шахта реактора и подаппаратное помещение 305/2, в котором сосредоточена основная масса топливной лавы, пом. 307/2, скопление топлива под каскадной стеной.

В случае возникновения в этих помещениях СЦР и при 100% выходе всех летучих радионуклидов за пределы «Укрытия» эффективная эквивалентная доза $D_{эфф}$ на персонал, находящийся в момент выброса в локальной зоне, может составить несколько мЗв.

Что касается облучения персонала внутри объекта, то оценить здесь ингаляционные дозы чрезвычайно трудно. Они зависят от очень многих специфических для конкретного помещения факторов – удаленности от места возникновения СЦР, направления и интенсивности воздушных течений, существования локальных защитных барьеров и т.п.

Окончательный вывод «Анализа...»

Сейчас объект «Укрытие» нельзя считать ядернобезопасным...

В случае возникновения СЦР авария будет носить локальный характер и может рассматриваться максимально, как инцидент по шкале INES».

Т.е. по мнению экспертов, возникновение СЦР не будет представлять опасности для населения, будет представлять ограниченную опасность для персонала, находящегося на площадке объекта, и может представлять опасность для работающих в помещениях объекта «Укрытие».

В дальнейших изданиях «Анализа...» ([1], [16–18]) этот вывод не изменялся.

Отметим, что во всех изданиях отмечались и еще тот важный факт, что *при самом осторожном подходе экспертов к оценке общего количества топлива, найденного сейчас в «Укрытии», когда любые сомнения толкуются только в «минус» цифра получается всегда большая 125 т (для топлива из разрушенного реактора), менее осторожная оценка ~150 т.*

Оценки количества топлива в помещениях объекта «Укрытие» приведены в таблице 2 [19].

Таблица 2. Оценки количества топлива в помещениях объекта «Укрытие»

Название (номера) помещений	Модификации ТСМ	Оценка количества топлива, т (U)	Примечания
Центральный зал (914/2)	Фрагменты АЗ	более 21	С учетом 48 сборок со свеж. топливом (5,5 т). Возможно присутствие ЛТСМ
ЮБВ (505/3)	Фрагменты АЗ	14,8	129 кассет с отработавшим топливом. Возможно присутствие ЛТСМ
Все помещения «Укрытия»	Топливная пыль	~30 всего в «Укрытии»	Включая пыль на поверхности и внутри завала в ЦЗ и пыль во всех других помещениях
304/3	ЛТСМ	6 ± 2	«Горизонтальный поток лавы»
301/5, 301/6, 303/3	ЛТСМ	4.5 ± 3	«Горизонтальный поток лавы»
217/2	ЛТСМ	0.4 ± 0.2	«Слоновья нога», «сталактиты»
Подаппаратное 305/2, 504/2	Фрагменты АЗ, ЛТСМ	85 ± 25	Расчеты велись по 7 скоплениям ТСМ. Начало всех потоков ЛТСМ
ПРК (210/5, 210/6, 210/7)	ЛТСМ	11.4 ± 5.3	«Большой вертикальный поток» и «малый вертикальный поток»
ББ-2 (012/14, 012/15, 012/16)	ЛТСМ	8 ± 3	
ББ-1 (012/5, 012/6, 012/7)	ЛТСМ	0.9 ± 0.3	
Под каскадной стеной	Фрагменты АЗ, пыль	?	
ТСМ в воде	Растворимые соли, взвесь.	<10 кг	
На площадке «Укрытия»	Фрагменты АЗ АЗ, пыль	$0,75 \pm 0,25$	

8.4. 1997–2010 годы

Все эти годы проводились работы по расчетным оценкам ядерной безопасности объекта «Укрытие». Но если после аварии такие работы (например, относящаяся к маю 1986 г.) выполнялись буквально «на коленке», то позднее

стали привлекаться все более сложные нейтронные программы, разработанные для реакторных задач. Среди них WIMS, КРАБ-1, РИТМ, КРАТЕР, MCNP и другие.

Делались и расчеты методом Монте-Карло. При этом макроскопические параметры получались на основании изучения сотен тысяч вариантов «нейтронных судеб» в скоплении.

Вот вывод одной из работ этого периода [12] (о ней уже упоминалось), в которой рассматривались гипотетические системы (ЛТСМ + АЗФ + вода), находящиеся в пом. 305/2.

«...на основе приведенных выше результатов расчетов можно считать, что объект «Укрытие» является ядерно-опасной системой с максимально возможным коэффициентом размножения нейтронов большим единицы, и при стечении определенных неблагоприятных условий в нем может развиваться СЦР».

В рассматриваемый период были еще раз детально проанализированы данные тепловых и радиационных измерений, выполненных в 1988–97 гг. На основании этого анализа Е.Д. Высоцким и др. (см. [21–23]), была выдвинута гипотеза о наличии в подаппаратном пом. 305/2 двух скоплений ТСМ (Зона 1 и Зона 2) с высоким содержанием урана. Авторы называют их зонами крит-массового риска – ЗКР.

Рассмотрим некоторые из приводимых авторами аргументов.

На рис. 9 (см. также Гл. 3, рис. 2) показана схема скважин, пробуренных в 4-ом блоке в подреакторной плите. Эта плита служит опорой для колодца шахты реактора и нижним перекрытием помещения 305/2. Она представляет собой железобетонный монолит размерами 24×24×2 м, расположенный между отметками 8.000–10.000. На плите размещены бетонный крест фундамента опоры реактора (схема «С») и две полукруглые бетонные тумбы опор нижнего бака биологической защиты (схемы «Л»). Крест делит массив плиты на квадранты.

Изучение кернов 14-ти западных скважин на отм. 9,1 м и трех южных скважин на отм. 8,8 м. показывает, что в юго-восточном квадранте бетон плиты проплавлен и топливные массы находятся ниже уровня скважин. Две скважины 3.9.Л и Ю.9.Б как бы разделяют юго-восточный квадрант на две зоны проплавления. Одна (Зона 1) в южной части квадранта, в координатах И-К, 46-47, вторая (Зона 2) в восточном углу квадранта, в координатах К-Л, 45-46.

Тепловые измерения, проведенные в 1988-91 гг., согласуются с представлением о двух ЗКР. На рис. 10 представлены графики распределения температур в скважинах помещения 305/2, пробуренных с запада на восток. Аналогичные результаты получаются и для скважин, идущих с юга на север.

Измерения, проведенные в 1999–2000 гг. по трем новым маршрутам в юго-западном квадранте помещения 305/2, еще раз подтвердили наличие в нем большого локализованного массива ТСМ, имеющего повышенную нейтронную активность. Была замечена также корреляция динамики этой активности с поступлением воды в «Укрытие».

Предполагается, что вода, поступающая с верхних помещений блока, заполняет углубления, образовавшиеся в результате прожога пола, в том числе между пом. 305/2 и 304/3. Тогда, в зависимости от скорости притока или оттока, меняется уровень воды в ЗКР в районе пролома.

Примером корреляции между нейтронной активностью регистрируемой детекторами, внешней температурой Т, а также интенсивностью атмосфер-

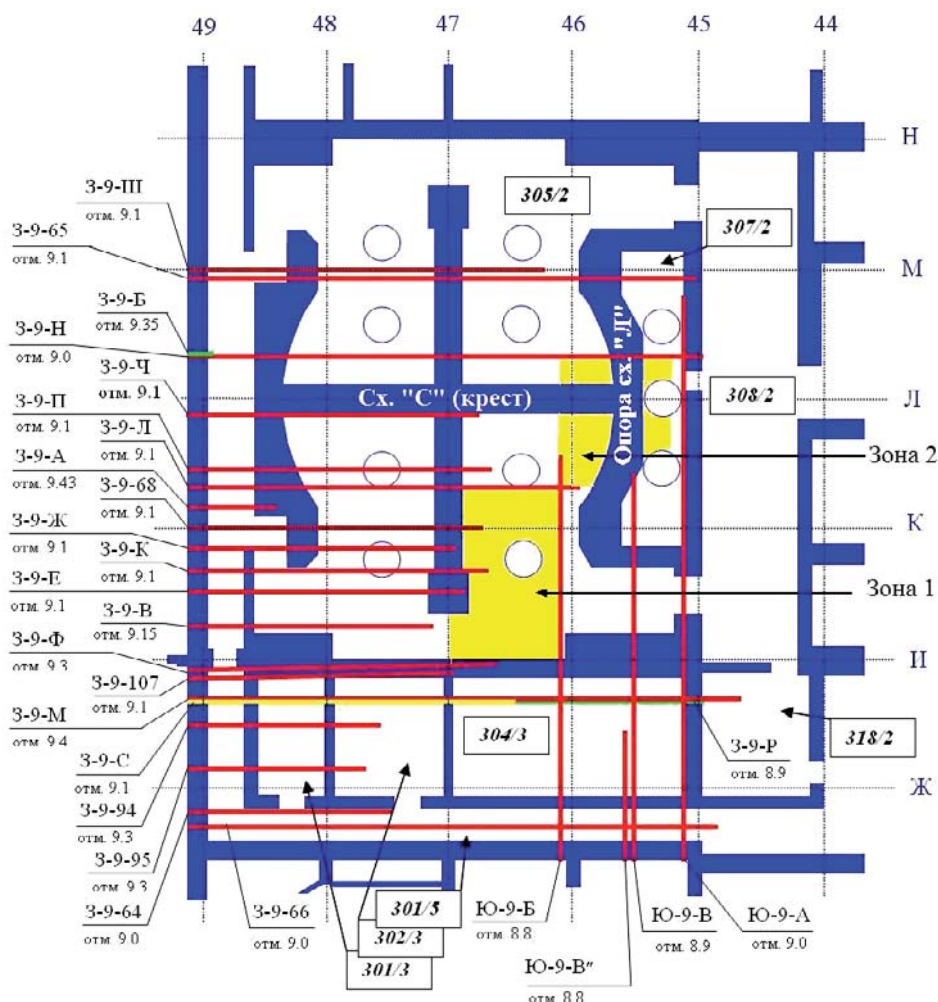


Рис. 9. Схема скважин, пробуренных в 4-ом блоке в подреакторной плите. Отмечены две Зоны (1 и 2) предполагаемых скоплений ТСМ с большим содержанием урана

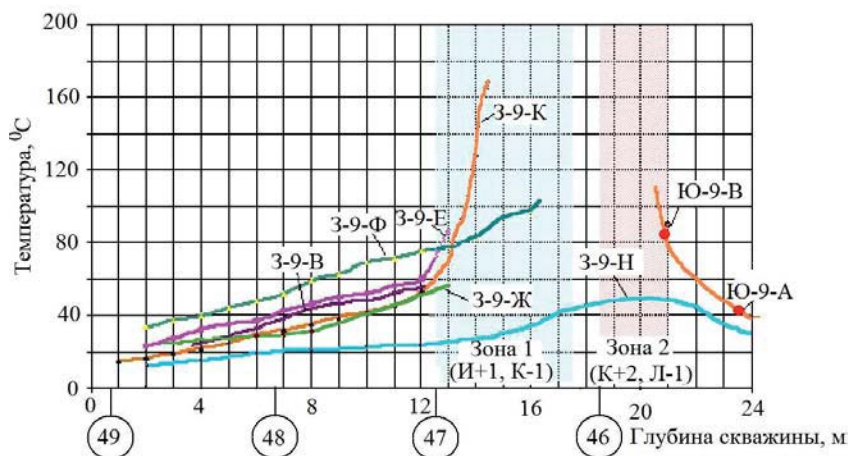


Рис. 10. Распределение температур в западных скважинах помещения 305/2 (данные приведены к ноябрю 1988 г.). Светло-зеленым и светло-розовым цветом отмечены области ТСМ с предполагаемым высоким содержанием урана (Зоны 1 и 2)

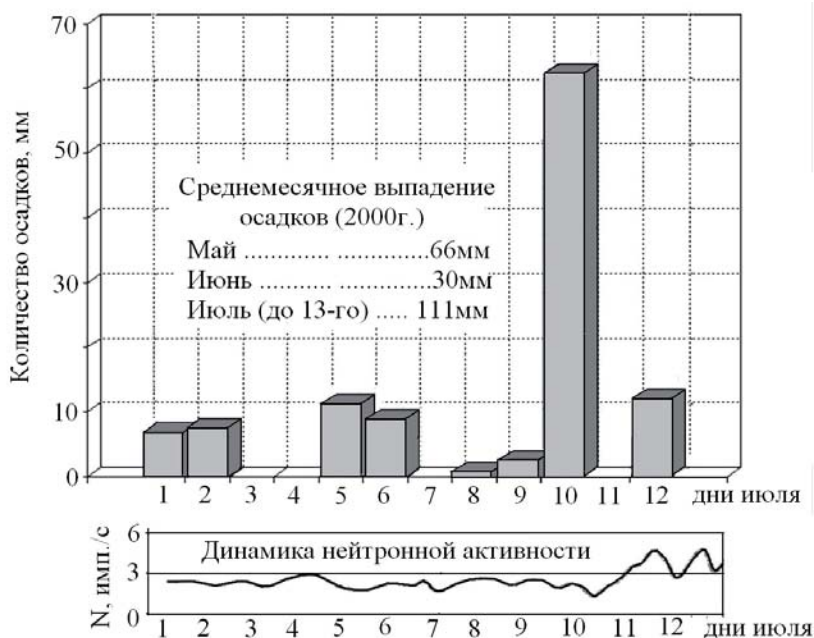


Рис. 11. Выпадение осадков в июле 2000 г. в районе ЧАЭС и динамика нейтронной активности в пом. 305/2 у пролома

ных осадков по данным метеостанции г. Чернобыля, могут служить наблюдения, выполненные в июле 2000 г., когда в районе ЧАЭС выпало аномально большое количество осадков (см. рис. 11).

При консервативном подходе эти колебания можно отнести за счет изменения $K_{\text{эфф}}$. (Вторая возможная причина — смягчение спектра нейтронов и, соответственно, возрастание чувствительности детектора нейтронов.)

Таким образом, с течением времени все больше фактов косвенно свидетельствуют о возможности существования в подаппаратном пом. 305/2 двух скоплений ТСМ с высоким содержанием урана. Структура первого скопления могла бы выглядеть так, как это показано на рис. 12 [22].

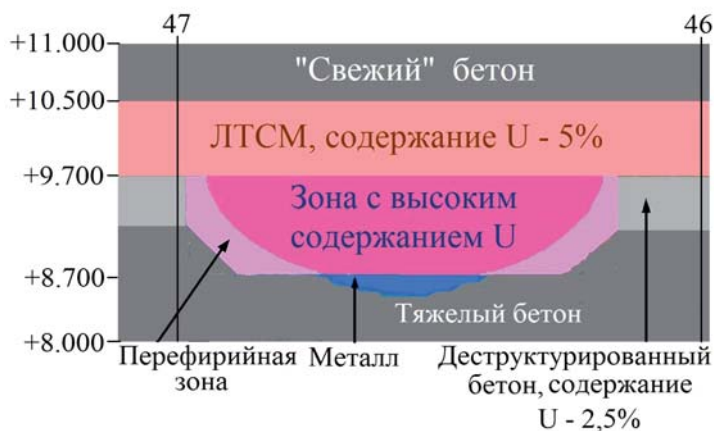


Рис. 12. Сечение выделенного фрагмента подреакторной плиты по ряду И+2500

ЛИТЕРАТУРА

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. 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.
3. Боровой А.А. Ядерная безопасность скоплений воды в объекте «Укрытие». Атомная энергия, т. 107, вып. 2, август 2009 г., стр. 91–98.
4. Мой Чернобыль.
5. Служебная записка Председателю ПК Щербине Б.Е. от В.А. Легасова. 24 октября 1986 г.
6. Бродкин Э.Б., Хрусталева А.В. Расчеты размножающих свойств гомогенных смесей. Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова № 30/1-1030-90, Москва, 1990, 19 с.
7. Беляев С.Т., Боровой А.А., Волков В.Г. и др. Техническое обоснование ядерной безопасности объекта «Укрытие». Отчет о НИР КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова, Чернобыль, 1990, 160 с.
8. Заключение экспертной комиссии о причинах аномального события в помещении 304/3 объекта «Укрытие» в июне 1991 г. ИБРАЭ РАН, 1992, 67 с.
9. Бродкин Э.М. Вариации характеристик поля нейтронов над ТСМ при образовании поверхностного слоя воды. Отчет / ИАЭ им. И.В. Курчатова, № 30/1-1438-91, 1991, 19 с.
10. Фролов В.В. Аномальный инцидент 27–30 июня 1990 г. в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. Атом. Энергия. 1996, т. 60, вып. 3, с. 216–219.
11. 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, 1993, 8 с.
12. Гмалы Б., Мозер Е.Ф., Претч Г., Кваде У. Анализ и оценка «Технического обоснования ядерной безопасности объекта «Укрытие». Поведение критичности ТСМ на объекте «Укрытие». Отчет GRS по проекту SR-2075/8-1, рабочий пункт 1, GRS-A-2414. — 1997, 44 с.
13. Верцимаха О.Я., Павлович В.А., Бабенко В.А. и др. Некоторые вопросы ядерной безопасности объекта «укрытие». Ядерная и радиационная безопасность, Т. 1, вып. 2, 1998, с. 52–67.
14. Разработка технических предложений по методам влияния на подкритичность ядерно-опасных материалов объекта «Укрытие». отв. исполнитель Боровой А.А. Отчет МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 1997, 131 с.
15. Богатов С.А., Евстратенко А.С., Сурин А.И. Справка о подкритичности ТСМ в пом. 305/2 4-го энергоблока ЧАЭС. Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» № 09-05/80 от 17.04.93 г., Чернобыль, 7 с.
16. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отв. Исполнитель Боровой А.А. Отчет МНТЦ «Укрытие», № 3601, Чернобыль, 1996 г., 272 с.
17. The Shelter current safety analysis and situation development forecasts (update version). A. Borovoi et. all, Tasis, European Commission, 1998, 103 p.

18. Материалы к отчету по безопасности объекта «Укрытие». Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укрытие» Инв. № 3790 от 15.02.99 г., научный руководитель Боровой А.А., Чернобыль, 215 с.
19. 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.
20. Высотский Е.Д., Краснов В.А., Лагуненко А.С., Пазухин Э.М. Топливо в помещении 305/2 4-го блока ЧАЭС. Критмассовые зоны. Уточнение сценария образования лавообразных топливо-содержащих материалов. Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. Вып. 8, 2007 г., с. 77–86.
21. Бабенко В.А., Высотский Е.Д., Ключников А.А., Лагуненко А.С., Павлович В.Н., Пазухин Э.М. Моделирование массовых и геометрических параметров скопления топливосодержащих материалов в юго-восточной части помещения 305/2 разрушенного 4-го блока ЧАЭС. Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. Вып. 9, 2008 г., с. 36–42.
22. Лагуненко А.С. Поиск и исследование скрытых скоплений топливосодержащих материалов разрушенного 4-го блока Чернобыльской АЭС. Диссертация на соискание степени кандидата техн. Наук. Киев, 2008, 148 с.
23. Пазухин Э.М., Лагуненко А.С., Довыдьков С.А. Новые количественные оценки ядерного топлива в помещении 305/2 объекта «Укрытие». Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. Вып. 14, 2010 г., с. 85–95.

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

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
ВНИИАЭС	Всероссийский научно-исследовательский институт АЭС
ВНИПИЭТ	Всероссийский научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий
ГЦН	Главный циркуляционный насос
«Д», схема «Д»	Боковая биологическая (водяная) защита
ДТП	Датчик плотности теплового потока
ДСФ	Детектор со съемными фильтрами
«Е», схема «Е»	Верхняя плита биологической защиты
ЗКР	Зона критмассового риска
ИБРАЭ	Институт проблем безопасного развития атомной энергии Российской Академии Наук
ИДК	Информационно-диагностический комплекс
ИПБ АЭС, ИПБ АЭС НАНУ	Институт проблем безопасности атомных электростанций Национальной Академии Наук Украины (ранее – МНТЦ «Укрытие»)
ИЯИ АН УССР	Институт ядерных исследований АН УССР
КДШ	Континуальные дозиметрические шнуры
«КЖ»	Оболочка активной зоны реактора
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
«Л», схема «Л»	Боковая биологическая (водяная) защита
ЛПА	Ликвидация последствий аварии
ЛТСМ	Лавообразные топливосодержащие материалы
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии

МЗ	Машинный зал
Минсредмаш	Министерство среднего машиностроения СССР
МКП	Микроканальная пластина
МНТЦ, МНТЦ «Укрытие»	Межотраслевой научно-технический центр «Укрытие» при Национальной академии наук Украины (в настоящее время ИПБ АЭС НАНУ)
МЭД	Мощность экспозиционной дозы γ -излучения
НБК	Новый безопасный конфайнмент
НВК	Нижние водяные коммуникации
НИКИМТ	Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажных технологий
НИО КЭ	Научно-исследовательский отдел КЭ
ОГ	Оперативная группа КИ
«ОР», схема «ОР»	Нижняя плита биологической защиты.
ПВК	Пароводяные коммуникации
ПК	Правительственная Комиссия
ПРК	Парораспределительный коридор
РИ	Научно-производственное объединение «Радиевый институт» им. В.Г. Хлопина
РАО	Радиоактивные отходы
РБМК-1000	Реактор большой мощности канальный, электрической мощностью 1000 МВт
РЗМ	Разгрузочно-загрузочная машина
РНД	Разведывательный нейтронный детектор
СБВ	Северный бассейн выдержки
СНД	Сторожевой нейтронный детектор
СУЗ	Система управления и защиты
СЦР	Самоподдерживающаяся цепная реакция
ТВС	Тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ	Тепловыделяющий элемент
ТК	Технологический канал
ТОЯБ	Техническое обоснование ядерной безопасности
ТСМ	Топливосодержащие материалы
ЦЗ	Центральный зал
ЧАЭС	Чернобыльская атомная электростанция
ЮБВ	Южный бассейн выдержки
RIA	Авария, связанная с вводом положительной реактивности
SIP	Shelter Implementation Plan (План осуществления мероприятий – ПОМ)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. МЕРОПРИЯТИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В ПЕРВЫЕ ДНИ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ АКТИВНОЙ СТАДИИ АВАРИИ	10
1.1. Работы по очистке площадки вокруг 4-го блока и кровлей 4 и 3-го блоков	10
1.2. Основные механизмы, использовавшиеся при очистке площадки	14
1.3. Опасность ядерного топлива, оставшегося в 4-ом блоке	20
1.4. Определение активности и количества ядерного топлива, оставшегося в блоке	22
1.4.1. Проведение расчетов радионуклидного состава ядерного топлива 4-го блока	22
1.4.2. Оценки количества топлива, оставшегося в разрушенном блоке.....	25
1.5. Первые попытки найти скопления ядерного топлива в блоке после аварии	26
1.6. Тепловая опасность	29
1.6.1. Расчеты и эксперименты специалистов «Курчатовского института»	29
1.6.2. Сооружение подфундаментной плиты	32
1.6.3. Что предотвратило развитие «Китайского синдрома»	33
2. СОЗДАНИЕ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»	38
2.1. Строительство «Укрытия»	38
2.2. Исследования разрушенного блока во время строительства «Укрытия».....	42
2.2.1. Обнаружение источников большой активности по их ультрафиолетовому излучению	43
2.2.2. «Гамма-визор»	44
2.2.3. Программа «Буй»	48
2.2.4. Измерения на трубном накате	54
2.2.5. Отчет о состоянии физических параметров «Укрытия» к моменту завершения основных строительных работ	58
3. Начало создания систем диагностики «Укрытия»	62
3. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ СКВАЖИНЫ	65
3.1. План «генерального наступления»	65
3.2. Создание участка буровых работ.....	67
3.3. Общий порядок проведения исследований с помощью скважин	69
3.4. Методы визуального обследования	71
3.4. Состояние внутренних конструкций после аварии	75

4. РАДИАЦИОННЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СКВАЖИН.....	82
4.1. Измерения дозовых полей	82
4.2. Измерения тепловых полей	85
4.3. Нейтронные исследования	88
4.3.1. Задачи нейтронных исследований.....	88
4.3.2. Выбор детекторов	90
4.3.3. Сторожевой нейтронный детектор (СНД)	91
4.3.4. Разведывательный нейтронный детектор (РНД)	91
4.3.5. Детектор со съёмными фильтрами (ДСФ)	92
4.3.6. Калибровка детекторов	92
4.3.7. Исследования ТСМ с помощью «пассивных» нейтронных методов.....	93
4.3.8. Исследования ТСМ с помощью «активного» нейтронного метода	96
5. Лабораторные анализы материалов кернов	98
5.1. Общая схема выполнения анализов	98
5.2. Лабораторные анализы (радиохимия, спектрометрия)	99
5.3.3. Лабораторные анализы (элементные анализы).....	101
6. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗОВАВШИЕСЯ ПОИСКОВЫМИ ГРУППАМИ В 1988–92 гг.	103
6.1. Континуальные дозиметрические шнуры.....	103
6.2. Коллимированный гамма-детектор.....	106
6.3. Оценка количества топлива в подаппаратном помещении 305/2	109
6.4. Работы непосредственно не связанные с 4-ым блоком.....	114
7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СКОПЛЕНИЙ ЛАВООБРАЗНЫХ ТСМ В ОБЪЕКТЕ	118
7.1. Модификации ядерного топлива в «Укрытии»	118
7.1.1. «Слоновья нога».....	118
7.1.2. Модификации лавообразных ТСМ.....	121
7.2. Образование и растекание ЛТСМ	128
7.2.1. Образование лавы	128
7.2.2. Растекание лавы по помещениям 4-го блока	131
7.3. Основные скопления лавы в объекте «Укрытие»	132
7.3.1. Верхние отметки	132
7.3.2. Средние отметки.....	133
8. Ядерная безопасность скоплений ЛТСМ.....	144
8.1. 1986–1987 годы	144
8.2. 1988–1990 годы	145
8.3. 1990–1996 годы	148
8.3.1. «Аномальное нейтронное событие».....	148

8.3.2. Возможные причины «аномального события».....	150
8.3.3. «Аномальные события» 1996 г.	154
8.3.4. «Анализ текущей безопасности...» (1996 г.).....	155
8.4. 1997–2010 годы	157
СОКРАЩЕНИЯ и ОБОЗНАЧЕНИЯ	163

Подписано в печать 11.09.2012

Печать цифровая

Тираж 100 экз. Заказ 77

Отпечатано в НИЦ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

