

А.А. БОРОВОЙ, Е.П. ВЕЛИХОВ

К 25-ЛЕТИЮ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

**РАБОТЫ КУРЧАТОВСКОГО
ИНСТИТУТА ПО ЛИКВИДАЦИИ
ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ**



**Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»**

А.А. БОРОВОЙ, Е.П. ВЕЛИХОВ

К 25-ЛЕТИЮ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

**РАБОТЫ КУРЧАТОВСКОГО
ИНСТИТУТА ПО ЛИКВИДАЦИИ
ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ**

Москва, 2011

УДК 621.039.586

Корректор: В.В. Зубкова

Дизайн и верстка: М.И. Анурова, Е.Р. Осьмакова, А.А. Григорашвили

Для оформления обложки использовано фото А.В. Купного

А.А. Боровой, Е.П. Велихов. К 25-летию аварии на Чернобыльской АЭС. Работы «Курчатовского института» по ликвидации последствий аварии. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2011, 132 с.

ISBN 978-5-9900996-9-2

Книга посвящена работам Курчатовского института, связанным с ликвидацией последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Среди них – мероприятия, выполненные в первые месяцы после аварии, научное руководство созданием объекта «Укрытие» и проведение на нем исследований в 1986–2010 гг., работы по обеспечению безопасности объекта и по подготовке его преобразования.

ВВЕДЕНИЕ

В ночь на 26 апреля 1986 г. на 4-м блоке ЧАЭС произошла крупнейшая из аварий, которые знала атомная энергетика. В результате взрыва была полностью разрушена активная зона и вся верхняя часть здания реактора, сильно пострадали и другие сооружения (рис. 1).

Были уничтожены барьеры и системы безопасности, защищавшие окружающую среду от радионуклидов, наработанных в облученном топливе.

Выброс активности из поврежденного реактора на уровне миллионов кюри в сутки продолжался в течение 10 дней с 26.04.86 по 06.05.86, после чего резко упал (в тысячи раз) и в дальнейшем продолжал уменьшаться.

Авария на ЧАЭС так или иначе затронула жизнь миллионов людей.

Сотни тысяч из них были эвакуированы с загрязненных территорий Украины, России, Белоруссии.

Другие сотни тысяч непосредственно участвовали в создании «Укрытия» («Саркофага») над разрушенным 4-ым блоком, в дезактивации площадки ЧАЭС и других блоков, в работах в чернобыльской зоне отчуждения и временного отселения, в строительстве города Славутич и т.п.

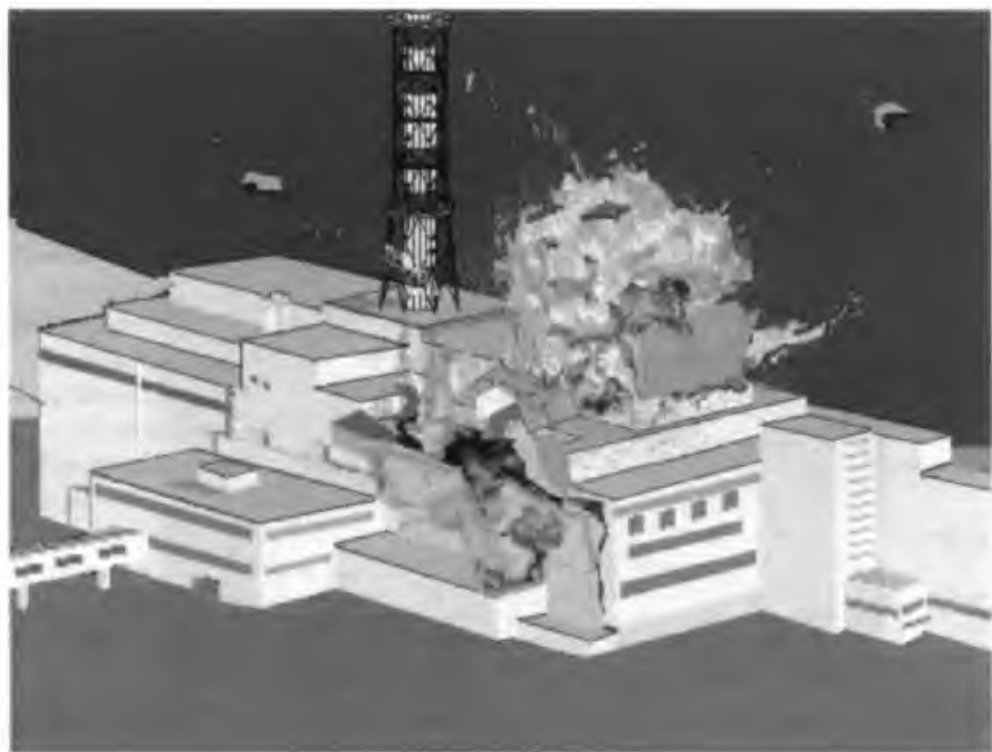


Рис. 1. Взрыв 4-го блока ЧАЭС 26.04.86 г.

Специалисты Курчатовского института с первого дня после аварии приняли участие в работах по ликвидации ее последствий. Для них эта работа стала испытанием профессионализма, способности принятия верных решений и выполнения их в тяжелой обстановке, личного мужества.

Более 700 курчатовцев приняли участие в ЛПА. Среди них – академики А.П. Александров, С.Т. Беляев, Е.П. Велихов, В.А. Легасов, директора институтов Центра, руководители отделений и отделов (рис. 2–4).

Прошло 25 лет.

Все эти годы сотрудники Курчатовского института постоянно занимались проблемами ЛПА как в Чернобыле на разрушенном блоке, так и на московской площадке.

Менялись выполняемые задачи, поистине героические усилия первых лет уступили место планомерной, каждодневной работе.



Рис. 2. Академик А.П. Александров и сотрудники Курчатовского института на ЧАЭС после аварии



Рис. 3. Член Правительственной комиссии академик В.А. Легасов (справа) и Л.Р. Кеворков на ЧАЭС. За работы по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС В.А. Легасов был удостоен звания Героя Российской Федерации (посмертно)



Сотрудники ИАЭ им. Курчатова И.В. Слева направо: академик РАН Беляев С.Т., Алексеев Ю.В., Камбулов И.Н., академик РАН Велихов Е.П. Чернобыльская АЭС, 1987 год.

Рис. 4. Снимок из газеты «Известия»

В 1987 г. была создана «Комплексная экспедиция» при Курчатовском институте, главной целью которой стало проведение исследований на объекте «Укрытие».

Затем (с 1992 г.) Курчатовский институт осуществлял научное руководство Отделением ядерной и радиационной безопасности в МНТЦ «Укрытие» НАН Украины¹.

Вот примеры некоторых важнейших результатов выполненных за два с половиной десятилетия работ.

Под научным руководством Курчатовского института и при непосредственном участии его специалистов:

- создан объект «Укрытие», закрывший аварийный блок и локализовавший очаг аварии;
- доказано, что более 95% ядерного топлива, находившегося в реакторе 4-го блока, осталось в пределах объекта «Укрытие»;
- исследованы и взяты под постоянный контроль скопления материалов, содержащих ядерное топливо и огромную радиоактивность (в настоящее время ~17 млн. Кюри);
- приняты меры, благодаря которым все прошедшие годы влияние объекта «Укрытие» на окружающую среду оставалось в безопасных пределах;
- создана база данных, содержащая огромный массив информации по ТСМ, находящимся в «Укрытии» и на его площадке;

¹В 2004 г. МНТЦ «Укрытие» было реорганизовано в Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины.

- разработан документ «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации», который суммировал всю полученную информацию об этом уникальном ядерном объекте, показал область применения к нему существующих норм и правил, наметил пути дальнейшей работы по обеспечению его безопасности;

- наконец, Курчатовский институт предложил и обосновал стратегию работ по преобразованию «Укрытия» в экологически безопасную систему — путь, по которому сейчас с помощью всего мирового сообщества ведутся работы на площадке ЧАЭС.

Объем и характер настоящей публикации не позволяет достаточно подробно изложить содержание работ, выполненных специалистами Курчатовского института за эти годы. Мы ограничились кратким перечислением основных этапов и иллюстрацией их отдельными примерами.

1. РАБОТА ОПЕРАТИВНОЙ ГРУППЫ КУРЧАТОВСКОГО ИНСТИТУТА (1986–1987 гг.)

1.1. Первые дни после аварии. Создание оперативной группы

Об аварии на ЧАЭС сотрудники Курчатовского института, занимающиеся РБМК, узнали еще ночью 26-го апреля.

«...со станции ночью пришел тревожный сигнал, зашифрованный по заведенному в атомной энергетике порядку, когда при отклонениях от нормы станция информирует то министерство, к которому она принадлежит. В данном случае поступил сигнал «один, два, три, четыре», что означало: на станции возникла ситуация с ядерной, радиационной, пожарной и взрывной опасностью, то есть присутствовали все виды опасности».

Правда, позднее «...со станции начали поступать сведения о том, что реактор, ...в общем-то, управляем, операторы пытаются вести его охлаждение» [1.1].

Утром 26-го апреля информация о взрыве, произошедшем на 4-ом блоке, стала известна руководству института, но была она отрывочной и противоречивой.

Истинные масштабы аварии стали проясняться только к вечеру 26 апреля, когда на станцию прибыла Правительственная комиссия во главе с заместителем Председателя Совета министров СССР Б.Е. Щербиной. В ее составе были два сотрудника Курчатовского института — первый заместитель директора В.А. Легасов и В.А. Сидоренко (бывший в это время заместителем Председателя Госатомэнергонадзора).

Сразу по приезде они установили постоянную связь с институтом, консультируясь по возникающим вопросам и сообщая полученные со станции новые данные.

Вот что вспоминает участник этих событий [1.2].

«...уже 26 апреля в Курчатовском институте как бы «автоматически» возник антикризисный штаб, или «мозговой центр», прямо в кабинете его директора А.П. Александрова. В него вошли, а точнее, просто пришли и не уходили сутками практически все ведущие специалисты института — и реакторщики, и «страшно далекие от реакторов» ядерные физики, термоядерщики, лазерщики, химики.

Именно здесь, под внешне спокойным и так хорошо знакомым всем курчатовцам бесконечно требовательным («до последнего винтика») аналитическим взглядом А.П. Александрова непрерывно «переваривалась» вся сначала очень скудная информация «с фронта», и находились решения, немедленно проводимые в жизнь. В этом «штабе» бывали и руководители отрасли: Е.П. Славский, Л.Д. Рябев и многие другие.

Нет нужды говорить, что был отобилизован весь институт (уникальные возможности национального ядерного центра в чрезвычайных ситуациях — один из важных уроков Чернобыля), все его небольшие по сегодняшним меркам, но огромные по тем временам вычислительные возможности. Когда было надо, стремительно ставились эксперименты. ...Также 26 апреля началась «вахта курчатовцев» у разрушенного реактора. Невозможно перечислить имена всех семисот курчатовцев, работавших в Чернобыле. Но первопроходцев, прилетевших в Чернобыль в самые трудные первые «десять дней, которые потрясли мир», когда шла борьба с радиоактивным выбросом из реактора, назвать можно и нужно. Это — В.А. Легасов и В.А. Сидоренко — 26 апреля, А.К. Калугин и В.М. Федуленко — 27 апреля, Е.П. Велихов и Е.П. Рязанцев — 1 мая».

От «курчатовцев» приходила в эти дни важная и, главное, объективная информация о реальных последствиях аварии. Е.П. Велихов вспоминает: «На третий день, облетая блок на вертолёте, я сумел заглянуть внутрь реактора при свете горящего в дыре парашюта и увидел, что реактора-то нет — под вставшей на дыбы верхней плитой весом в триста тонн ничего не было. Иван Степанович¹ был сильно поражён, как и Москва» [1.3].

В связи с возникновением все новых и новых задач в начале мая В.А. Легасов предложил, а А.П. Александров одобрил идею создания при правительственной комиссии в Чернобыле группы из курчатовцев — «оперативной группы» (ОГ)², которая выполняла бы функции оперативного научного руководства по ряду направлений работ по ликвидации последствий аварии. ОГ должна была работать в постоянном контакте с московской площадкой. Ее члены командировались в Чернобыль и работали там вахтовым методом, сменяясь достаточно часто, чтобы избежать переоблучения (что удавалось далеко не всегда).

Среди главных направлений работы ОГ предполагались следующие:

- диагностика разрушенного блока, оценка степени ядерной, радиационной и тепловой опасности, выработка рекомендаций по их снижению;
- определение количества и состава радиоактивности, выброшенной во время активной стадии аварии;
- выработка рекомендаций и участие в работах по дезактивации сооружений и территорий.

Позднее появилась такая задача, как научное руководство созданием «Укрытия 4-го блока ЧАЭС», которая после начала строительства объекта стала для ОГ основной³.

В ходе работы ОГ тесно сотрудничала со многими НИИ Средмаша, организациями Минобороны, Госкомгидромета, Мингео, НИИ АН Украины.

¹И.С. Силаев — заместитель Председателя Совета Министров СССР, в это время Председатель ПК.

²Другие министерства, ведомства, крупные научные учреждения и т.п. также формировали в Чернобыле оперативные группы.

³5 июня 1986 г. — постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР Минсредмаш утвержден генеральным подрядчиком по выполнению работ, связанных с захоронением 4 блока ЧАЭС. Научное руководство работами было поручено Институту атомной энергии им. И.В. Курчатова

Ограниченный объем настоящей работы позволяет привести только несколько примеров работ по ЛПА, в которых Курчатовский институт, его ОГ сыграли определяющую роль в 1986–87 гг.

1.2. Три вида опасности⁴

Уже на своем первом заседании Правительственная комиссия отметила три главных вида опасности, исходящих после аварии от ядерного топлива в разрушенном реакторе.

1.2.1. Ядерная опасность

Ядерная опасность – возникновение самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР).

Вот, что вспоминал об этом В.А. Легасов [1.1]: «...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 топливосо-

⁴См. также [1.4].

державших материалов специалистам Курчатовского института было поручено оценить возможность возникновения СЦР при наиболее консервативных предположениях.

И первые расчеты были выполнены к началу мая 1986 г. [1.5].

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 цепной реакции (СЦР) 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.

Среди других возможностей появления в разрушенном реакторе системы из топлива и замедлителя, способной к СЦР, насколько нам известно, исследовался случай, когда при разрушении ТВЭЛ-ов и расплавлении циркония (как труб, так и оболочек ТВЭЛ-ов) происходит осыпание диспергированного топлива в нижнюю часть кладки. При этом в каждом канале образуется столб двуокиси урана высотой $\sim 200 \text{ см}$ ($K_{\text{эфф}}$ превышает 1 только для температур меньших 1000°C [1.5]).

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.

1.2.2. Тепловая опасность

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.

Перед коллективом специалистов филиала Курчатовского института, возглавляемого Е.П. Велиховым, В.Д. Письменным, А.М. Дыхне и

Л.А. Большовым, были поставлены задачи в кратчайшие сроки определить насколько реальна эта опасность, возможен ли выход больших количеств расплавленных радиоактивных материалов в подреакторные помещения и за пределы реактора, попадание их в грунтовые воды.

Необходимо было выработать предложения по мерам предотвращения таких сценариев.

В течение первых нескольких дней были разработаны базовые теоретические модели поведения различных по геометрии топливосодержащих масс.

Далее были проведены оценки критических размеров скоплений топлива, способных проплавливать 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.

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.

На основе расчетных оценок и проведенных экспериментов, с учетом малой достоверности знаний о состоянии топлива и конструкций в четвертом блоке в первой половине мая, 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.

Для предотвращения попадания радионуклидов в грунтовые воды была сделана рекомендация о необходимости сооружения подфундаментной водоохлаждаемой плиты – ловушки для расплава топлива [1.4].

1.2.3. Радиационная опасность

Этот вид опасности прежде всего был связан с непрекращающимся выбросом активности из разрушенного реактора, в основном из-за горения графита (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Разрушенный 4-ый блок ЧАЭС (3 мая 1986 г.)

Вместе с этим дымом в атмосферу выбрасывалась радиоактивность и, как довольно скоро стало известно, речь шла о выбросе миллионов кюри в сутки и десятках тысяч квадратных километров загрязненных территорий.

1.2.4. Первые контрмеры

Хорошо известно, что Правительственная комиссия одобрила в качестве главной контрмеры забрасывание с вертолетов шахты реактора различными материалами, способными локализовать аварию. Позднее, после проведенных консультаций, уточнилась номенклатура этих материалов [1.6]. Часть из них (соединения бора, в частности B_4C) состояла из нейтронных поглотителей и должна была 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, последний компонент (свинец) должен был принять на себя выделяющееся тепло, расплавиться и предотвратить развитие «китайского синдрома».

В таблице 1.1. приведен перечень основных контрмер, принятых на активной стадии аварии (26 апреля — 6 мая). Роль специалистов Курчатовского института в Чернобыле и в Москве сначала сводилась к обсуждению этих контрмер, предложению своих вариантов, проведению оценок и расчетов (см. выше). Но по мере формирования в Чернобыле оперативной группы и мобилизации сил и средств в самом институте они брали на себя все большую часть исследований непосредственно на разрушенном блоке и загрязненной территории.

1.3. Оценка количества топлива, выброшенного за пределы блока (и оставшегося в его пределах) [1.4], [1.7–1.9]

Отсутствие достоверной информации о количестве ядерного топлива, оставшегося в разрушенном блоке, мешало выработке стратегии ЛПА, приводило к необходимости принимать избыточные меры безопасности, требующие больших финансовых и дозовых затрат, технических усилий. Не менее необходимо было знать количество радиоактивности, особенно таких опасных радионуклидов, как изотопы плутония, выброшенных в окружающую среду и загрязнивших обширные территории.

Эти два связанных вопроса сначала решали двумя путями. Измеряли выброс из реактора и исследовали пробы почвы.

В последнем случае для определения содержания плутония приходилось проводить сложные и долгие измерения, требующие специалистов высокой квалификации. В результате к 15 маю всеми НИИ было сделано всего несколько десятков таких анализов, а необходимы были тысячи.

Таблица 1. Основные контрмеры, принятые на активной стадии аварии

Дата	Часы	Описание мероприятий
Суббота, 26 апреля	~01	Авария. Разрушение реактора
«	01:30–06:30	Тушение пожаров (в результате взрывов в реакторе и выброса разогретых фрагментов возникло более 30-ти очагов горения)
«	02	Начата подача воды в реактор для охлаждения топлива и предотвращения горения графита
«	Утро–день	Отключены насосы, подававшие воду в реактор (нижние отметки всех блоков оказались затопленными радиоактивной водой)
«	День–вечер	Впервые стали осознаваться размеры аварии
«	Ночь	На заседании ПК решено: остановить 1 и 2 блок, перевести в подкритическое состояние 3-ий; эвакуировать население г. Припяти и пос. Янов; начать заброску в разрушенный реактор материалов
Воскресенье 27 апреля	~10:00	Начало забрасывания реактора различными материалами (с вертолетов)
«	Ночь	Сбрасывается карбид бора
Четверг 1 мая	В течение дня	Принято решение начать охлаждение реактора азотом, чтобы предотвратить «китайский синдром»
Пятница 2 мая	К концу дня	Сброшено примерно 5000т материалов
Суббота, воскресенье 3–4 мая	В течение ночи	Спущена вода из бассейна-барботера 4-го блока. ПК приняла решение о сооружении подфундаментной плиты под реакторным отделением 4-го блока (для предотвращения «китайского синдрома»)
Понедельник 5 мая		Смонтирована система подачи азота в бассейн-барботер. Начата доставка строительной техники и необходимых материалов для сооружения подфундаментной плиты
Вторник 6 мая	~01:00	Прибытие первой машины с жидким азотом. Попытки охлаждения успеха не принесли
Вторник 6 мая		Интенсивность выброса (Ки/день) снизилась на три порядка. Конец активной стадии

Что касается изучения выброса, то первое измерение уровней радиации над развалом реактора было проведено группой воздушной радиационной разведки с помощью самолета-лаборатории Ан-24рр⁵ в ночь с 27 на 28 апреля 1986 г. [1.10].

Далее пробоотбор производился над самим реактором, над площадкой вокруг 4-го блока и над территорией 30 км зоны. Однако в силу многочисленных объективных причин – нестационарного характера самого выброса, меняющихся метеоусловий, методических трудностей отбора проб в значительных радиационных полях, активных воздействий на разрушен-

⁵Ан-24рр – самолёт-лаборатория для радиационной разведки, приспособлен для отбора радиоактивных продуктов из облака ядерного взрыва.

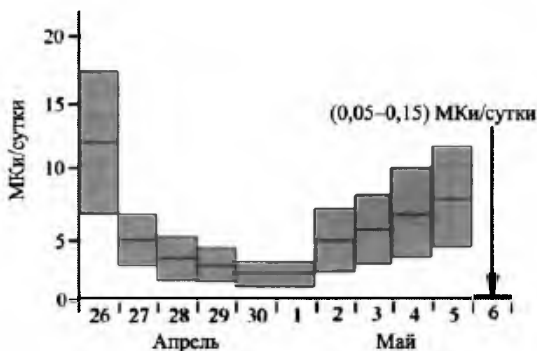


Рис. 1.2. Интенсивность выброса радиоактивности из разрушенного блока в период активной стадии аварии. Погрешность оценки выброса $\pm 50\%$. Значения выброшенной активности пересчитаны на 06.05.86г. (конец активной стадии) с учетом радиоактивного распада

ный реактор (сброс материалов с вертолетов), погрешности измерений дозиметрических приборов и т.д. и т.п. — точность определения выброса оказалась весьма низкой (см. рис. 1.2).

Не было и достоверных данных (только общие оценки) о выбросе при самом взрыве.

Однако, спектрометрические и радиохимические анализы аэрозолей позволили сделать вывод о том, что в течение всей активной стадии аварии выброс радиоактивности, за исключением легколетучих веществ — инертных газов, йода, цезия, теллура и др., происходил в составе частиц мелкодиспергированного топлива.

Этот вывод позволил Курчатовскому институту найти выход из создавшегося положения и предложить метод достаточно быстрого определения количества плутония и топлива, выброшенного на почву, а соответственно, и оставшегося в разрушенном блоке.

В середине мая 1986 г. в Курчатовском институте в результате сравнения данных спектрометрических измерений проб, взятых на территориях Украины, России, Беларуси, и данных радиохимических анализов этих же проб был определен коэффициент корреляции между активностями ^{144}Ce (γ) и суммы изотопов плутония $\text{A}(\text{Pu})$ (α) [1.11].

Коэффициент оказался всюду практически одинаковым.

Этого следовало ожидать. Церий вылетал из реактора и падал на почву в составе тех же частиц топлива, что и плутоний. Мог бы существовать некоторый разброс в коэффициенте в зависимости от глубины выгорания, но большинство топливных каналов 4-го блока работали всю кампанию и имели близкое выгорание.

Специалистами Курчатовского института было предложено использовать этот факт для определения загрязнения почвы плутонием (или топливом), используя «метод корреляции».

Вместо радиохимических анализов на изотопы плутония-238, 239, 240 (практически чистые α -излучатели) или стронций-90 (β -излучатель) можно было использовать простое соотношение:

$$\text{A}(\text{Pu}) = K_{\text{Pu}} \times \text{A}(^{144}\text{Ce}),$$

где $A(Pu)$ суммарная альфа-активность ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu ; K_{Pu} – коэффициент корреляции; $A(^{144}Ce)$ – гамма-активность ^{144}Ce .

Экспериментальная величина K_{Pu} составляла на 26.04.86 г. $\approx 9 \times 10^{-4}$ и с хорошей точностью совпадала с расчетным значением.

Аналогичное соотношение со своим коэффициентом корреляции существовало и для стронция-90. Этот метод стал широко применяться. Сложилась трехзвенная система определения топливных загрязнений в ближней зоне.

- Во-первых, измерение мощности дозы гамма-полей над территориями с помощью аэро-гамма разведки (первое приближение, использующее соотношение «мощность дозы» – количество топлива).

- Во-вторых, оперативное исследование почвенных проб с помощью полупроводниковых гамма-спектрометров (уточняющие измерения с использованием коэффициента корреляции по церию-144).

- И, наконец, медленные и тщательные радиохимические анализы (проверка устойчивости коэффициента K_{Pu}).

Уже летом 1986 года на основании полученных данных Курчатовский институт представил в Правительственную комиссию предварительное распределение количества топлива, выброшенного на территорию (см. рис. 1.3).

Полный выброс, по этим первым оценкам составил около 3,5%, следовательно, в границах будущего объекта «Укрытие» осталось более 96% топлива, находившегося ранее в активной зоне реактора 4-го блока.

В августе 1986г. на конференции в МАГАТЭ В.А. Легасов, возглавлявший советскую делегацию, доложил о выбросе $(3 \pm 1,5)\%$ топлива из реактора 4-го блока [1.12].

Впоследствии в 1987–1989 гг. в результате работ по анализу тысяч проб грунта приведенные выше цифры выпадений топливной компоненты подтвердились.

Подтвердились они и в ходе почти 25-ти летних исследований топлива на объекте «Укрытие». Подробное изложение этого материала дано в работе [1.4].



Рис. 1.3. Оценки выброса топлива при аварии на ЧАЭС. Курчатовский институт, 1986 г.

1.4. Первые исследования разрушенного реактора (см. рис 1.4)

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 Курчатовском институте) были быстро сконструированы и изготовлены детекторы со свинцовыми коллиматорами. Установленные на вертолетных подвесках, они дали возможность получить карту радиоактивных источников на площадке станции, крышах зданий с разрешением порядка 10 м^2 . Выяснилось, в частности, что топлива в машинном зале практически нет — в основном оно находится в здании реактора» [1.13] (см. также [1.14] и [1.15]).

В мае специалисты Курчатовского института пытались измерить температурные поля в шахте реактора, опуская с вертолета термопару на стальном тросе $\sim 200 \text{ м}$ длиной, утяжеленном 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 Курчатовского института: «Мы искали топливо. Искали расплавы свинца. Расплавы вертолетной засыпки. И не нахо-



Рис. 1.4. Разрушенный 4 блок ЧАЭС. Май 1986 г.

дили. 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 М.С. Костяков и В.И. Кабанов проводили измерения гамма-полей с помощью прибора «Киржач-3» из пом. 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 пом. 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» [1.16].

Тем не менее, специалисты Курчатовского института 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 — выше 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» [1.17].

В мае-июне по предложению Курчатовского института 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 расположении.

Впервые в качестве основного места скопления ТСМ было названо подаппаратное пом. 305/2 [1.18].

Осенью 1986 г. это подтвердили тепловые измерения. Сотрудникам ОГ 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°C до 60°C , а в стене, в скважине, идущей под углом вверх (по направлению к пом. 305/2), достигала 150°C . Картина распределения тепловых потоков приведена на рис. 1.5.

Все эти данные указывали на значительное скопление топлива в помещениях, находящихся выше и западнее пом. 213/2, т.е. в районе подаппаратного пом. 305/2 [1.4].

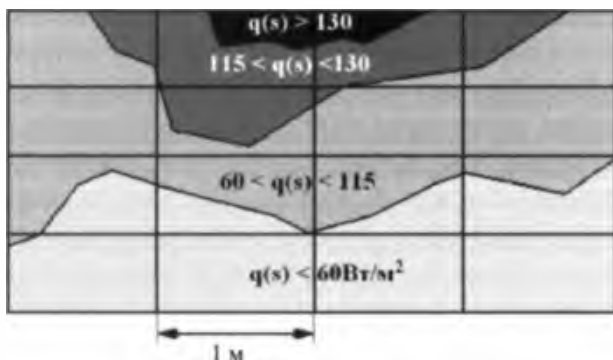


Рис. 1.5. Распределение плотности тепловых потоков на западной стене пом. 213/2

1.5. Оценки количества топлива, оставшегося в блоке, теплотетрическим методом («Программа буй» [1.19])

В середине лета специалисты Курчатовского института совместно с сотрудниками Института технической теплофизики АН Украины (г. Киев) предложили и начали готовить большую программу по мониторингу состояния развала реактора. Она получила название «Программа буй».

Сам буй представлял собой устройство с оболочкой в виде усеченного конуса, которое с помощью вертолетов, а позднее подъемных кранов, устанавливалось непосредственно в развал реактора – в центральный зал (рис. 1.6).

В каждом бую были смонтированы детекторы температуры, теплового потока, мощности дозы гамма-излучения, анемометры (рис. 1.7). Вес буя 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.



Рис. 1.6. Буй, установленный в развале центрального зала 4-го блока на ребре схемы «Е»

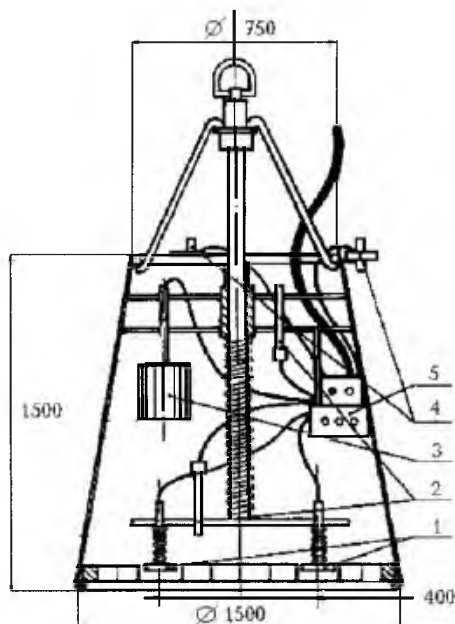


Рис. 1.7. Конструкция Буя: 1 — датчики плотности теплового потока; 2 — термометры; 3 — датчики мощности дозы γ -излучения; 4 — анемометры; 5 — панели коммуникаций

После установки буя 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.

Позднее для установки буюв использовался подъемный кран «Деаг». Технология постановка буюв с помощью крана была значительно проще и обеспечивала большую точность. Всего за время работы системы было установлено 15 буюв с примерно 160 различными детекторами. Данные, полученные с помощью буюв, указывали на монотонный спад активности (см. рис. 1.8) и температуры развала в соответствии с расчетами (*отсутствие признаков самоподдерживающейся цепной реакции*).

Измерения тепловых потоков, выходящих из разрушенного блока, позволили оценить интегральное тепловыделение находившегося в нем топлива⁶, а значит и его массу.

На рис. 1.9 приведена картина плотности конвективных потоков тепла — q_k , идущих из развала реактора, взятая из рабочей тетради участника измерений. На рис. 1.10 — полные данные по q_k , обработанные с помощью ЭВМ)

Согласно этим оценкам более 90% топлива осталось в помещениях 4-го блока.

⁶В предположении, что поток тепла через боковые стены существенно меньше, чем через развал.

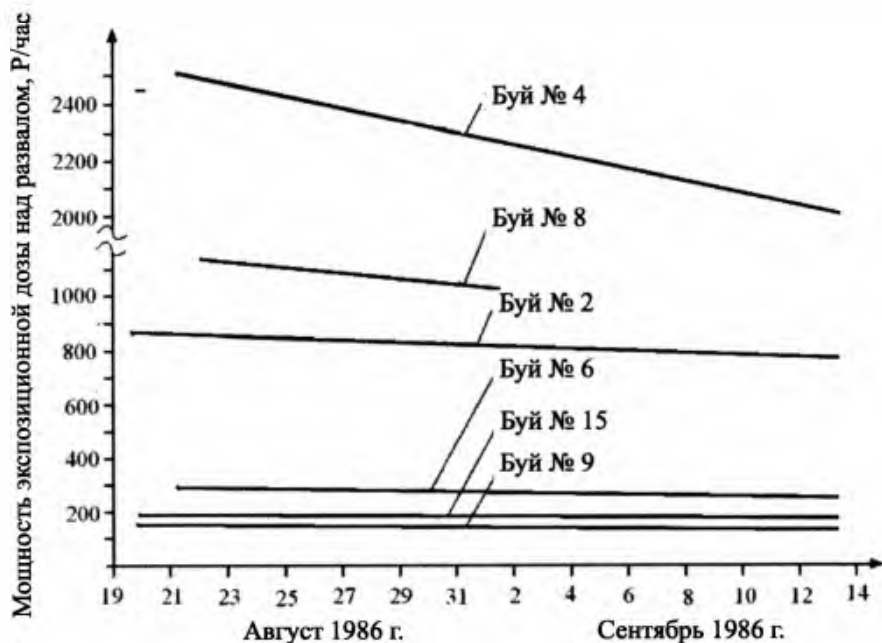


Рис. 1.8. Мощность экспозиционной дозы над развалом реактора (19.08–14.09) 1986 г.

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 буйе № 11.

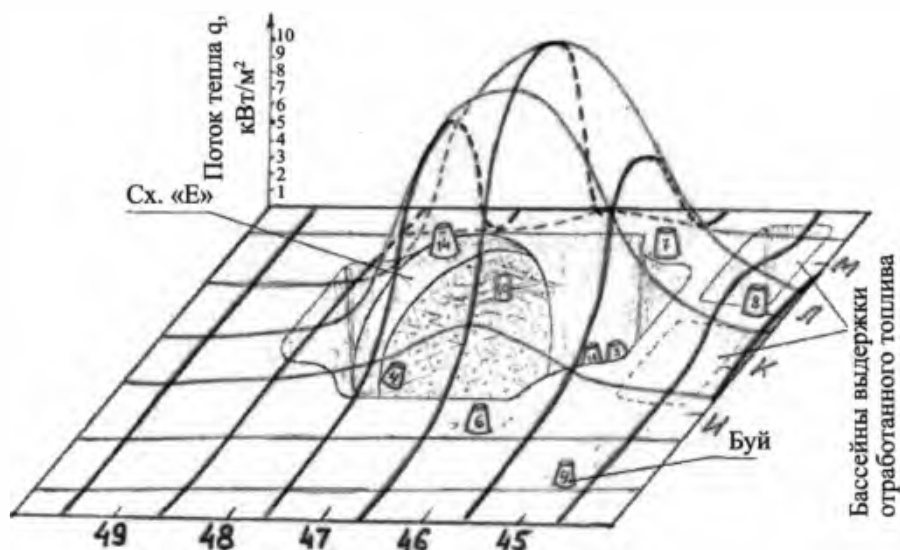


Рис. 1.9. Эскизный рисунок из рабочей тетради (октябрь 1986 г.)

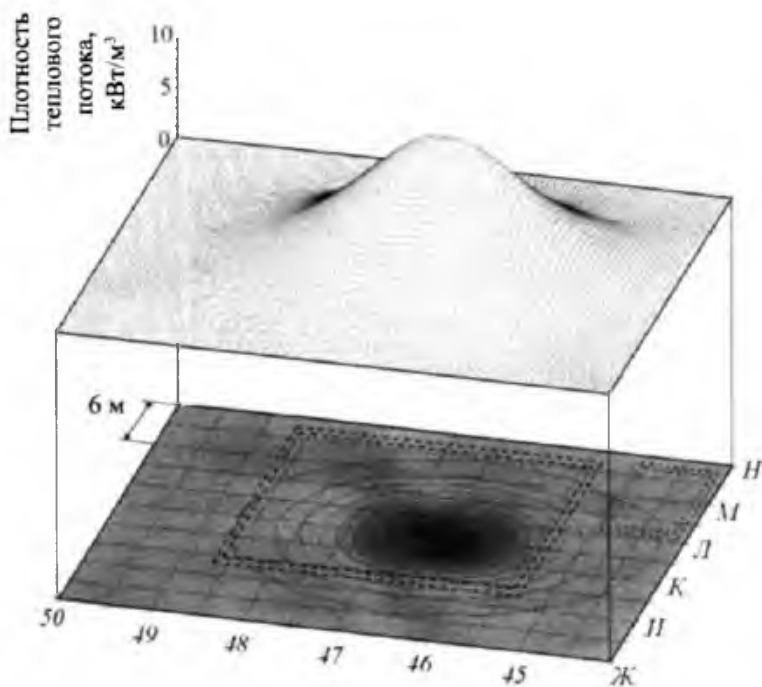


Рис. 1.10. То же, что и на рис. 1.8 после обработки данных на ЭВМ

1.6. «Гамма-визор»

В конце лета 1986 г. перед ОГ была поставлена задача определить в развале реактора (в центральном зале) области наиболее сильного гамма-излучения на фоне меньшей активности окружающих материалов. Для решения этой задачи в Курчатовском институте 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 видеомagneтофон. В результате на пленке фиксировалось гамма-изображение участка поверхности, которое могло быть привязано к оптическому изображению (рис. 1.12, 1.13).

Прибор получил название «гамма-визор» [1.20–1.23].

После его успешных испытаний в центральном зале (см. рис. 1.13) появились предложения по применению «гамма-визора» для решения ряда других задач.

Так были созданы различные модификации этого прибора: вертолетный, ручной (переносной), автомобильный (см. рис. 1.14).

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.

В настоящее время прибор усовершенствован с учетом опыта Чернобыля и для него открылись новые области использования (см., например, [1.24] и ссылки в ней).



Рис. 1.11. Гамма и оптическое изображение разрушенного реактора с западной стороны осенью 1986 г. Наиболее интенсивное излучение идет из области выше разрушенного реактора



Рис. 1.12. Осень 1986 г. Испытания гамма-визора на 4-ом блоке ЧАЭС

1.7. Новый вид топливосодержащих материалов — лава

Выше уже говорилось о том, что при обследовании блока из пом. 017/2 было обнаружено, что на отм. +6.000 находится скопление топлива. Понадобилось еще ~3 месяца, чтобы сотрудники ОГ смогли проникнуть в пом. 217/2 и обнаружить в нем большую (несколько м³) расплывшуюся и застывшую «каплю» с черной блестящей поверхностью. Почти сразу же это образование было названо — «слоновья нога» (рис. 1.15).



Рис. 1.13. Распределение поверхностной активности по засыпке центрального зала разрушенного реактора (сентябрь 1986 г.). Для получения данных использовалась программа «Буй» и измерения с помощью гамма-визора. Кривая 1 соответствует поверхностной активности выше 0.925 ТБк/м² (25 Ки/м²), 2 — 1.85 ТБк/м² (50 Ки/м²), 3 — 2.775 ТБк/м² (75 Ки/м²)



Рис. 1.14. «Гамма-визор», установленный на автомобиле

Подойти к ней было практически невозможно — 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 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 установленной сверху электродрели. Это сооружение подобралось к «ноге», но не смогло просверлить в ней дырку — материал оказался слишком твердым.



Рис. 1.15. «Слоновья нога» — своеобразная лава, застывшая в необычной форме в пом. 217/2

Следующая попытка была произведена одним из военных, с неодобрением наблюдавшим за робкими усилиями науки... Никто не успел опомниться, как смелый офицер подбежал к «Слоновой ноге» и начал бить по ней топором. Результаты оказались минимальными, если не считать его немедленного откомандирования из Чернобыля.

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» [1.25].

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.

Так исследователи вплотную познакомились с «лавой», опасность которой обсуждалось в связи с «китайским синдромом».

1.8. Строительство «Укрытия»

В середине мая 1986 г. Правительственная комиссия приняла решение о долговременной консервации 4-го блока с целью предотвращения выхода радионуклидов в окружающую среду и уменьшения воздействия проникающей радиации на площадке ЧАЭС.

Проект «Укрытия 4-го блока ЧАЭС» в основном был выполнен в срок с 20 мая по 20 августа 1986 г., но продолжал дорабатываться и видоизменяться в ходе строительства.

После проведения первых работ по очистке территории вокруг блока началось возведение «пионерных» защитных стен из железобетона, предназначенных для обеспечения безопасности производства работ по сооружению «Укрытия».

Внутри здания первыми шагами при строительстве «Укрытия» стало возведение перегородок и стен, отделяющих поврежденный 4-й блок от 3-го блока.

После этого началось возведение стен и других конструкций «Укрытия».

Северная каскадная стена (рис. 1.16) 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 (см. рис. 1.17).

Сохранившаяся западная стена блока была закрыта снаружи стеной с контрфорсами высотой до 50 метров.

Несущие балки и кровля (см. рис. 1.16 и 1.17).

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

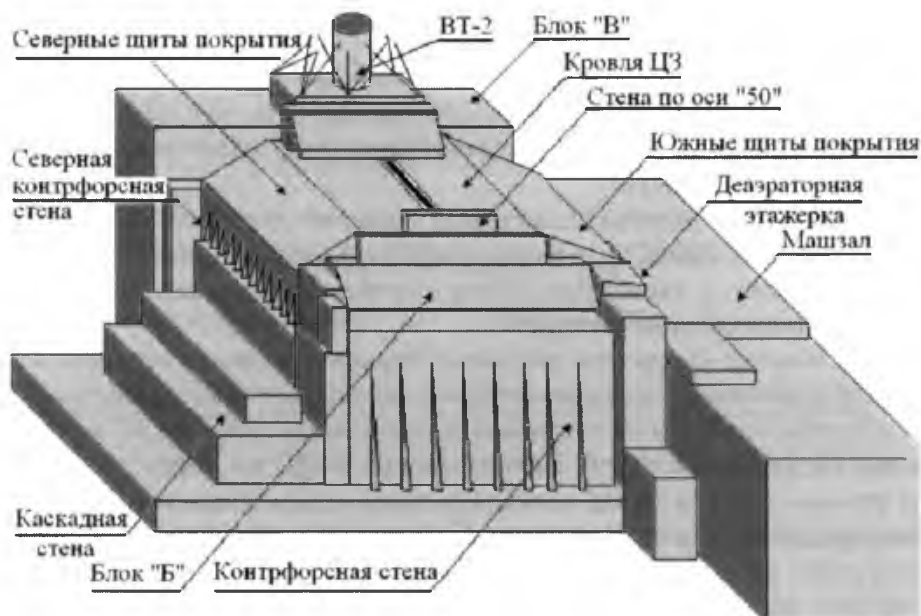


Рис. 1.16. Основные конструкции объекта «Укрытие»

Для опирания главных балок Б1 и Б2 выбраны на западе остатки железобетонной стены по оси «50» и железобетонные выхлопные шахты у осей «43-44», сохранившиеся после взрыва. На балки Б1 и Б2 было уложено 27 металлических труб диаметром 1220 мм и длиной 34,5 м, а над трубами устроена кровля из профилированного настила — 6 пространственных блоков.



Рис. 1.17. Балки и конструкции объекта «Укрытие»

Опорой для стальных щитов по южной стороне служит балка «Мамонт», опирающаяся на бетонные опоры у осей «41» и «51». Опоры были выполнены на завале из разрушенных железобетонных конструкций перекрытий 2-х 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 перекрытия запроектирована и выполнена балка-короб («Осьминог»), являющаяся распределительной конструкцией.

Строительство «Укрытия» поставило барьеры для вторичной миграции радионуклидов и интенсивного загрязнения окружающей среды, позволило осуществить работы по восстановлению деятельности ЧАЭС и снизить дозовые нагрузки для людей, работающих на ЧАЭС и в Зоне.

В течение всего периода проектирования и строительства «Укрытия» Курчатовский институт как научный руководитель активно участвовал в обеспечении работ необходимыми исследовательскими и расчетными материалами, проверкой и обоснованием основных инженерно-технических решений.

Большую роль при создании объекта сыграли фото и видео материалы, снятые сотрудниками ОГ под руководством Н.Н. Кузнецова и В.И. Ободзинского в самых, казалось бы, недоступных местах разрушенного блока.

1.9. Отчет о состоянии физических параметров «Укрытия» к моменту завершения основных строительных работ [1.26] (см. рис. 1.18)

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 Курчатовского института, «Радиового института», ИЯИ АН УССР, организаций Минобороны и Госкомгидромета.

Приведем некоторые из выводов 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»).

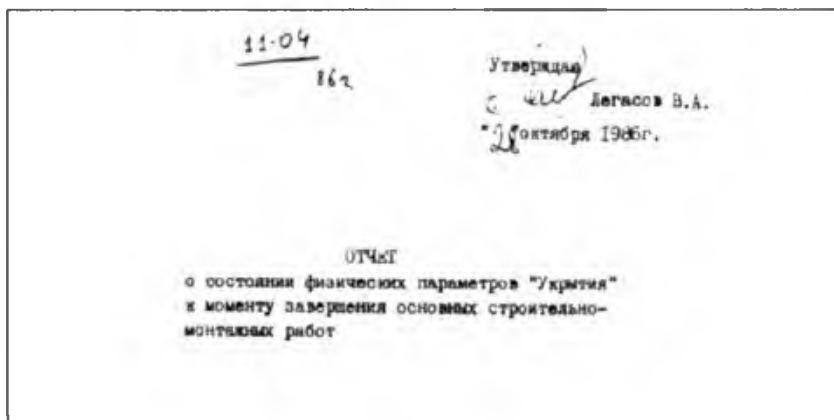


Рис. 1.18. Первая и последняя страницы отчета о состоянии объекта «Укрытие»

3. Наземные дозиметрические измерения, проводимые по периметру сооружения.

4. Создание математических моделей объекта и проведение расчетов дозовых нагрузок.

По первому пункту.

Измерения пространственного распределения мощности дозы на накате «Укрытия» (03.10.86, 12.10.86, 24.10.86) показали, что её средняя величина и характер распределения указывают на неизменность геометрии и физического состояния топлива (см. рис. 1.19)...

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». После установления трубного наката это распределение оставалось постоянным. 24–28 октября были проведены калибровочные измерения на бор-

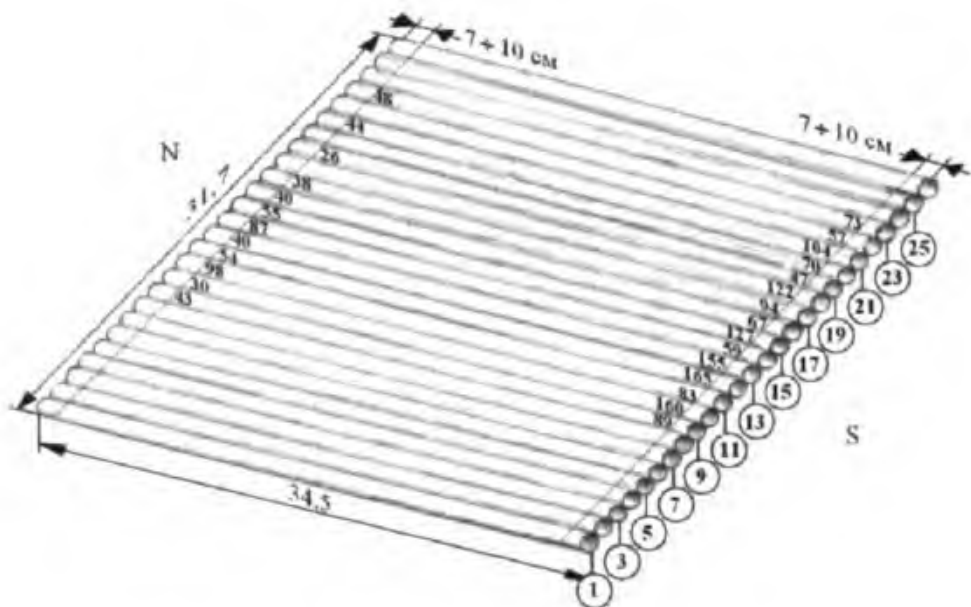


Рис. 1.19. Результаты измерения доз с помощью накопителей ДПГ-03 на трубном накате, Р/ч. Выполнены 12.10.86 г. Данные в пределах погрешности измерений ($\pm 30\%$) совпадают с данными, полученными 03.10.86 и 24.10.86

ту 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 200м от земли. Полученное значение находится в хорошем согласии с расчетным значением $(5 \div 10)$ Р/ч в геометрии полностью завершеного сооружения» (см. рис. 1.20)...

По третьему и четвертому пункту.

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

И далее.

«Постоянно проводился отбор проб воздуха в различных точка 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 месяцы не было обнаружено образований новых пятен загрязнения или увеличения интегрального загрязнения территории. Снижение интенсивности гамма-излучения соответствовало теоретическим оценкам.



Рис. 1.20. Программа «Галс». Вертолет пролетает над уже построенным «Укрытием» с запада на восток (следующий пролет — с севера на юг). Измеряется МЭД гамма-излучения.

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 расчетному».

1.10. Начало создания диагностических систем

Одновременно с возведением «Укрытия» разведывательные группы Курчатовского института 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 ИЯИ 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» [1.27].

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

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

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».

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, [1.28]).

1.11. Другие работы ОГ

Кроме работ, непосредственно связанных с разрушенным блоком и объектом «Укрытие», Курчатовский институт и его ОГ по поручению Правительственной комиссии проводили 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 первоначально⁷.

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. Несмотря на то, что его дезактивация проводилась многократно и с особой тщательностью, величина уровней внешнего облучения на рабочих местах все еще в десятки 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 его кровли, 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. 1.21).

Приведенные в отчетах рекомендации — очистить кровлю МЗ (лучше всего — 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 задерживать пуск блока и тем самым окончательно сорвать планы, утвержденные на «самом верху».

Поэтому особое внимание привлекло обращение в ПК одного из руководителей подразделений Курчатовского института, 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 -излучение⁸, идущее от «Укрытия»

Так называемый эффект sky shine (см. рис. 1.22).

Бороться с sky shine предлагалось путем забрасывания центрального зала «Укрытия» 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.

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

⁸Рассеянное излучение за счет «комpton эффекта».

Ордена Ленина и Ордена Октябрьской революции Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

О Т Ч Е Т

Радиационная обстановка в машинном зале 3 энергоблока ЧАЭС
и на его кровле.

/ Измерения 1-7 апреля 1987 г./

Ответственные исполнители:

Исполнители:

Боровой А.А.
Говар Л.И.
Камбулов И.Н.
Кузнецов П.А.
Заболоцкий О.М.
Климов И.В.
Будичев В.Ю.
Бузулукоев Ю.П.
Ермаков В.М.
Ишуров В.П.
Перфилов А.В.
Рыкунов Г.В.
Савутин С.В.
Статьенков Н.А.
Усачев В.С.

Рис. 1.21. Обложка одного из отчетов ОГ об исследовании дозовых полей в машинном зале 3-го энергоблока

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 спе-

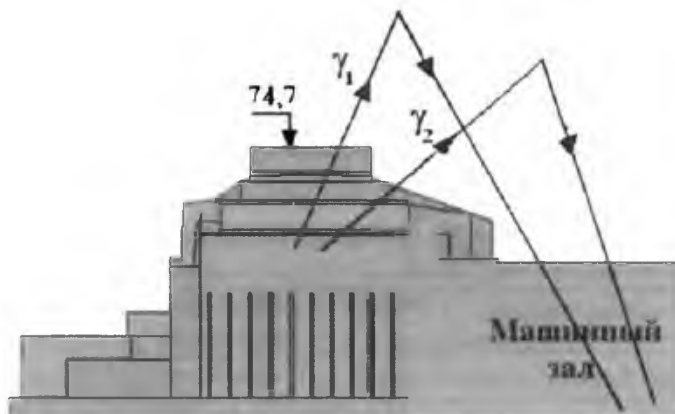


Рис. 1.22. Схема комптоновского рассеяния γ -излучения, идущего от развала реактора

циалистов 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 ($\sim 0,15 \text{ м}^2$), 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...» [1.1].

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

1.12. В Москве и в Вене

Как уже говорилось, вся подготовка исследований, которые проводила ОГ, шла в Москве, в Курчатовском институте. В состав ОГ входило «20–30 человек, число постоянно менялось. Обычно небольшая команда, подготовив в Москве свою аппаратуру, приезжала в Чернобыль и работала здесь иногда несколько дней, иногда несколько месяцев. При длительном сроке происходила периодическая смена ее состава. Часть людей, побывав здесь, уже никогда не возвращалась в Чернобыль. Другие после передышки вновь ехали на работу в зону» [1.25].

Однако работа над рядом важнейших проблем ЛПА проводилась и непосредственно в Курчатовском институте.

В первую очередь здесь следует назвать проведение масштабных расчетов, которые позволили описать процессы, приведшие к аварии и рекомендовать меры, позволяющие полностью обезопасить работающие РБМК от возможности ее повторения.

Для решения этой проблемы акад. А.П. Александрову удалось мобилизовать практически все вычислительные мощности Академии Наук СССР.

Она была решена в кратчайший срок — за несколько недель. Курчатовским институтом, НИКИЭТ, другими организациями были

предложены и осуществлены меры по повышению безопасности реакторов чернобыльского типа⁹ — увеличено число поглотителей, находящихся в активной зоне, изменена конструкция стержней СУЗ, повышено быстродействие аварийной системы, при загрузке начали использовать топливо с более высоким обогащением урана и т. п.

«Все это привело к 20%-ному увеличению расхода ядерного топлива на 1 кВт·ч электроэнергии, но возможность повторения аварии даже при нарушении персоналом инструкций была надежно исключена» (см. [1.29]).

В лабораториях Курчатовского института проводились самые разные, подчас очень сложные исследования образцов, поступающих из Чернобыля (см., например, [1.30]).

На московской площадке Курчатовского института проходила и подготовка к конференции экспертов МАГАТЭ в Вене, на которой должен был прозвучать подробный рассказ о чернобыльской аварии, ее причинах, следствиях и о работах по ЛПА.

Много говорилось и писалось о том, что руководство СССР долго скрывало правду об аварии на ЧАЭС от международных организаций, в том числе, и от МАГАТЭ.

Не обсуждая сейчас, что здесь верно, что нет, отметим только, что специалисты Курчатовского института сделали все от них зависящее, чтобы реальная ситуация стала известна как можно раньше и как можно более полно.

Во взаимоотношениях с МАГАТЭ это происходило следующим образом.

«28 апреля 1986 г. изданный в МАГАТЭ ежедневный обзор прессы, в котором излагались все появившиеся в средствах массовой информации сообщения по вопросам использования атомной энергии, не содержал каких-либо упоминаний о Чернобыле.

В середине дня 28 апреля Генеральный директор МАГАТЭ Х. Бликс обратился в Советское представительство с просьбой срочно связаться с ним. Х. Бликс сообщил, что министр энергетики Швеции обратилась к нему в связи с тем, что в некоторых районах страны на побережье Балтийского моря отмечено увеличение уровня радиации, превышающее обычную норму от 6 до 25 раз. То же самое зафиксировали в Дании и Финляндии.

Во второй половине дня 28 апреля западные радиостанции сообщили о повышении уровня радиации в Швеции в результате радиоактивного выброса на территории СССР. В тот же день Генеральный директор МАГАТЭ получил официальное сообщение об аварии на АЭС...

Поскольку чернобыльская авария имела трансграничные последствия, Советское представительство ежедневно направляло в Агентство информацию о мерах, принимаемых на поврежденном реакторе, о выбросах радиоактивных веществ. Полученные сведения МАГАТЭ рассылало государствам и ведущим международным информационным агентствам, публиковало в своих пресс-бюллетенях» [1.31].

⁹Первые мероприятия были осуществлены уже в мае в 1986 г.

Содержательная часть этой информации чаще всего поступала из Курчатовского института и в любом случае согласовывалась с его руководством.

В начале мая по инициативе Е.П. Велихова ЧАЭС посетили генеральный директор МАГАТЭ Х. Бликс и его заместитель М. Розен. Пролетев над территорией станции на вертолете, они своими глазами смогли увидеть реальную картину аварии и работы по ликвидации ее последствий, а советские эксперты дали им необходимые пояснения.

В ходе пресс-конференций, состоявшихся позднее в Москве и в Вене, представители МАГАТЭ изложили составленное ими краткое описание аварии, в котором были изложены собранные к тому времени данные [1.32]. В нем указывалось, что в МАГАТЭ будет проведено совещание экспертов, на котором Советский Союз представит подробную информацию об аварии.

Как уже говорилось, работа по подготовке этой информации шла в Курчатовский институт под руководством В.А. Легасова. Шла не только в обстановке острых научных дискуссий, но и сопровождалась сильнейшим сопротивлением бюрократической машины.

Вот, что вспоминает участник этой работы:

«...до 1985 г. действовал принцип «при социализме аварий не бывает», и данные обо всех авариях считались секретными. Когда материал для МАГАТЭ готовился к открытому опубликованию, один из высокопоставленных чиновников написал: *«Документ содержит совершенно секретные сведения. Считаю, что авторов следует привлечь к партийной и уголовной ответственности за разглашение государственной тайны»*.

Пришлось решать вопрос на уровне Н.И. Рыжкова¹⁰.

Перед отъездом в Вену члены советской делегации получили четкие инструкции: с иностранцами не общаться, ни на один вопрос не отвечать, говорить слово в слово то, что написано в подготовленном материале. Только благодаря решительной позиции В.А. Легасова (видимо, подкрепленной соответствующими полномочиями) удалось отойти от этой схемы» [1.29].

«К августу 1986 г. был подготовлен материал для конференции МАГАТЭ под названием «Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия» [1.33]. Конференция проходила в Вене с 25 по 29 сентября 1986 г. Несколько сот зарубежных специалистов, многочисленные журналисты были потрясены объемом представленной информации, а главное – открытостью обсуждения. Советским специалистам приходилось отвечать на десятки вопросов, и на каждый в меру нашего понимания давался откровенный ответ» [1.29].

Добавим, что доклад, который сделал академик В.А. Легасов, продолжался более 5 часов и был дополнен многочисленными диапозитивами и видеопленками.

Специальная комиссия экспертов МАГАТЭ подтвердила правильность основных выводов доклада о причинах аварии и мерах повышения безопасности реакторов РБМК.

Сейчас, после многих лет исследований, проведенных на объекте «Укрытие», создания значительного числа программ, способных модели-

¹⁰Н.И. Рыжков – Председатель Совета Министров СССР.

ровать аварийные процессы, наконец, развитию представлений о самом понятии безопасности в атомной энергетике, наше понимание произошедшего в Чернобыле, естественно, претерпело изменения (см, например, [1.34–1.37]).

Но это никак не снижает значения доклада, сделанного в Вене почти четверть века назад.

ЛИТЕРАТУРА

к 1 главе

- 1.1. Легасов В.А. Мой долг рассказать об этом. «Энергия» № 9, 1996. с. 41–49.
- 1.2. Гагаринский А.Ю. Курчатовцы и Чернобыль. «Советская Россия» № 47 (12669), четверг, 7 апреля 2005 г.
- 1.3. Велихов Е.П. Я на валенках поеду в 35-ый год (воспоминания). Москва, Агентство «Социальный проект», 2009 г., 255 с.
- 1.4. 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.
- 1.5. 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.
- 1.6. Дьяченко А.А. Правительственная комиссия», в сборнике «Чернобыль: катастрофа, подвиг, уроки и выводы, Интер – Весы, Москва, 1996 г., стр. 183–193.
- 1.7. Borovoi A.A. Fission product and transuranic release during Chernobyl accident (to be presented at International Conference «The fission of nuclei – 50 years», Leningrad 1989). Препринт КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова, Чернобыль, 1990, 20 стр.
- 1.8. Belayev S., Borovoi A., Buzulukov Yu. at al. Radioactivity Releases from the Chernobyl NPP Accident, International Conference Comparison of Consequences of Three Accidents: Kyshtim, Chernobyl, Windscale. Luxembourg, October 1–5, 1990.
- 1.9. Devel L., Guntay S., Powers D.A. The Chernobyl reactor accident source term. OCDE/GD (96) 12, Paris, 1996, 29 p.
- 1.10. Организация и ведение воздушной радиационной разведки при крупных радиационных авариях. В сборнике «Москва – Чернобылю», кн. 1, Москва, Воениздат, 1998, с. 89 – 98.
- 1.11. Кулаков В.М., Родионов Ю.Ф. Докладная записка академику С.Т. Беляеву, 15 мая 1986 г., 2 стр.
- 1.12. 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.
- 1.13. Беляев С.Т. Ликвидация последствий чернобыльской катастрофы. Природа № 11 1990 г.
- 1.14. 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.
- 1.15. Римский-Корсаков А.А. и др. Исследование выброса аварийного реактора 4-го блока Чернобыльской АЭС // Отчет / РИ им. В.Г. Хлопина. – Инв. № 14396. – Ленинград, 1986. – 23 с.

- 1.16. Чечеров К.П. Немирный атом Чернобыля «Человек» № 6 2006 г., с. 96–107.
- 1.17. 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.
- 1.18. 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.
- 1.19. Тепловая и радиационная разведка аварийного реактора № 4 Чернобыльской АЭС и оперативный контроль его состояния в процессе сооружения «Укрытия» (июль – октябрь 1986 г.). Базырь Н.Н., Беляев С.Т., Васильев А.А., Волков В.Г. и др., Отчет ИАЭ им. И. В. Курчатова, Москва, ЦНИИатоминформ, 1990 г.
- 1.20. 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.
- 1.21. Волкович А.Г., Ликсонов В.И., Лобановский Д.А. и др. Измерение распределения поверхностной плотности активности в шахте реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС. Атомная энергия, 1990, т. 69, в. 3, стр. 164–167.
- 1.22. Волков В.Г., Волкович А.Г. и др. Прибор для поиска и идентификации источников гамма-излучения и получения гамма-изображений (гамма-визор). Атомная энергия, 1991, т. 71, вып. 6, с. 578.
- 1.23. Волкович А.Г., Гуляев А.А., Потапов В.Н. и др. Распределение поверхностной активности в ЦЗ Объекта «Укрытие». Труды совещания «Проблемы создания и применения дистанционных технологий и дистанционно-управляемых самоходных агрегатов при работах в объекте «Укрытие». г. Чернобыль, Украина, 11–12 марта 1997.
- 1.24. 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.
- 1.25. Боровой А.А. Мой Чернобыль. Новый мир № 3, 1996 г., с. 132–180.
- 1.26. Отчет о состоянии физических параметров «Укрытия» к моменту завершения основных строительных работ, Отчет оперативной группы ИАЭ им. И.В. Курчатова № 11-04 от 28.10.86 г., Чернобыль.
- 1.27. «Зеркало недели» № 12 (591) 1–7 апреля 2006 г.
- 1.28. 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.
- 1.29. Калугин А.К. Современное понимание аварии. «Природа», № 11, 1990 г.
- 1.30. Платонов П.А. О процессе разрушения активной зоны реактора IV блока ЧАЭС (Ретроспективный анализ экспериментов и фактов). Препринт РНЦ «КИ», ИАЭ-6486/11, Москва, 2006 г. (Препринт посвящён памяти Ф. Ф. Жердева, изучавшего распределение радионуклидов во фрагментах графитовых блоков, выброшенных из реактора).
- 1.31. Хлестов О. Вечное эхо Чернобыля. Российские вести, 28 июня–5 июля 2006 г.
- 1.32. Газета «Правда», 11 мая 1986 г.
- 1.33. «Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и её последствиях, подготовленная для МАГАТЭ». Атомная энергия, т. 61, вып. 5, ноябрь 1986.

- 1.34. Чернобыльская авария: дополнение к INSAG-1 INSAG-7. Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности. Вена, 1993 г., 159 с.
- 1.35. Abagyan A.A., Adamov E.O., Burlakov E.V. et. al. Chernobyl accident causes: overview of studies over the decade. IAEA International forum «One decade after Chernobyl: nuclear safety aspects», Vienna, April 1–3, 1996, IAEA-J4-TC972, Working Material, p. 46–65 .
- 1.36. Сидоренко В.А. Безопасность реакторов РБМК: основные результаты и перспективы. IAEA International forum «One decade after Chernobyl: nuclear safety aspects», Vienna, April 1–3, 1996, IAEA-J4-TC972, Working Material, p. 435–447.
- 1.37. Borovoi A.A. Chernobyl Sarcophagus: Safety Problems. IAEA International forum «One decade after Chernobyl: nuclear safety aspects», Vienna, April 1-3, 1996, IAEA-J4-TC972, Working Material, p. 265–286.

2. КОМПЛЕКСНАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ (1987–1992 гг.)

2.1. План «генерального наступления»

К лету 1987 г. стало ясно, что поиск ядерного топлива внутри «Укрытия» с помощью разведывательных групп практически исчерпал свои возможности. Дальнейшему продвижению мешали огромные радиационные поля, разрушения и бетон, в больших количествах (десятки тысяч кубометров) пролившийся при дистанционном бетонировании опор для балок нового объекта. 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.

Вспоминает участник событий, один из сменных научных руководителей ОГ.

«Приехав в Москву, я сразу с головой окунулся в обсуждения и споры, которые проходили, в основном, на втором этаже Главного здания, в кабинете академика Беляева... именно хозяином кабинета впервые была высказана идея использовать для проникновения внутрь недоступных помещений технику бурения. Пробурить сквозь бетонные стены и металлические конструкции скважины, если надо, то длиной в десятки метров, и ввести по ним в предполагаемые места скопления топлива необходимые детекторы.

Чем дальше обсуждалась эта идея, тем реальнее и привлекательнее она казалась.

Вернувшись в Чернобыль, я принялся разрабатывать тактику наступления. Советовался со специалистами по реакторам, строителями, геологами. Просил приехать из Москвы тех сотрудников Курчатовского института, которые особенно хорошо знали блок. Никто не отказывал в помощи. Приезжали на свои выходные дни, днем и ночью обсуждали места установки буровых станков, направление бурения первых скважин, ходили со мной на блок и на месте решали спорные вопросы. Лаборатории института начали разрабатывать специальные детекторы, которые можно было вводить через скважины.

Каждый момент чувствовал я за спиной нашей маленькой чернобыльской группы мощь одного из лучших в мире ядерных центров.

В первых числах октября в Чернобыль приехал первый заместитель министра и институтское начальство. Целый день шло обсуждение программы наших действий. В целом она была поддержана» [2.1].

Итак, план «генерального наступления» был разработан в Курчатовском институте, доложен и одобрен на заседании Правительственной комиссии 13 октября 1987 г.

Вкратце он состоял в следующем [2.2].

- Необходимо было очистить и дезактивировать ряд помещений с западной (а позднее — с южной) стороны блока.
- Установить в этих помещениях бурильные станки.
- Пробурить скважины через бетонные стены и другие конструкции в шахту реактора и прилегающие к ней помещения, в подреакторные помещения.
- С помощью специальных перископов, телевизионных камер, фото оборудования провести наблюдения через пробуренные скважины.
- Обнаружив скопления ТСМ, измерить их параметры с помощью гамма, нейтронных и тепловых детекторов.
- Отобрать и исследовать пробы различных материалов.
- После этого оценить реальную опасность топливных скоплений и осуществить мероприятия по ее снижению.
- Выработать предложения по укреплению внутренних конструкций, грозящих серьезными обрушениями.

2.2. Создание Комплексной экспедиции при ИАЭ им. И.В. Курчатова

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 по укреплению внутренних конструкций объекта «Укрытие» в конце 1987 г. в Чернобыле была создана комплексная экспедиция при Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (на правах филиала Курчатовского института).

В наиболее напряженный период работ ее численный состав превышал 3000 человек. Стратегию и тактику этих работ определял Научный отдел (до 100 человек), в котором были собраны сотрудники ведущих научно-исследовательских институтов Минсредмаша СССР, НИИ Украины и Беларуси.

Научным руководителем КЭ был назначен академик С.Т. Беляев, начальником экспедиции был сначала И.Н. Камбулов, затем его сменил А.М. Пасечников.

Основными задачами КЭ были определены следующие.

- Проведение НИР по обеспечению безопасного состояния объекта «Укрытие» и подготовка рекомендаций по совершенствованию систем контроля.
- Изучение радиационной обстановки в зоне ЧАЭС и контролируемой зоне.
- Выполнение конструкторских и проектных работ в обеспечение программы исследований.
- Выполнение строительно-монтажных работ в обеспечение научных исследований, возложенных на КЭ.
- И ряд других задач.

2.3. Исследования с помощью скважин (см. [2.2])

Следуя намеченному плану, были очищены и дезактивированы помещения с западной, а позднее с южной части «Укрытия». В них были установлены буровые станки и через бетон и металлические конструкции пробурены скважины к местам предполагаемых скоплений ТСМ (см. [2.3–2.8]).

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

Основная часть скважин шла горизонтально из западных помещений блока (см. рис. 2.1).

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

Относительно небольшая часть скважин имела наклон и шла вниз или вверх.

На рис. 2.2 представлен фрагмент разреза 4-го блока по ряду К (в осях 50–45). Показаны скважины, пробуренные в опорной плите (в полу подаппаратного помещения) с запада на восток (3-10-Б и 3-9-68) и с юга на север (Ю-9-Б и Ю-9-В¹).

Для того, чтобы дать представление о масштабах проведенных работ, на рис. 2.3 показана схема скважин, пробуренных только на отметках от +8.800 до +9.400.

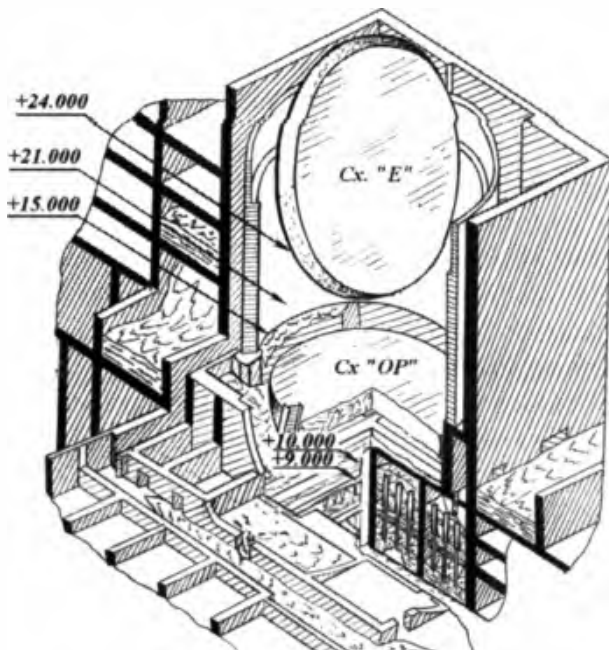


Рис. 2.1. Направления бурения скважин с западной стороны блока. Указаны основные отметки, на которых прошли скважины

¹Первая буква в названии скважины – направление бурения (3 – с запада на восток, Ю – с юга на север). Следующая цифра – высотная отметка начала бурения (10 – отм. 10.000). Последняя буква или цифра – индивидуальное обозначение скважины.

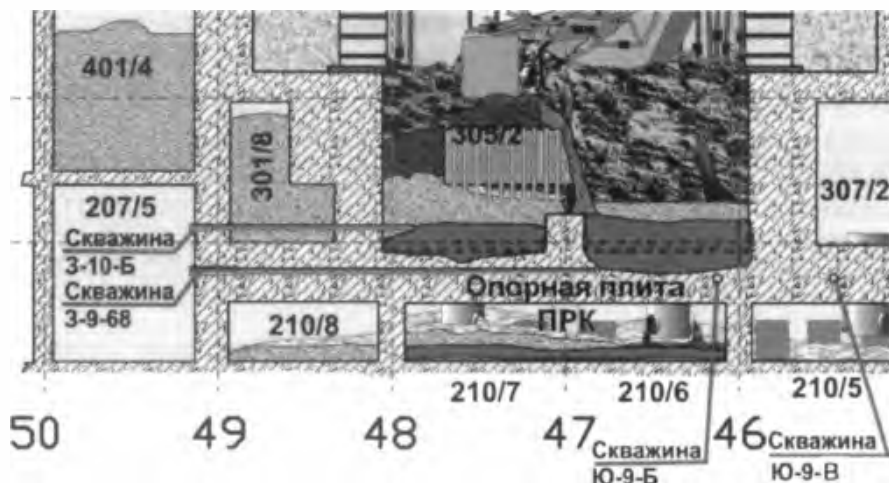


Рис. 2.2. Фрагмент разреза 4-го блока по ряду К (в осях 50—45). Показаны скважины, проходящие в опорной плите на отметках +9.000 и +10.000 м

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, на месте бурения станок собирался.

Для облегчения последующей дезактивации поверхности оборудования покрывались специальными составами и материалами (рис. 2.4, 2.5).

Сам процесс бурения сопровождался проведением сложных мероприятий по защите от проникающего излучения и радиоактивных аэрозолей (использовались коллективные и индивидуальные защитные средства).

Первые скважины внутри 4-го блока были пробурены в феврале—апреле 1988 г. из пом. 207/5 на отметках от +9.100 до +10.700 в подаппаратное пом. 305/2.

Наиболее важная информация о состоянии разрушенного реактора была получена в первых числах мая.

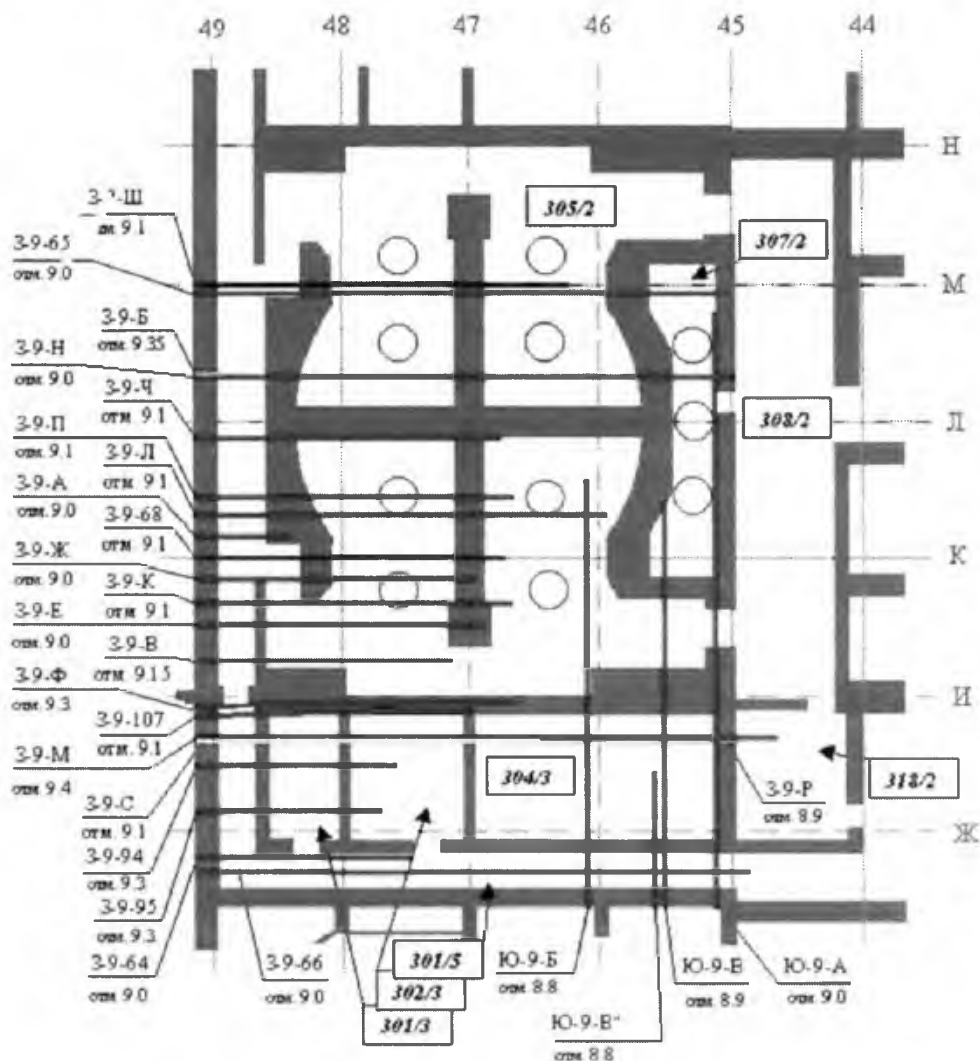
Вспоминает один из сотрудников Курчатовского института [2.1]:

«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 при взрыве это должно было быть место расположения ее центра. Того места, где зарождалась авария.

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».

И далее:

«Где же активная зона? Две сотни тонн урана, огромное количество графита? В следующие дни с максимально возможной скоростью рядом с первой была на той же высоте пробурена вторая скважина. Через нее в шах-



Наклонные скважины:

- 3-9-Ф (горизонтальный угол -1°);
- 3-9-107 (горизонтальный угол -1° , вертикальный -1°).

ту реактора ввели мощные осветители. А через первую скважину — специальный перископ.

ШАХТА ОКАЗАЛАСЬ ПРАКТИЧЕСКИ ПУСТА!

На этом удивительном открытии и окончились первые семь майских дней. Но отнюдь не окончились наши страдания.

Наиболее страшная, с точки зрения возникновения самопроизвольной ядерной реакции, уран-графитовая кладка перестала существовать. Но вслед за вздохом облегчения прозвучал и грустный вздох. Теперь нам предстояло отыскать пропавшее топливо».



Рис. 2.4. Подготовка бурового станка к работе



Рис. 2.5. Превентор (вход) скважины в пом. 515/3. Скважина пробурена в шахту реактора

К 1992 г. полное число исследовательских скважин составило почти 150. Впоследствии бурение скважин было приостановлено.

Предваряя дальнейший рассказ, отметим, что именно исследования с помощью скважин позволили:

- оценить внутренние разрушения реактора, выяснить состояние конструкций блока;
- найти «потерянное» топливо — определить основные места скоплений ТСМ и изучить их модификации;
- взять эти скопления под постоянный контроль, создать систему надежно работающих датчиков, максимально приближенных к ТСМ (система «Финиш»).

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».

Теперь более подробно о технике таких исследований.

2.4. Общий порядок проведения исследований с помощью скважин

Первая информация, которую давали скважины, заключалась в вынимаемых кернах, содержащих материалы, через которые шло бурение (рис. 2.6).

На объекте «Укрытие» сами керны и образцы, отобранные через скважины с помощью специально разработанных приспособлений, подробно описывались, фотографировались, измерялись их гамма-поля.

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 полная и удельная активность образцов, удельная активность от-



Рис. 2.6. Образцы конструктивных и топливосодержащих материалов, отобранные при бурении

дельных радионуклидов, глубина выгорания топлива, содержащегося в образце, его химический состав и т.п.

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

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.

2.5. Визуальное обследование (см. [2.2])

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

Важные наблюдения были сделаны с использованием специального перископа.

Исследовалась шахта 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 - +8.000 (пом. 207/5 и 207/4) в шахту реактора вводился перископ и системы освещения. После проведения визуальных исследований с помощью того же перископа проводилось фотографирование (см., например, рис. 2.7).



Рис. 2.7. Фотография шахты реактора, сделанная через перископ

Полученные результаты, дополненные телеинформацией, дали возможность впервые восстановить достаточно полную картину разрушений в шахте реактора (см. ниже), определить местоположение скоплений ТСМ, подготовить предложения по местам установки датчиков контрольно-диагностической системы «Финиш».

2.6. Измерения дозовых полей (см. [2.2, 2.7, 2.9])

Эти измерения проводились главным образом с помощью ионизационной камеры РД – «Сплав» (рис. 2.8).

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

$$\text{МЭД} \rightarrow I \rightarrow \omega \rightarrow \text{ПОКАЗАНИЯ} \\ \text{РЕГИСТРИРУЮЩЕГО ПРИБОРА}$$

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», представлен на рис. 2.9.

2.7. Измерения тепловых полей (см. [2.2, 2.7, 2.9])

В разделе 1.4 уже говорилось о тепловых измерениях и рассказывалось об измерении тепловых потоков, идущих с поверхности конструкций.



Рис. 2.8. Внешний вид камеры «Сплав»

*Характеристики скважины 3.9.К.
Горизонтальная, пробурена по ряду
К-200 из пом. 207/5. Отметка - 9.1 м.
Диаметр - 112 мм.
Длина - 14,13 м.*

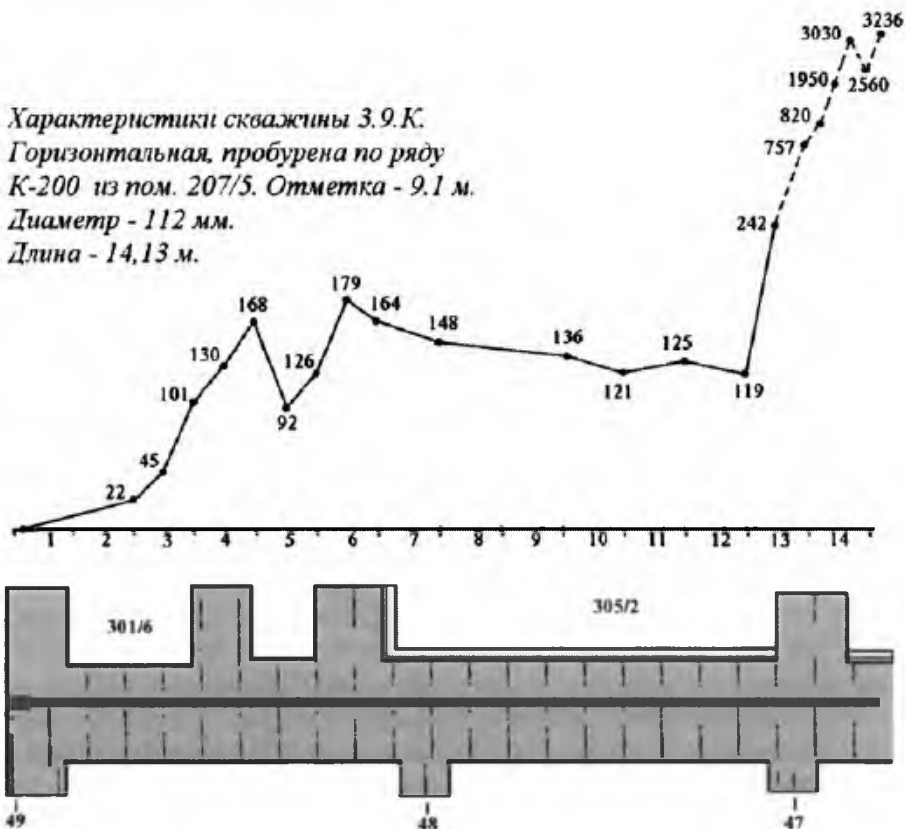


Рис. 2.9. Измерения мощности дозы (МЭД, Р/час), выполненные в скважине 3.9.К с помощью РД «Сплав» в октябре 1988 г.

При обследовании с помощью скважины использовался специальный зонд, разработанный и изготовленный специалистами НАН Украины (см. рис. 2.10).



Рис. 2.10. Подготовка к работе теплотрического зонда для измерений в скважинах.

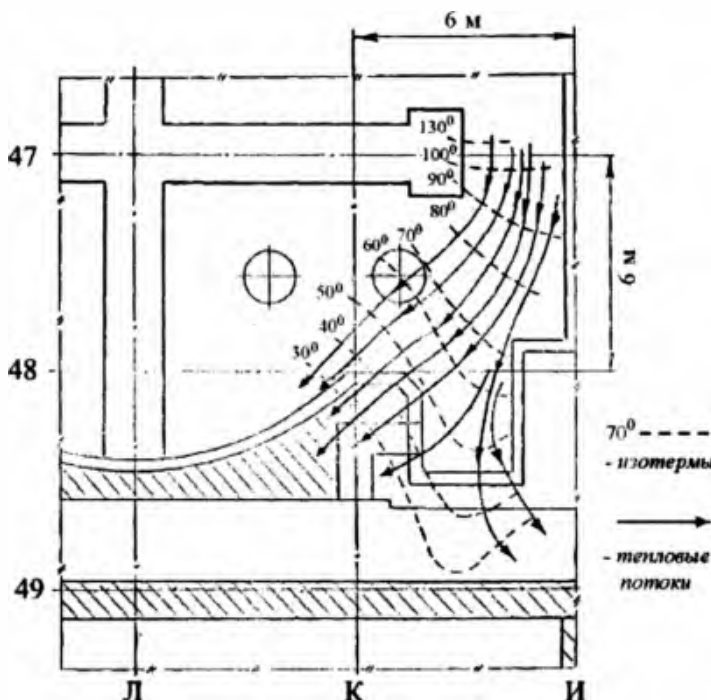


Рис. 2.11. Изотермы и направления тепловых потоков, полученные на основании измерений в скважинах опорной плиты (пом. 305/2, 1990 г.)

На рис. 2.11 приведены изотермы и направления тепловых потоков, определенные на основании измерений в скважинах опорной плиты (пол пом. 305/2, 1988–1990 гг.).

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

Впоследствии эти данные помогли определить границы распространения ЛТСМ в пом. 305/2 и оценить полное количество топлива, находящегося в этом помещении и шахте реактора.

2.8. Нейтронные исследования (см. [2.2, 2.9–2.16])

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.

Исследования были направлены на решение следующих основных задач:

- поиск больших скоплений ТСМ и изучение их нейтронно-физических параметров, таких, как плотности нейтронных потоков, спектральные свойства и т. п.;

- оценка глубин подкритичности ТСМ, доступных для проведения измерений;
- создание и обеспечение непрерывного функционирования системы нейтронных детекторов, предназначенных для длительного контроля нейтронных полей вблизи скоплений ТСМ.

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

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

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 играть вес детектора.

После испытаний самых разных детекторов нейтронов в качестве базовых были приняты стандартные камеры деления отечественного производства КНК-15 и КНТ-31.

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.

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 (рис. 2.12).

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.

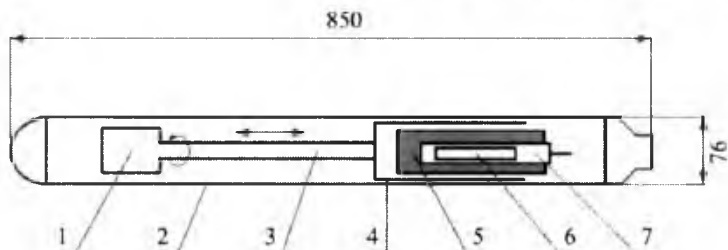


Рис. 2.12. Схема сторожевого нейтронного детектора: 1 — электродвигатель. 2 — герметичный кожух. 3 — винт перемещения чехла 4 — кадмиевый чехол. 5 — замедлитель (пластик). 6 — чувствительный объем камеры деления 7 — камера деления КНТ-31

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

Разведывательный нейтронный детектор (РНД)

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

В особо «горячих скважинах»² 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.

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.

Исследования ТСМ с помощью «пассивных» нейтронных методов

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

²Скважины, в которых измеренная величина МЭД превышала 50 Р/час.

Уже первые оценки плотностей нейтронных потоков в доступных областях, где сосредотачивались ТСМ, показали, что по порядку величины они незначительны (~ 100 н/см²×с). С одной стороны, это говорило о 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. следующие:

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, плотность нейтронных потоков не превышает 150 н/см²×с при вкладе тепловых нейтронов не более 10 н/см²×с.

Нижние отметки блока (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 ТСМ, 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.

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

Около пемзообразных куч в бассейне-барботере потоки достигают 100 н/см²×с.

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 $K_{>ф.}$ 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. Опираясь на расчетные величины для спонтанного деления (см. раздел 1), были сделаны оценки $K_{>ф.}$ 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 $K_{>ф.} < 0.4$).

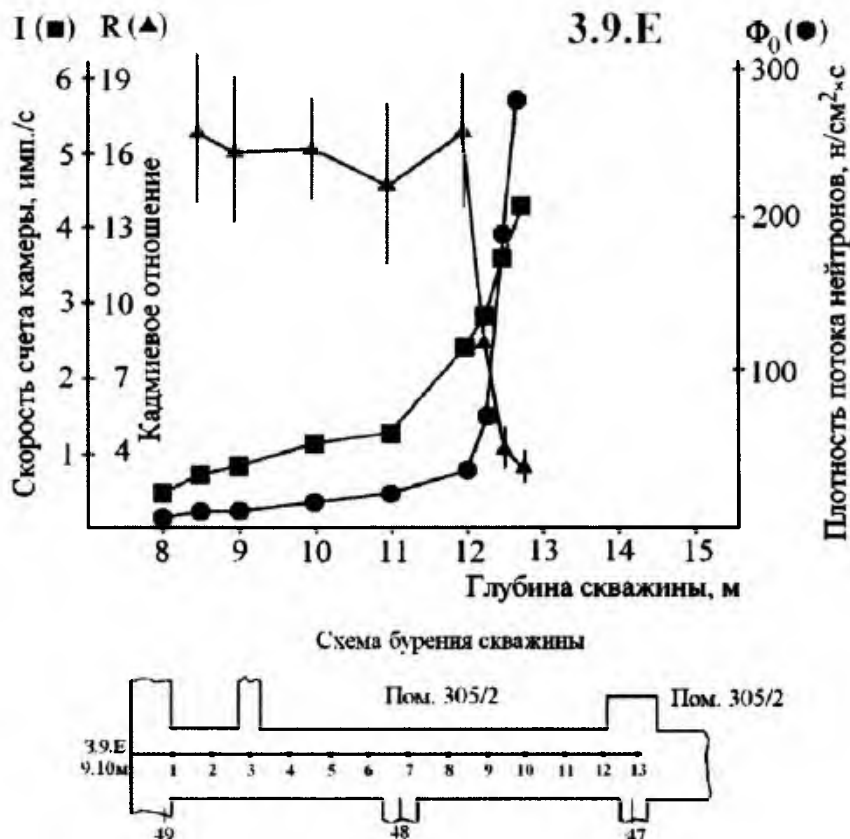


Рис. 2.13. Графики зависимости I, R и Φ от глубины для скважины 3.9.E и схема ее бурения

На рис. 2.13 для иллюстрации результатов, полученных «пассивными» методами приведены графики зависимости I, R и Φ от глубины введения нейтронного детектора в скважину 3.9.E.

Исследования ТСМ с помощью «активного» нейтронного метода

Для «активного» воздействия на среду, при определении величины эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$, 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), который обеспечивал выход 10^{13} н/имп.³ Детектором служила камера КНК-15. Сущность метода заключалась в том, что ТСМ какое-то время облучались нейтронами (несколько минут), а затем источник быстро убирался (за время ~ 1 с) или выключался генератор и регистрировался характер спада нейтронной активности.

³Частота запуска генератора варьировалась в диапазоне (10–30) Гц.

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

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

2.9. Лабораторные анализы извлекаемых образцов (см. [2.2])

Подготовка образцов на объекте «Укрытие».

Как уже говорилось выше, из кернов, извлеченных при бурении, отбирались образцы, которые проходили предварительную подготовку в лаборатории, находящейся непосредственно на объекте «Укрытие»⁴.

Последовательность выполняемых операций представлена в виде диаграммы на рис. 2.14.

Лабораторные анализы (спектрометрия, фотометрия, радиохимия, элементные анализы).

Последующая обработка проб проходила в лабораториях, расположенных в Чернобыле⁵.

Здесь образец (раствор) после прохождения соответствующей радиохимической обработки использовался для определения содержания в нем осколков деления урана и трансурановых элементов.

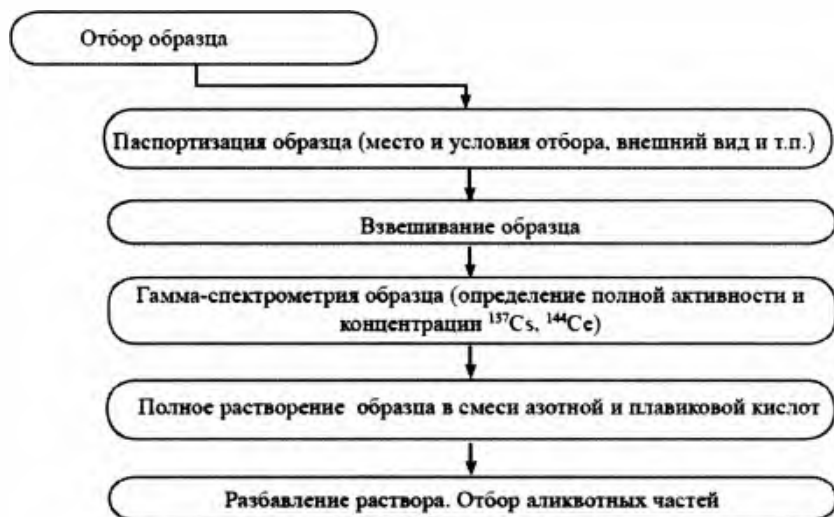


Рис. 2.14. Предварительная обработка образцов в лаборатории на объекте «Укрытие»

⁴Аналогичную процедуру проходили и другие образцы в виде твердых крупинки, порошков и т.п., отобранные в помещениях «Укрытия» разведывательными группами.

⁵В 1988г. в Чернобыле было дезактивировано и перестроено по планам Курчатовского института двухэтажное здание бывшего техникума. В нем расположилось Отделение ядерной и радиационной безопасности — кабинеты, рабочие комнаты, лаборатории и т.п. Среди последних были специализированные лаборатория радиохимии и спектрометрии.

Измерения, как правило, начинались с определения содержания в растворе ^{144}Ce с помощью γ -спектрометрии. После этого использовался «метод корреляции» (МК) — метод количественного определения содержания радионуклидов и урана в образцах ТСМ по измеренной интенсивности гамма-излучения ^{144}Ce . О нем уже говорилось в разделе 1.3.

Напомним, что коэффициент корреляции — это расчетное отношение концентрации урана, трансурановых элементов, ряда осколочных излучателей (труднолетучих) к содержанию ^{144}Ce в топливе 4-го блока ЧАЭС.

Метод пригоден для случаев, когда определяемые элементы связаны общей топливной матрицей. Для образцов топлива с малым выгоранием и при воздействии процессов выщелачивания отдельных элементов из ТСМ результаты, полученные МК, могут иметь значительную погрешность.

Таким образом, после определения концентрации в исходном растворе ^{144}Ce проводили оценки ожидаемого в нем содержания стронция, урана, плутония и др. В дальнейшем переходили к более точным методам анализа.

Для определения содержания урана кроме МК использовались фотометрический метод и лазерно-люминесцентный метод.

Для определения концентрации плутония в образцах ЛТСМ, в основном, применялся метод экстракции его из пробы с последующей альфа — спектрометрией.

Химический элементный анализ образцов ЛТСМ проводился эмиссионно-спектральным методом.

2.10. Состояние внутренних конструкций 4-го блока после аварии (см. [2.2], [2.9], [2.11], [2.16])

Как уже говорилось, в мае 1988 г., после того, как первые скважины вошли в шахту реактора и в подреакторную плиту, стала проявляться картина огромных разрушений, вызванных аварией. Общая картина расположения и состояния основных внутренних конструкций 4-го блока стала известна к концу 1988 г.

До аварии они выглядели так, как это показано на рис. 2.15.

Рис. 2.16 дает представление о картине разрушений, сложившейся у исследователей к концу 1988 г. При этом завал из конструкций на схеме «ОР» в пом. 305/2 на рисунке еще не мог быть детализирован.

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

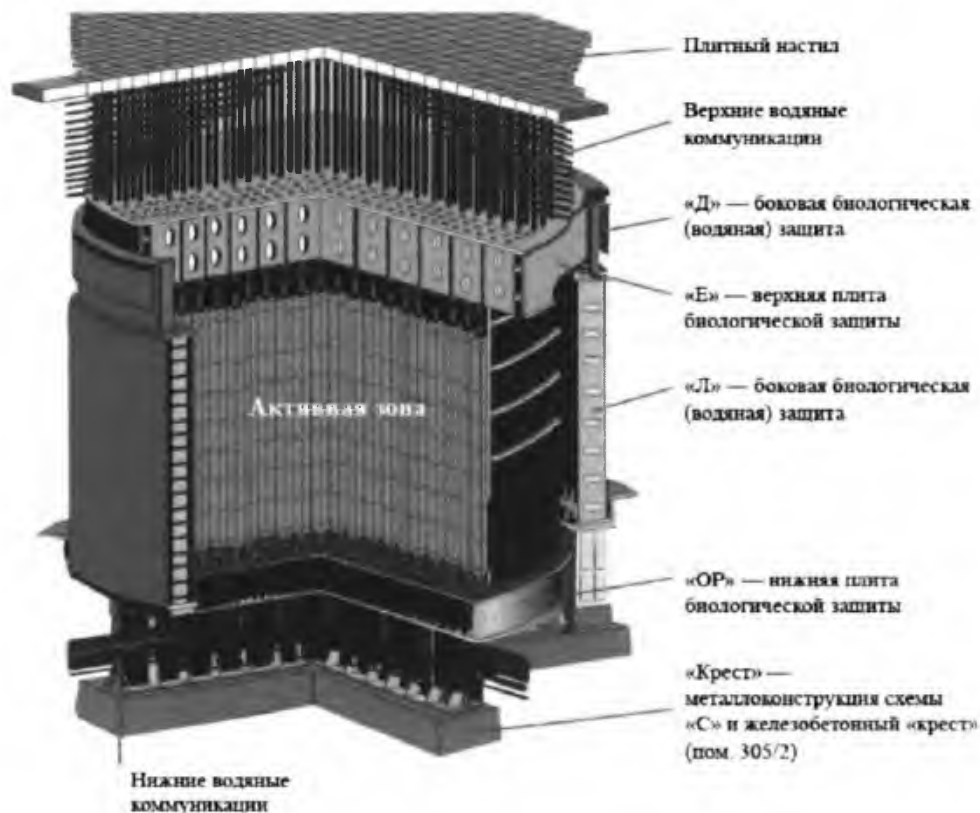


Рис. 2.15. Схема расположения конструкций, находящихся в шахте реактора (до аварии)

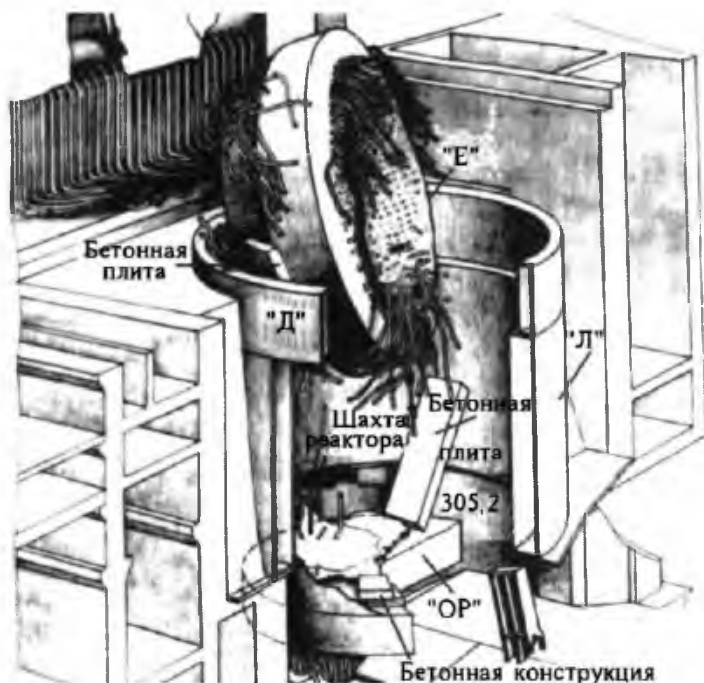


Рис. 2.16. Разрушения в шахте реактора, вызванные аварией (для наглядности юго-западный сектор шахты вырезан)

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». 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.

На схеме «ОР» находится завал, состоящий из фрагментов бетонных конструкций, разрушенных элементов реакторной установки и «свежего бетона»⁶. Сверху на завале в северо-восточном секторе, под углом 60° стоит железобетонная 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 центральном зале материалы, сброшенные с вертолетов, образовали холмы, достигающие у стены южных барабан-сепараторов высоты 15 м.

Северная часть ЦЗ, которая меньше засыпана этими материалами, завалена обломками реактора. Обращенные к ЦЗ стены помещений южного и северного барабан-сепараторов разрушены ударной волной при аварии (рис. 2.17).

В дальнейшем исследовании с помощью скважин продолжались, большой объем данных был получен и при работе разведывательных групп, постепенно проникавших все дальше во внутренние помещения блока.

2.11. Модификации ядерного топлива, находящегося в «Укрытии» (см. [2.2, 2.8, 2.9, 2.11, 2.16])

Авария на 4-ом блоке ЧАЭС привела к разрушению активной зоны реактора и образованию различных модификаций материалов, содержащих ядерное топливо.

Две из таких модификаций — фрагменты активной зоны и топливная пыль обнаружили себя уже в первые моменты после взрывов.

Уже говорилось о том, что на первом заседании Правительственной комиссии (вечер 26 апреля 1986 г.) рассматривался вопрос об образовании и такой модификации, как расплав из материалов активной зоны, образовавшийся из-за высоких температур в разрушенном реакторе.

Прямые доказательства образования такого расплава во время активной стадии аварии (26.04.86—06.05.86) были получены осенью 1986 г. (см. раздел 1.7).

⁶Бетона, попавшего сюда при строительстве объекта «Укрытие»



Завал на потолочных перекрытиях
северных барабан-сепараторов

Сх. «Е»
Центральный зал

Завал на потолочных перекрытиях
южных барабан-сепараторов

Рис. 2.17. Завалы материалов на верхних отметках объекта «Укрытие»

Наконец, в 1990 г. на поверхности лавы сотрудниками КЭ была обнаружена модификация ТСМ, содержащая растворимые формы урана, плутония, америция.

Таким образом, в результате анализов сотен образцов ТСМ, отобранных из кернов, взятых с помощью специальных приспособлений через скважины и доставленных разведывательными группами, определились четыре основные модификации ТСМ, находящиеся в «Укрытии».

1. Фрагменты активной зоны (фрагменты АЗ, АЗФ)

Большая их часть, как предполагают, выброшена при взрыве на верхние этажи блока, в частности, в центральный зал, часть находится в шахте реактора и пом. 305/2 (см. рис. 2.18).

2. Мелкодиспергированное топливо (пыль) — горячие топливные частицы

Размеры частиц изменяются от долей микрона до сотен микрон. Они наблюдаются практически во всех помещениях объекта и в образцах почвы в ближней и дальней зоне (рис. 2.19).



Рис. 2.18. Фрагменты разрушенной активной зоны в пом. 305/2

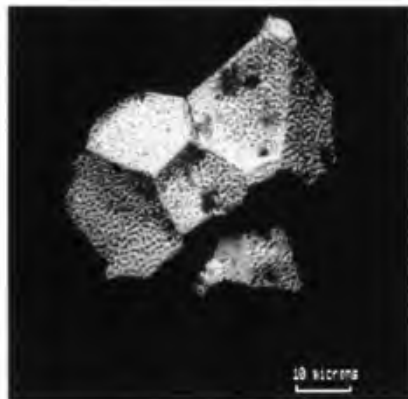


Рис. 2.19. Микрофотография горячей частицы, состоящей из топливной двуокиси урана. Имеет микроблочное строение

Исследования, проведенные специалистами КЭ, показали, что внутри объекта находятся не только радиоактивные частицы, имеющие топливную природу, но и целый ряд других.

Это следствие того, что при аварии реализовались несколько механизмов образования радиоактивных частиц, основные из которых следующие:

- диспергирование топлива при вводе избыточной реактивности (образовывались зерна двуокиси урана);
- пароциркониевая реакция (образовывались частицы в виде окиси циркония с включениями фазы $(Zr,U)O_x$ и ряд других);
- высокотемпературное окисление фрагментов топлива в воздушной атмосфере;
- образование «конденсационных» аэрозолей из паров летучих радионуклидов (летучие радионуклиды, участвующие в выбросе и первоначально находящиеся в газообразной форме, осаждались на неактивные и активные аэрозольные частицы, формируя, так называемую, «конденсационную» компоненту выброса).

3. Застывшие лавообразные топливосодержащие материалы (ЛТСМ)

Они образовались во время активной стадии аварии при высокотемпературном взаимодействии топлива с конструкционными материалами блока.

Работы, выполненные КЭ показывали, что образовавшийся в подаппаратном пом. 305/2 расплав распространялся по полу, достигал паросбросных клапанов, переливался внутрь (рис. 2.20) и попадал в нижние помещения, созданные для локализации пара при проектной аварии.

Это — парораспределительный коридор и два этажа бассейна-барботера (ББ-1 и ББ-2), расположенные на отметках +6.00, +3.00 и 0.00 соответственно.

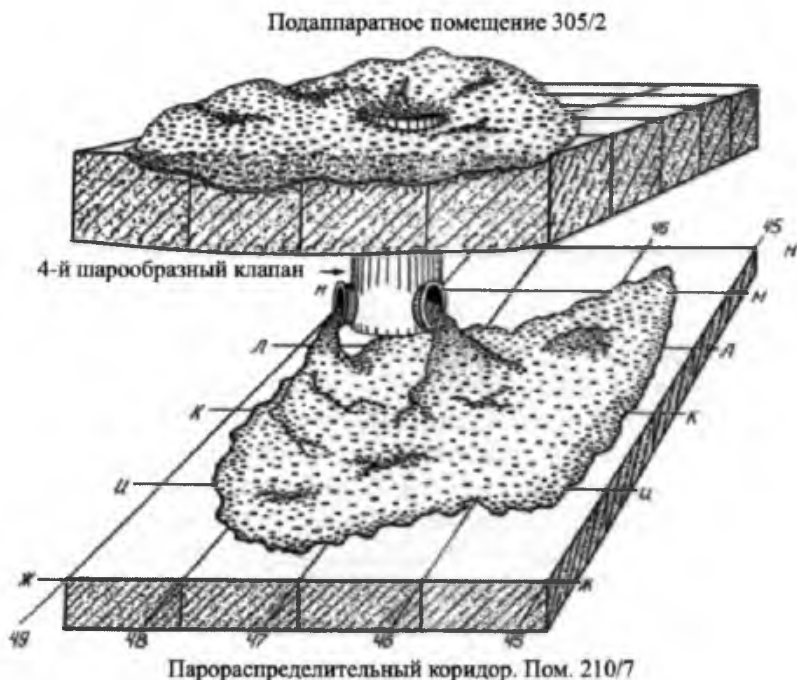


Рис. 2.20. Лава распространялась по полу пом. 305/2, достигала паросбросных клапанов, переливалась внутрь и попадала в помещения парораспределительного коридора и далее, на нижние отметки блока (см. рис. 2.21)

В перечисленных помещениях были найдены скопления застывшей лавы (рис. 2.21).

Одновременно расплав распространялся и в горизонтальном направлении, так как в стене между пом. 305/2 и 304/3 при аварии образовался пролом.

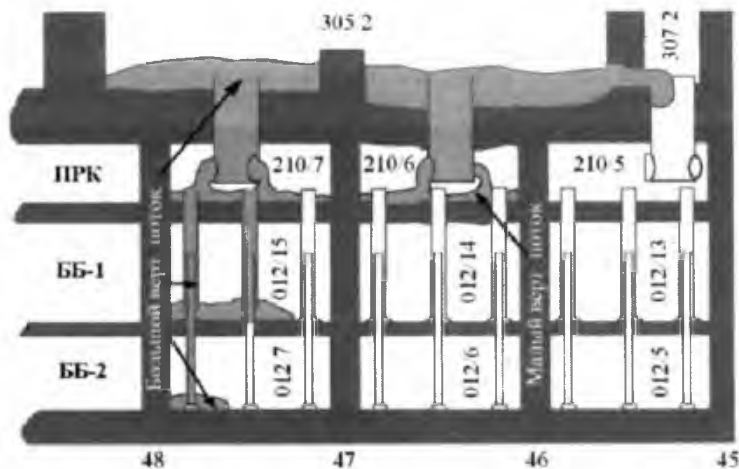


Рис. 2.21. Вертикальное распространение лавы по паросбросным клапанам и трубам. Большой вертикальный поток: пом. 305/2 → пом. 210/7 → пом. 012/15 → пом. 012/7. Малый вертикальный поток: пом. 305/2 → пом. 210/6

4. Модификация ТСМ, содержащая растворимые формы урана, плутония, америция

В сентябре 1990 г. на поверхности застывших струй лавы, находящихся в парораспределительном коридоре, были обнаружены ярко-желтые пятна. Они покрывали более четверти поверхности черной керамики, которая застыла во всех трех патрубках 3-го паросбросного клапана в пом. 210/6 (рис. 2.22).

Микрорентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы позволили определить, что новообразованные вещества — продукты разложения ТСМ.

Стало очевидно, что в глубине ТСМ происходят процессы, характерные для зон гипергенезиса на урановых месторождениях. Эти процессы заключаются во вторичном изменении (окислении) окислов урана и образовании хорошо растворимых оксикарбонатов урана.

Легкая растворимость продуктов, образующихся при вторичном изменении ТСМ, приводит к тому, что во влажной среде рыжие пятна из-за капиллярного подъема по микротрещинам образуются даже на поверхности заливающего топливосодержащие материалы бетона.

Соединения обогащенного урана, входящие в новообразования, могут переноситься потоками воды, накапливаться в помещениях объекта, проникать в окружающую среду.

Их неконтролируемое перемещение может приводить к уменьшению ядерной безопасности объекта.

Общее представление о расположении АЗФ, ЛТСМ, ТП в помещениях объекта дает рис. 2.23.

2.12. Исследования специалистами КЭ радиоактивных аэрозолей в объекте «Укрытие»

В ходе проведения исследований на ЧАЭС специалисты Курчатовского института уделяли значительное внимание свойствам аэрозольных частиц объекта «Укрытие» (РАУ). Наряду с проникающим излучением они явля-

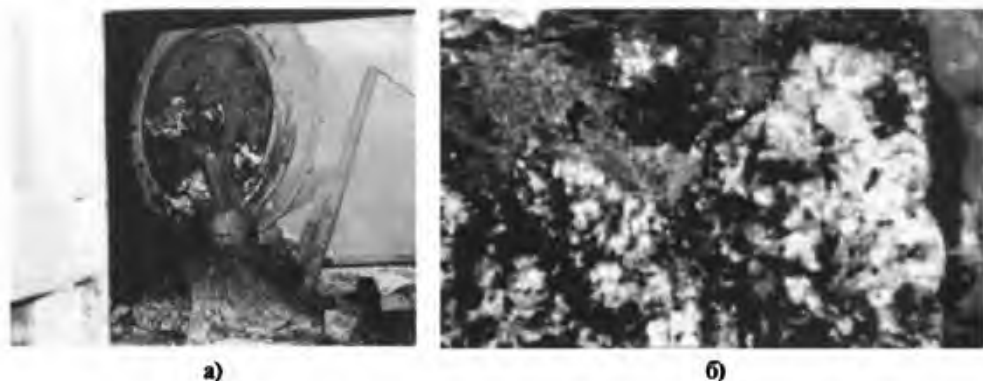


Рис. 2.22. а) Желтые пятна новообразований на лаве в парораспределительном коридоре. б) Вид желтых пятен вблизи

1. Центральный зал, другие верхние помещения. Фрагменты АЗ, топливная пыль, ТСМ (?).

2. Южный бассейн отработанного топлива. Топливные сборки.

3. Большинство помещений ОУ. Топливная пыль.

4. Пом. 305/2 и др. на отм. +9.000.

ЛТСМ, фрагменты АЗ.

5. Парораспределительный коридор. ЛТСМ.

6. Бассейн-барботер (2 этаж). ЛТСМ.

7. Бассейн-барботер (1 этаж). ЛТСМ.

8. 304/3, 303/3, 301/5, 301/6, 217/2/. ЛТСМ (нет на рис.)

9. Реакторный блок. Машинный зал. Скопление воды с солями урана (нет на рис.)

10. Под каскадной стеной. Фрагменты АЗ (нет на рис.)

11. Топливо на площадке. Фрагменты АЗ, пыль.

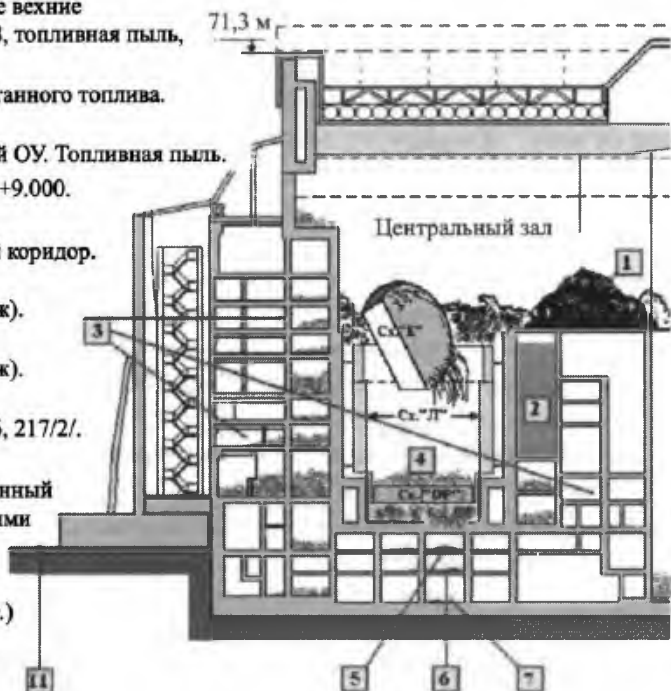


Рис. 2.23. Различные модификации ТСМ в помещениях объекта «Укрытие»

лись главной опасностью при проведении работ по ЛПА на объекте и на окружающей территории.

Для того, чтобы определить основные характеристики аэрозольных частиц, находящихся в помещениях «Укрытия», в 1988 г. КЭ был проведен цикл систематических исследований РАУ [2.17, 2.18]. Изучалась распределение частиц по активности, аэродинамическим характеристикам, динамики этих параметров и т. п.

Материалом для исследований стали горячие частицы, извлеченных из фильтров респираторов исследователей, проникших в еще не освоенные помещения «Укрытия».

В лабораториях КЭ были разработаны оригинальные методы выделения отдельных частиц и с их помощью получено распределение РАУ по размерам и активностям (рис. 2.24 и 2.25).

Радионуклидный состав аэрозолей удовлетворительно совпадал с ожидаемым для топлива 4-го блока. Эти данные позволили начать работы по повышению эффективности средств коллективной и индивидуальной защиты персонала, работающего на объекте.

2.13. Еще о методах исследования скоплений топливосодержащих материалов

Для поиска и изучения скоплений ТСМ в «Укрытии» специалисты КЭ кроме описанных выше методов использовали такие, как «тепловой», ме-

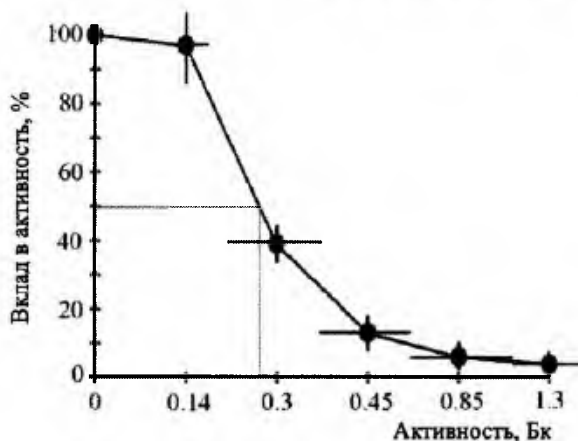


Рис. 2.24. Интегральное распределение активностей аэрозольных частиц (197 частиц). Медианное значение активности равно 0,27 Бк, что соответствует $2,1 \times 10^{-11}$ г (шарик $\varnothing \sim 1,6$ мкм) UO_2 для среднего состава топлива 4-го блока ЧАЭС на дату измерения – 950 суток после аварии

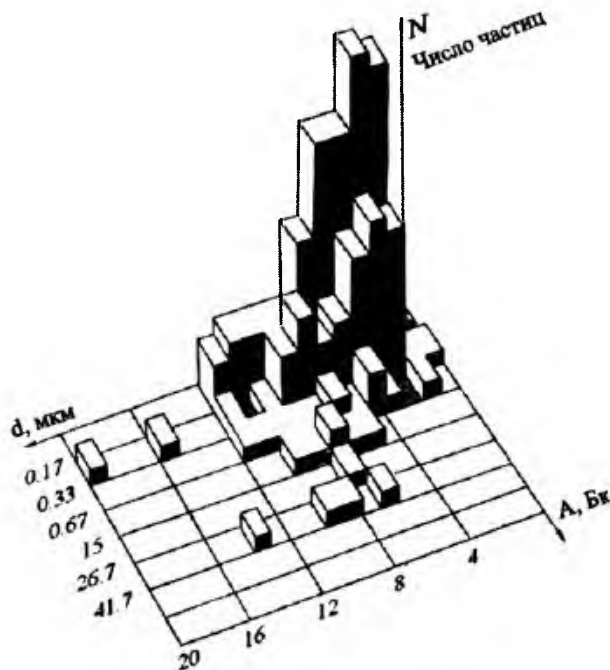


Рис. 2.25. Распределение РАУ по диаметрам и активности (180 частиц). Ноябрь 1988

тод континуальных шнуров, обнаружение интенсивных гамма-источников с помощью коллимированных детекторов и целый ряд других.

«Тепловой метод»

Он позволял обнаружить помещения (и места в них), в которых находились скопления топлива, проводя тепловые измерения – сканирование

стен и перекрытий со стороны других относительно доступных по дозам помещений. Использовался тот факт, что полный тепловой поток, выходящий из помещения (через стены, потолок, пол) определяется мощностью тепловых источников, заключенных внутри помещения и, следовательно, остаточным тепловыделением топлива внутри него. Зная из расчетов и контрольных экспериментов удельное тепловыделение топлива (например, в 1990 г. — 0,666 кВт/т (U)) можно было найти массу этого топлива.

В качестве примера применения «теплого метода» приведем оценки массы топлива в подаппаратном пом. 305/2, выполненные КЭ в 1989–1990 гг. [2.19].

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

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 (рис. 2.16).

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.

Для определения тепловых потоков, идущих вниз, использовались скважины, пробуренные в толстой опорной плите подаппаратного помещения. В них помещалась аппаратура, описанная в разделе 2.7. 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. 2.26). Каждый из них представляет со-



Рис. 2.26. Автономный теплотметрический зонд, использовавшийся при измерениях теплового потока и температуры на плоской поверхности

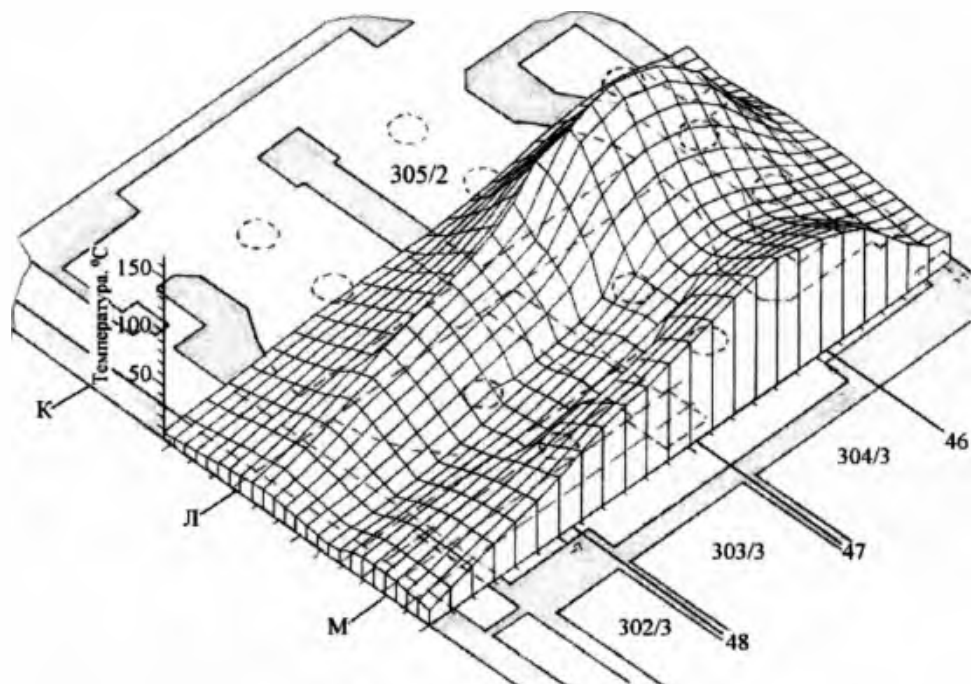


Рис. 2.27. Температурное поле в опорной плите реактора по результатам исследований, выполненных в 1988–1989 гг.

бой легкую телескопическую штангу, на конце которой с помощью шарнирного соединения был закреплен измеритель (преобразователь) теплового потока и температуры.

К концу 1988 г. были получены первые результаты.

На рис. 2.27 (см. также рис. 2.11) представлены данные измерений температуры⁷, выполненных в опорной плите с помощью скважин и переносных приборов [2.8, 2.19].

Вся картина указывает на наличие мощного источника тепла в юго-восточном квадранте.

Измерения были завершены в июле 1989 г.

После построения карты тепловых потоков, идущих в опорной плите, была сделана оценка интегральной мощности их теплоотвода. Она дала значение $N_1 = (30 \pm 7)$ КВт (для июля 1989 г.).

Следующим шагом должны были стать измерения температуры и скорости подъема воздушных масс в шахте реактора. Тем самым почти «замыкалась» область расположения ТСМ в пом. 305/2.

Для оценки мощности теплоотвода с верхней поверхности скопления ТСМ в марте 1990г. была проведена серия экспериментов по определению скоростей воздушных потоков в реакторном пространстве и их температуре.

⁷Учитывая, что измерения проводились в «горячий» период, когда шел интенсивный спад остаточного тепловыделения, все данные были пересчитаны к единой дате.

В них применялся индикаторный метод определения расхода [2.19]. В качестве газа-индикатора использовались: тритий, криптон-85, радиоуглерод (в составе метана) и гелий. Подача газа в РП производилась через скважины на нижних отметках, а также через южные ворота пом. 305/2. Отбор образующейся газовой смеси производился через скважину на отм. 24 м. Эти измерения выполнили совместно сотрудники РИ и КЭ.

В результате была получена величина средней скорости восходящего потока в шахте реактора.

Определение разности температур газа велось по показателям термометров системы «Финиш».

Измерения и расчеты позволили оценить мощность тепловыделения, выносимую воздушными массами с верхней поверхности развала 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.

Таким образом суммарная мощность тепловыделения топлива составляет 60 КВт.

Она соответствует массе топлива в пом. 305/2 – (75 ± 25) т по U [2.19].

«Тепловой метод» позволил оценить и количество топлива, сосредоточенного в ПРК. Эта оценка – (23 ± 8) т по U [2.20].

Метод континуальных шнуров

В 1988–1991 годах группой исследователей из Курчатовского института (см. [2.21] и ссылки в ней) посредством континуальных дозиметрических шнуров (КДШ)⁸ были проведены масштабные исследования гамма-полей в центральном зале.

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.

Полученные данные по распределению наиболее интенсивных источников гамма-излучения можно было связать с крупными скоплениями топлива на (или вблизи) поверхности завалов (рис. 2.28).

Обнаружение интенсивных гамма-источников с помощью коллимированных детекторов.

В 1991 г. группой сотрудников РИ, ИБРАЭ и КЭ было проведено гамма-сканирование поверхности схемы «Е» с помощью коллимированного

⁸Радиационные дефекты, с концентрацией, пропорциональной дозе, накопленной во время экспонирования в поле гамма-излучения, возникают в материале дозиметрического шнура. Использувавшиеся 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 через 1 м).

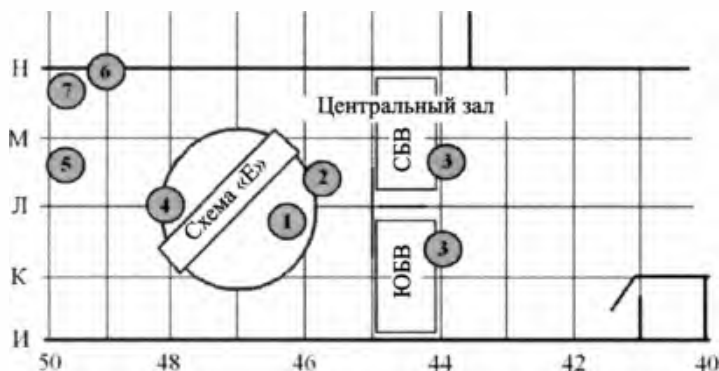


Рис. 2.28. Схема расположения источников сильного гамма-излучения в центральном зале и их предполагаемая активность 1 — около 70 ККи 2 — около 40 ККи 3 — (10–20) ККи 4 — около 100 ККи 5 — ? 6 — около 50 ККи 7 — около 20 ККи

детектора, расположенного на крыше южного барабана-сепаратора (рис. 2.29).

После проведения достаточно сложной обработки экспериментальных данных авторы пришли к следующим выводам [2.22].

«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».

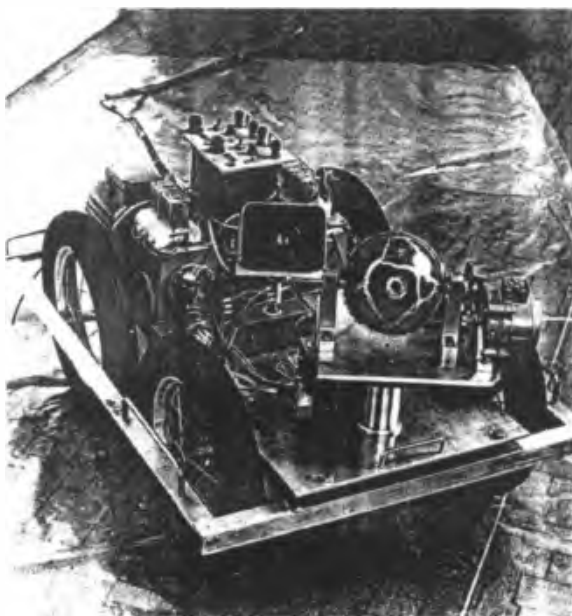


Рис. 2.29. Дистанционно-управляемый комплекс с коллимированным гамма — детектором, применявшийся для определения количества топлива в районе схемы «Е» (центральный зал)

При этом сами авторы считают, что последний вывод предпочтителен.

Коллектив этих специалистов провел измерения и в бассейне-барботере, оценив количество топлива, находящегося в основных скоплениях ТСМ [2.23].

Накопление и систематизация данных о местах расположения основных скоплений ТСМ и количества топлива, находящегося в различных помещениях «Укрытия», велась постоянно. В этой работе сыграли большую роль исследования, проводившиеся в объекте группой ВНИПИЭТ (совместно со специалистами КЭ) в 1988–1990 гг. Основная цель этих исследований состояла в обследовании состояния строительных конструкций и паспортизации помещений, в которые удавалось проникнуть разведывательным группам. В ходе обследования определялась радиационная обстановка, границы расположения скоплений ТСМ, производилась фото- и видеосъемка [2.24].

2.14. Исследовательская система диагностики «Финиш» (см. [2.25, 2.26])

Уже говорилось о том, что в ходе работ по исследованию внутренних помещений «Укрытия» создавалась оперативная система диагностики ОГ. Она получила название «Финиш». Показания ее детекторов существенным образом дополняли и позволяли контролировать работу ИДК «Шатер».

Формирование системы шло следующим образом. После обнаружения скопления ТСМ, рядом с ним, большей частью через скважины, устанавливались «сторожевые» детекторы. Они измеряли мощность дозы гамма-излучения, величину потока нейтронов, температуру, тепловые потоки. Показания этих детекторов выводились на центральный пульт и длительное время (месяцы) анализировались. Убедившись в исправности и информативности канала (система питания → детектор → предусилитель → распределительный шкаф → кабельные коммуникации → центральный пульт), канал переводили в режим стационарного измерения, и он официально входил в систему диагностики.

Каналы этой системы позволяли осуществлять реальный контроль состояния топливосодержащих материалов.

В то же время они первоначально рассматривались как чисто исследовательские и вводились в строй без соответствующей проектной документации и аттестации.

Сбор и первоначальная обработка информации осуществлялись на пульте, установленном в одном из очищенных и оборудованных помещений деаэрационной этажерки 4-го блока (рис. 2.30). Затем информация передавалась в лабораторный корпус в г. Чернобыль.

К 1990 г. в системе устойчиво работали 18 датчиков теплового потока, 30 датчиков температуры, 5 датчиков плотности потока нейтронов и 6 датчиков МЭД. С момента начала работы системы «Финиш» в 1987 г. она регистрировала постепенное падение всех измеряемых параметров (см., например, графики на рис. 2.31).



Рис. 2.30. Дежурная смена операторов проводит измерения на пульте системы «Финиш» в пом. Г359.

В течение 1987–1990 гг. данные системы «Финиш» ежедневно поступали в Москву, в Главинформбюро при Совете Министров СССР.

2.15. Техническое обоснование ядерной безопасности объекта «Укрытие» (см. [2.27])

В 1990 г. по поручению Госатомнадзора СССР Курчатовский институт выпустил отчет – «Техническое обоснование ядерной безопасности объекта «Укрытие» (ТОЯБ). Он стал первым и общепризнанным документом, описывающим текущее состояние «Укрытия» и оценивающим потенциальную опасность находящегося в нем ядерного топлива (см. рис. 2.32).

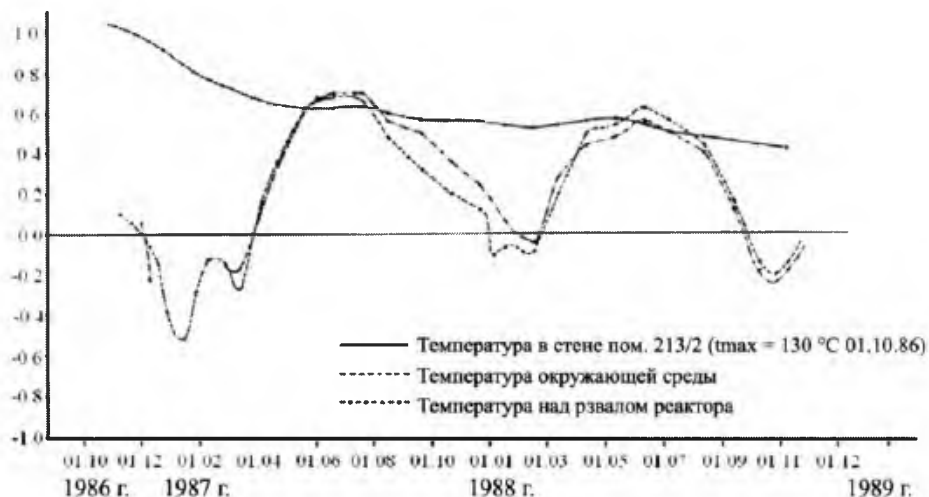


Рис. 2.31. Результаты долговременных измерений температуры над развалом реактора и в «горячей» точке во внутреннем помещении «Укрытия» (относительные величины)

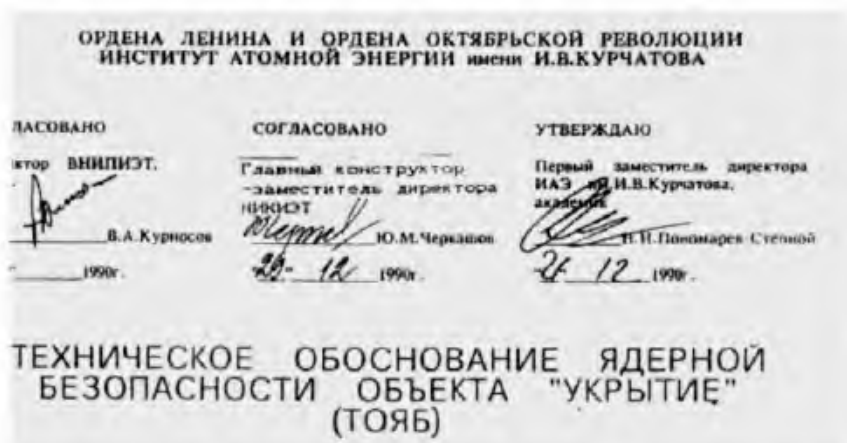


Рис. 2.32. Фрагмент первой страницы ТОЯБ

В первой части этого документа были суммированы результаты работ КЭ, полученные при проведении исследований на объекте «Укрытие» и данные расчетов, выполненных в обеспечение этих исследований.

Приводятся подробные характеристики состава и активности выгоревшего топлива 4-го блока, полученные специалистами Курчатовского института с помощью разработанных ими расчетных программ [2.28, 2.29], а также динамика поведения основных параметров топлива (см., например, рис. 2.33).

Далее в ТОЯБ приводятся существовавшие на этот момент оценки количества топлива в помещениях «Укрытия» (см. таблицу 2.1).

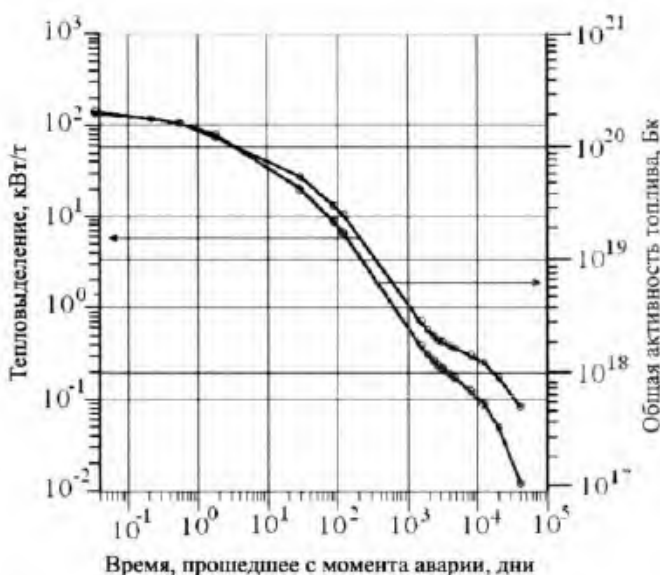


Рис. 2.33. Зависимость изменения удельного тепловыделения топлива 4-го энергоблока и его общей активности от времени, прошедшего после аварии

Таблица 2.1. Оценка количества топлива (по урану) на нижних отметках «Укрытия»

Наименование помещения	Отметка	Масса топлива (т)
1-ый этаж бассейна-барботера	0.000	$1,5 \pm 0,5$
2-ой этаж бассейна-барботера	+ 3.000	11 ± 3
Парораспределительный коридор	+ 6.000	23 ± 8
Подапаратное помещение 305/2	+ 9.000	75 ± 25
Коридоры и помещения, залитые лавой на отметке + 9.000	+ 9.000	20 ± 5
Прочие скопления ТСМ	От 0.000 до + 9.000	4 ± 1
<i>Общее количество</i>		<i>135 ± 30</i>

Описываются модификации ТСМ, их физико-химические свойства и расположение основных скоплений.

Центральная часть работы – анализ ядерной безопасности объекта «Укрытие».

Приведем некоторые выводы ТОЯБ, связанные с этой проблемой.

«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)».

Надо отметить, 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.

Оценки критичности смесей, состоящих из лавообразных ТСМ и воды, показали, что при исследованном составе лавы K_{∞} всегда меньше 1⁹ (см. рис. 2.34).

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

⁹Опять-таки, по результатам, полученным только для поверхностных образцов.

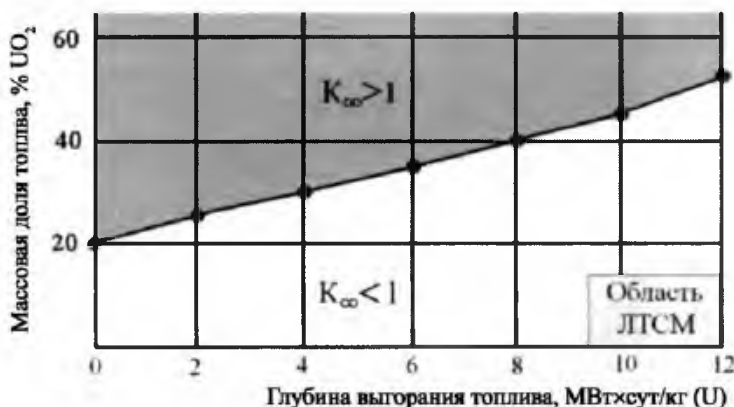


Рис. 2.34. Зависимость коэффициента размножения нейтронов K_{∞} от содержания урана и выгорания топлива в системе (ЛТСМ + вода)

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, которые в будущем должны были привести к понижению подкритичности топливных скоплений и пересмотру выводов о ядерной безопасности объекта.

2.16. Работы в «Укрытии» (см. [2.30, 2.31])

При работе внутри объекта «Укрытие» у членов ОГ, а затем сотрудников КЭ ощущалась острая необходимость в дистанционных средствах разведки и диагностики. Первые такие средства начали создавать из подручных механизмов и материалов. Так, неожиданно, определенную пользу принес детский танк, переоборудованный в «робота-разведчика» (рис. 2.35).

«Танк был пластмассовый, величиной с небольшой телефонный аппарат, имел гусеницы и длинный кабель, идущий к пульта управления. По этому кабелю шло питание от батарейки на пульте к электромоторчику на танке и сигналы управления.

Танк с помощью гусениц мог ехать вперед и назад, разворачиваться и тарыхтеть, имитируя стрельбу. Последнее свойство на блоке не пригодилось, а остальные были использованы в полной мере.

Его переоборудовали: заменили кабель на более длинный (около 10 м) и многожильный, поставили наверх дозиметр, измеритель температуры и закрепили сильный фонарь. Теперь танк не только двигался, но и проводил примитивную дозиметрическую и тепловую разведку, и, вообще, представлял собой своеобразную «охотничью собаку», которая могла бежать на поводке перед «охотниками», при обследовании блока и предупреждать



Рис. 2.35. Детский танк, переоборудованный в «робота-разведчика»

об опасности. Несмотря на свои весьма ограниченные возможности, он с честью выполнял работу и относительно легко отмывался от радиоактивности. Танк «дожил» до весны 1987 г., после чего, уже не подлежал дезактивации и был захоронен на блоке» [2.1].

Наряду с изготовлением «самодельных» роботов предпринимались попытки использовать готовые механизмы (в том числе и дорогие зарубежные, см. [2.1]). Однако после испытаний ото всех предложенных устройств пришлось отказаться. Три их недостатка оказались решающими.

- Они не могли преодолеть разрушенные конструкции и застревали; в результате операторы были вынуждены вытаскивать их на руках.
- При попадании в большие радиационные поля в электронных схемах возникали помехи, которые делали механизмы неуправляемыми.
- В условиях, когда движение робота практически всегда сопровождалось подъемом радиоактивной пыли, дезактивация большинства механизмов представляла значительные трудности и приводила к недопустимому облучению персонала.

К концу 1989 г., когда значительная часть информации о состоянии конструкций внутри «Укрытия», местоположении и физико-химических свойствах ТСМ была получена с помощью скважин и других, описанных выше методов, для исследования оставшихся недоступными помещений, в Курчатовском институте было решено приступить к разработке специальных дистанционно-управляемых систем (ДУС). Работу эту возглавил С.С. Абалин.

В составе КЭ в 1990 г. была организована специальная лаборатория¹⁰. В ней началось создание семейства ДУС, которые могли бы эффективно использоваться для разведки и дезактивации в условиях объекта «Укрытие» (рис. 2.36).

¹⁰Позднее, после создания МНТЦ «Укрытие», она была преобразована в Отдел дистанционных комплексов и технологий (ОДКТ) Отделения ядерной и радиационной безопасности (см. ниже).



Рис. 2.36. Лаборатория дистанционных комплексов и технологий

Были сформулированы основные специальные требования к создаваемым механизмам.

- В исполнительном механизме необходимо было использовать электромоторы, реле и т.п. детали, не чувствительные к высоким радиационным полям. Энергопитание и сигналы управления могли поступать к ДУС по кабелю, соединяющему его с пультом управления. Пульт должен был располагаться в обслуживаемом помещении.

- ДУС должна обладать высокой проходимостью и небольшими размерами для работы в разрушенных помещениях.

- Желательно, чтобы все виды ДУС были установлены на унифицированной тележке (платформе).

- Из-за большого количества радиоактивной пыли в помещениях объекта в конструкции исполнительного механизма необходимо предусмотреть возможность его высокоэффективной и многократной дезактивации.

- В помещениях «Укрытия» наблюдается высокая влажность. Поэтому должна быть выполнена герметизация блоков и частей ДУС, для которых нежелательно попадание воды.

- Для выполнения особо сложных заданий надо предусмотреть возможность использование группы ДУС, состоящей как из «исполнителей», непосредственно выполняющих работу, так и специальных «наблюдателей», с помощью которых оператор наблюдает и корректирует действия «исполнителей», ведет фото- и телесъемку.

Кроме этих требований должны были выполняться и обычные — максимальная простота, надежность, простота ремонта, доступная стоимость и т.п.

В первую очередь были разработаны ДУС, оснащенные системой пылеподавления (они проникали в помещения блока и осаждали радиоак-



Рис. 2.37. Испытание робота на полигоне в г. Чернобыль

тивную пыль с помощью специальных составов), разведывательные (для ведения фото- и видеосъемки, отбора проб ТСМ и аэрозолей), наконец, семейство ДУС различного функционального назначения для подготовительных и монтажных работ.

Для их предварительных испытаний и обучения операторов в г. Чернобыль около лабораторного корпуса КЭ был оборудован специальный полигон (рис. 2.37).

Базой для создания ДУС, работавших на объекте «Укрытие» послужило конструирование и изготовление нескольких разновидностей самоходных платформ, способных передвигаться в условиях объекта «Укрытие» и нести на себе самое разное оборудование (см. рис. 2.38).

Благодаря специальному профилю колес и оригинальной подвеске ходовых узлов, платформы имели повышенную проходимость и маневренность, могли преодолевать различные препятствия в виде громоздких предметов или завалов, разворачиваться на месте и даже передвигаться по лестничным маршам (рис. 2.39).



Рис. 2.38. Различные виды самоходных платформ («тележек»), на которых устанавливались рабочие устройства



Рис. 2.39. «Тележка» поднимается по ступеням лестницы



Рис. 2.40. TP-4 в транспортном положении, поднята только телекамера (она также может быть сложена)

Вот некоторые параметры платформ: вес от 30 до 50 кг, грузоподъемность от 50 до 100 кг, скорость от 0,6 до 2,5 м/мин, длина кабеля управления — 50 м.

С использованием этих платформ были созданы самые различные ДУС.

В качестве примера приведем разработанную к концу 1990 года дистанционно-управляемую буровую установку с глубиной отбора проб до 600 мм — TP-4 (см. рис. 2.40 и 2.41).

Установка обеспечивала процесс бурения без использования промывочных жидкостей, чтобы не допустить вымывания фрагментов из образцов. Ее буровая головка могла придавать инструменту как вращательное, так и ударное перемещение.



Рис. 2.41. Отбор проб на испытательном полигоне. Буровая установка работает в вертикальном положении. Наблюдение за бурением ведется с помощью телекамеры



Специальный механизм поддерживал постоянство давления на забой в процессе бурения.

Буровым инструментом являлся полый шнек (винтовая трубка) длиной 750 мм, на конце которого находилась буровая коронка.

Внутри шнека находилось грунтозаборное устройство, которое заполнялось фрагментами породы по мере внедрения шнека в материал. Отбираемый керн автоматически помещался в специальный чехол из армированной ткани. При включении механизма выгрузки этот чулок с кернами вытягивался из шнека и наматывался на приемный барабан. Таким образом сохранялась последовательность слоев извлекаемых материалов, даже если они были сыпучими.

Летом 1991 года в пом. 318/2 было закончено оборудование пультной операторов, и началась эксплуатация ТР-4 на блоке.

После нескольких пробных бурений в пом. 308/2 установка переместилась в коридор 301/5, находящийся с юга от реактора, куда после аварии вытек один из основных потоков лавы — горизонтальный поток. Мощность дозы в этом помещении составляла несколько десятков Р/ч.

Контролируя движение и работу ТР-4 как с помощью собственной телекамеры, так и телекамерой, установленной на другой ДУС (ТР-2), было проведено бурение и отбор проб в различных местах этого помещения.

При этом бур проходил бетон, попавший сюда при строительстве «Укрытия», весь пласт лавы и углублялся в доаварийный бетон (пол) помещения (рис. 2.42).

Анализ процесса бурения и полученных кернов показал, что доаварийный бетон пола помещения был прожжен и представлял собой частично спекшуюся сыпучую массу, содержащую ЛТСМ [2.11].

Были сконструированы и работали в «Укрытии» ДУС, использующие специфические свойства объекта. Например, то, что стены и потолок ряда помещений 4-го блока были плакированы сталью. Здесь было применено устройство, названное «Магнитоходом».

Его ходовые узлы содержали мощные самарий-кобальтовые магниты. Они позволяли «Магнитоходу» двигаться по стальному покрытию верти-



Рис. 2.42. Схема работ по исследованию ЛТСМ и бетона в коридоре 301/5 с помощью ТР-4 и ТР-2



Рис. 2.43. Магнитоход на северной каскадной стене «Укрытия»

кальных стен и потолка и нести на себе значительный груз. Сдвоенные колесные блоки увеличивали надежность зацепления при преодолении сварных швов и фрагментов немагнитных покрытий (рис. 2.43).

Благодаря использованию ДУС, удалось провести на «Укрытии» целый ряд работ с минимальными дозовыми затратами для персонала.

2.17. Еще о важных работах, начатых КЭ

После проведения КЭ описанных выше исследований и создания ТОЯБ стало ясно, что ядерная опасность «Укрытия» в сложившейся к 1990 г. ситуации не вызывает опасений, которые высказывала часть специалистов и членов ПК.

Вместе с тем, другая опасность — радиационная, оставалась достаточно актуальной.

Чем дальше продвигались исследования «Укрытия», тем большие опасения вызывала возможность обрушения части его конструкций. Особенно при экстремальных внешних воздействиях, например землетрясении¹¹. Такое обрушение могло вызвать выброс радиоактивной пыли через неплотности на верхних отметках объекта¹². Это привело бы к загрязнению

¹¹30 и 31 мая 1990 г. в районе ЧАЭС произошло землетрясение силой 3,5–4 балла. Специалистами КЭ было произведено обследование «Укрытия». Было отмечено обрушение нескольких бетонных обломков, но изменения положения и заметного ухудшения состояния основных строительных конструкций зафиксировано не было. В то же время следовало учитывать, что вероятность 5-ти бального землетрясения в этом районе также достаточно велика (10^{-2} событий в год).

¹²К этому времени (1989 г.) была оценена общая площадь щелей на верхних отметках «Укрытия». Она составляла $\sim 1000 \text{ м}^2$.

площадки станции, помещений трех действующих блоков, многочисленных вспомогательных сооружений, к переоблучению работающих людей.

Поэтому, наряду с изучением разрушенного блока, поисками топлива, определением физико-химических свойств и потенциальной опасности скоплений ТСМ, в 1989–90 гг. КЭ начала проведение большой исследовательской программы, ставящей своей целью исследование влияния «Укрытия» на окружающую среду в условиях нормальной эксплуатации объекта и выработке контрмер в случае возникновения аварийных ситуаций.

В рамках этой программы изучались динамика выброса радиоактивности из щелей и неплотностей объекта, динамика концентрации радиоактивных аэрозолей в его локальной зоне, вклад «Укрытия» в загрязненность грунтовых вод (программа «Ареал») [2.32].

Обзор и анализ результатов этих многолетних исследований будет приведен в следующей главе настоящей работы.

В 1989г. научное руководство КЭ, считая необходимым сделать «Укрытие» полностью безопасным, выступило с предложением о создании «Укрытия-2» [2.33]. В этом предложении предлагалось возвести над существующим объектом герметичное и прочное сооружение, которое могло бы простоять многие десятилетия. А со временем создать технологии и под защитой «Укрытия-2» разобрать разрушенный блок, вывезти и захоронить топливо.

Это предложение нашло поддержку у руководства Минсредмаша и НАН Украины и *стало началом работы по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему.*

Работа эта еще не закончена и ее основные этапы, выполненные в 1989–2011 гг. также будут описаны ниже.

ЛИТЕРАТУРА к 2 главе

- 2.1. Боровой А.А. Мой Чернобыль. Новый мир № 3, 1996 г.; с. 132–180.
- 2.2. 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.
- 2.3. 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.
- 2.4. 20 лет участку буровых работ, <http://new.chnpp.gov.ua/news.php?lng=ru&id=6>
- 2.5. 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.
- 2.6. Боровой А.А., Лапшин Л.М., Янгулов 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.

- 2.7. 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.
- 2.8. Богатов С.А., Боровой А.А., Гаврилов С.Л., Лагуненко А.С. и др. База данных по местонахождению и состоянию ядерного топлива 4-го блока ЧАЭС до и после аварии. Препринт РНЦ «Курчатовский институт», № 130-11/2, Москва 2007 г., 146 с.
- 2.9. Borovoi A.A. Analytical Report (Post-Accident Management of Destroyed Fuel from Chernobyl), IAEA, Work Material, 1990, p. 1–99.
- 2.10. 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.
- 2.11. 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.
- 2.12. 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.
- 2.13. 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.
- 2.14. 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.
- 2.15. Лебедев Г.В., Шикалов В.Ф. Измерение подкритичности топливосодержащих масс объекта «Укрытие». Препринт РНЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-5876/5, Москва, 1995, 44 с.
- 2.16. Абалин С.С., Беляев С.Т., Боровой А.А. и др. Диагностические исследования аварийного реактора ЧАЭС. Атомная энергия, т. 68, вып. 5, 1990, стр. 355–359.
- 2.17. Богатов С.А., Лебедева Л.И., Левина Л.А. и др. Физико-химические характеристики радиоактивных аэрозолей во внутренних помещениях «Саркофага». Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова, № ИАЭ-5435/3, Москва, 1991, 24 с.
- 2.18. Богатов С.А., Боровой А.А. О некоторых свойствах топливосодержащих частиц, образовавшихся при аварии на Чернобыльской АЭС, и особенностях формирования топливного выброса. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова, № ИАЭ-5444/3, Москва, 1991. 30 с.
- 2.19. 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.
- 2.20. Боровой А.А., Огородник С.С., Попов В.Д. и др. Уточнение оценка количества ядерного топлива, находящегося в помещении ПРК объекта «Укрытие». Отчет КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова. № 11.07-06/188 от 28.12.89, Чернобыль, 25 с.
- 2.21. 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.
- 2.22. Душин В.Н., Петров Б.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 № 1732 И от 15.02.1992 г., Ленинград 53 с.
- 2.23. Абдулахатов М.А., Арутюнян Р.В., Большов Л.А. и др. Послеаварийное обследование бассейна-барботера 4-го энергоблока ЧАЭС. Материалы Первой Международной рабочей группы по тяжелым авариям и их последствиям, 30 октября – 3 ноября 1989, Дагомыс, Сочи, М., «Наука», 1990, с. 101–111.
- 2.24. Исследование расположения топливосодержащих масс, состояния помещений и систематизация данных по помещениям объекта «Укрытие». Отчет ВНИПИЭТ № 2669 от 10.12.1990 г., Ленинград, 266 с.
- 2.25. Боровой А.А., Огородник С.С., Попов В.Д. Результаты радиационных и тепловых измерений, выполненных на объекте «Укрытие» реактора № 4 ЧАЭС в 1989 г. Отчет КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова 11.07-06/189, от 28.12.89, Чернобыль, 38 с.
- 2.26. Высоцкий Е.Д. ИИС «Финиш». Отчет КЭ при ИАЭ им. И.В. Курчатова 11.07/310, Чернобыль, 1991 г., 65 с.
- 2.27. Беляев С.Т., Боровой А.А., Волков В.Г. и др. Техническое обоснование ядерной безопасности объекта «Укрытие». Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1990 г., 160 с.
- 2.28. 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.
- 2.29. Бегичев С.Н., Боровой А.А., Бурлаков Е.В. и др. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС. (Краткий справочник). Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова 5268/3, 1990 г., 21 с.
- 2.30. 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.
- 2.31. Боровой А.А., Иванов А.И. Диагностические роботы на 4 блоке Чернобыльской АЭС. Препринт АН Украины, Ин-т кибернетики им. В.Н.Глушкова, Киев, 1993, 13 с.
- 2.32. Боровой А.А., Евстратенко А.С., Криницын А.П. и др. Динамика радиационной обстановки на объекте «Укрытие». В сборнике «Объект «Укрытие» – 10 лет», основные результаты научных исследований», Национальная Академия Наук Украины, Чернобыль 1996 г., стр. 100–111.
- 2.33. Беляев С.Т., Боровой А.А. О преобразовании объекта «Укрытие». Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова № 57-05/110 от 29.09.89 г., 5 с.

3. РАБОТЫ ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МНТЦ «УКРЫТИЕ» И ЛАБОРАТОРИИ ПРОБЛЕМ ЧЕРНОБЫЛЯ КУРЧАТОВСКОГО ИНСТИТУТА (1992–2010 гг.)

3.1. Создание МНТЦ «Укрытие»

В 1991 г. чернобыльская зона, ЧАЭС и объект «Укрытие» перешли под юрисдикцию Украины. Встал вопрос о приемнике КЭ и продолжении работы российских специалистов на объекте «Укрытие» и ЧАЭС.

После обсуждения этого вопроса дирекция Курчатовского института совместно с Президиумом НАНУ выдвинули предложение о создании в Чернобыле научного центра, в который ежегодно командировались бы сотрудники Курчатовского института для работы, связанной с безопасностью объекта «Укрытие».

Это предложение было принято, и 4 февраля 1992 г. вышло Постановление Кабинета Министров Украины о создании на базе КЭ, Института ядерных исследований НАНУ, Всесоюзного Объединения ВНИПИЭТ – Межотраслевого Научно-технического Центра «Укрытие» (МНТЦ) при НАНУ. Основной задачей центра стало проведение научных и проектных работ по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему. На МНТЦ возлагалось также выполнение ряда НИР в Зоне.

Согласно подписанному Е.П. Велиховым и Б.Е. Патоном «Соглашению» между НАНУ и Курчатовским институтом, последний принял на себя научное руководство Отделением ядерной и радиационной безопасности (ОЯРБ) МНТЦ.

Директором ОЯРБ и заместителем генерального директора МНТЦ по науке был назначен сотрудник Курчатовского института доктор ф-м. наук А.А. Боровой. В дальнейшем должность директора ОЯРБ занимали А.И. Иванов и В.А. Краснов.

Соответственно, в Курчатовском институте был образован Отдел методов и технологий радиационных исследований (ОМТРИ), сотрудники которого командировались в Чернобыль и работали на московской площадке, осуществляя научно-техническую поддержку МНТЦ «Укрытие». Позднее (в 2007 г.) этот отдел был преобразован в Лабораторию проблем Чернобыля (ЛПЧ).

Для работы ОМТРИ руководство Курчатовского института наметило два основных направления.

Первое – обеспечение текущей безопасности объекта «Укрытие».

Второе – выработка и научное сопровождение мероприятий по преобразованию «Укрытия» в экологически безопасную систему.

3.2. Текущая безопасность

3.2.1. Исследования по текущей безопасности «Укрытия», проводимые специалистами Курчатовского института

Специалисты Курчатовского института совместно с другими сотрудниками МНТЦ (ИПБ АЭС) и персоналом ЧАЭС, проводили на «Укрытии» исследования, которые (достаточно условно) можно разделить на два типа.

Первый тип включал в себя постоянный контроль процессов, уже изучавшихся ранее, мониторинг их основных параметров.

На рис. 3.1 представлен перечень таких контролируемых процессов, происходящих внутри и вне объекта.

Ко второму типу относились работы, выполняемые по специальным программам и направленные на дальнейшее, более глубокое изучение объекта «Укрытие» и подготовки его преобразования.

Главные направления контроля для обеспечения текущей безопасности «Укрытия»:

контроль параметров топливосодержащих материалов (особое внимание уделялось скоплениям ТСМ, которые могли представлять потенциальную ядерную и радиационную опасность);

контроль состояния скоплений воды и аэрозолей внутри объекта;

контроль параметров радиоактивных аэрозолей, выбрасываемых из «Укрытия» в окружающую среду (организованные и неорганизованные выбросы);

контроль загрязненности воздуха и грунтовых вод в локальной зоне объекта.

Основные результаты многолетних исследований изложены в десятках работ (см., например, [3.1–3.9]). В настоящем обзоре, приводится только несколько примеров полученных данных и их анализ.

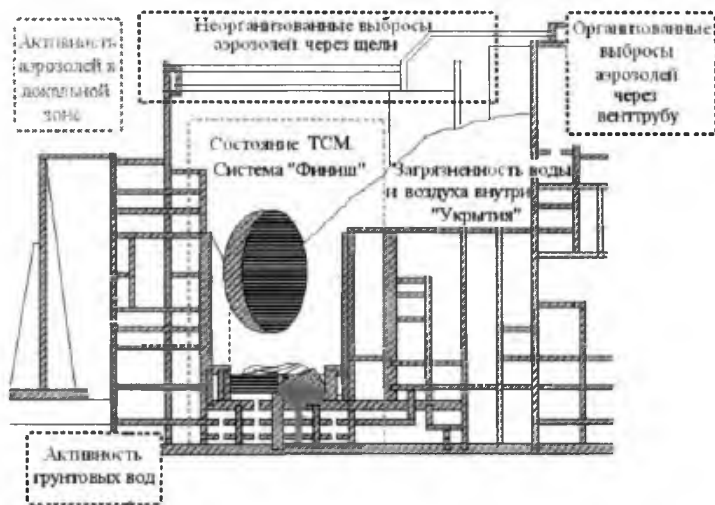


Рис. 3.1. Контролируемые параметры объекта «Укрытие». Системы контроля были созданы и эксплуатировались при участии сотрудников Курчатовского института

3.2.2. Состояние скоплений ТСМ внутри объекта

Как говорилось выше, в течение многих лет основная информация о ТСМ поступала от системы «Финиш», созданной КЭ и постоянно расширяемой и модернизируемой ОЯРБ МНТЦ (под руководством Курчатовского института). Сначала эта система имела статус исследовательской. Затем, после метрологической аттестации части измерительных каналов и технических средств, они стали использоваться в штатном режиме. В 1998 г. из системы был выделен комплекс «Финиш-Р» и передан в эксплуатацию ГСП ЧАЭС.

Состав «Финиша» менялся (см. раздел 2.14), но к середине 90-х годов он стабилизировался и состоял из 50–60 каналов. Среди них: 8 каналов контроля мощности экспозиционной дозы; 8 каналов контроля плотности нейтронного потока; 10–12 каналов контроля теплового потока; около 30 каналов контроля температуры.

Остальные ~30 каналов находились в резерве.

Нейтронные каналы контролировали плотность нейтронных потоков в помещениях парораспределительного коридора, в реакторном пространстве, в подаппаратном помещении и в пом. 304/3.

γ -каналы контролировали мощность экспозиционной дозы в подаппаратном помещении, центральном зале, реакторном пространстве и южном бассейне выдержки отработанного топлива.

Контроль по температуре велся во многих подреакторных помещениях и ЦЗ.

Что можно сказать о поведении скоплений ТСМ за этот период?

За прошедшие более 20 лет топливосодержащие материалы, находящиеся в «Укрытии», подвергались самым разнообразным воздействиям. Например, в 1993 г. и в 2000 г. в объект в течение одной-двух недель попадало количество воды равное многомесячной норме. В 1987–89 гг. и позднее, в 2003–2008 гг., внутри объекта проводились крупные строительно-монтажные работы, которые сопровождались сотрясениями здания.

Летом 1990 г. «Укрытие» подверглось воздействию 4-х балльного землетрясения и т.п.

В целом скопления ТСМ вели себя, в основном, спокойно и предсказуемо.

Динамика изменения температуры в центральном зале и в реакторном пространстве соответствовала характеру изменения наружной температуры. Во внутренних, подреакторных помещениях температура во многом определялась температурой ТСМ. Максимальная температура ~40 °С регистрировалась в подреакторной плите.

Эти годы динамика нейтронной активности для ТСМ в стабильном состоянии определялась, в основном, нейтронами спонтанного деления Sm^{244} ($T_a = 18$ лет). На это накладывались потоки нейтронов от (α , n) реакций и флуктуации сезонного характера, обусловленные изменениями температуры и влажности. В соответствии с этим годовой спад активности выражался незначительным (~2%) трендом на понижение.

С начала 90-х годов полная величина МЭД, в основном, определялась мощностью дозы, которую создает изотоп ^{137}Cs , и медленно спадала.

Для иллюстрации вышесказанного на рис. 3.2 приведена динамика изменения параметров состояния ТСМ за 2000 г., полученная системой «Финиш-Р».

Как отмечалось, ТСМ в основном вели себя предсказуемо.

Но трижды — один раз в 1990 г. и дважды в 1996 г., наблюдалось увеличение счета в нейтронных каналах, которое не удалось объяснить только аппаратурными эффектами. Такие события получили название «аномальные нейтронные события». Все они были связаны с 304/3 и 305/2 помещениями блока.

Хотя «аномальные» события 1990 и 1996 гг. остались до конца не объясненными, консервативный подход к вопросам ядерной безопасности заставляет предполагать, что они могли свидетельствовать о повышении коэффициента размножения нейтронов в скоплениях топлива при попадании в них воды от природных осадков.

3.2.3. Опасность скоплений воды внутри объекта.

Вода, поступающая в объект «Укрытие» является источником нескольких видов опасности [3.1, 3.9].

Основные из них три:

- попадая на скопления ТСМ, она приводит к увеличению эффективного коэффициента размножения нейтронов в системе;
- вода разрушает ТСМ и способствует неконтролируемому перемещению радиоактивности по внутренним помещениям и выносу радионуклидов за пределы «Укрытия»;
- перенося растворенные соли обогащенного урана, вода может увеличивать потенциальную ядерную опасность объекта.

Одновременно вода способствует разрушению строительных конструкций «Укрытия».

Кроме этих «непосредственных» воздействий на состояние объекта, вода оказывает и негативное косвенное влияние. Она нарушает нормальную работу диагностических систем, препятствует проведению исследований по повышению безопасности объекта, превращает в особо опасные (с точки зрения электробезопасности) помещения «Укрытия» и т.п.

Протекая через помещения «Укрытия», потоки воды собираются в нижних помещениях, как бы «опрашивая» многие, в том числе, и недоступные сейчас контролю скопления топлива. Поэтому вода может нести важную информацию о состоянии этих скоплений.

Она, например, может стать индикатором при нарастании процессов разрушения ТСМ.

Все эти причины привели к тому, что исследованиям воды, находящейся в объекте уделялось много внимания.

Они начали проводиться КЭ с весны 1991 г. В дальнейшем это стало одной из задач ОЯРБ МНТЦ (ИПБ АЭС) (рис. 3.3).

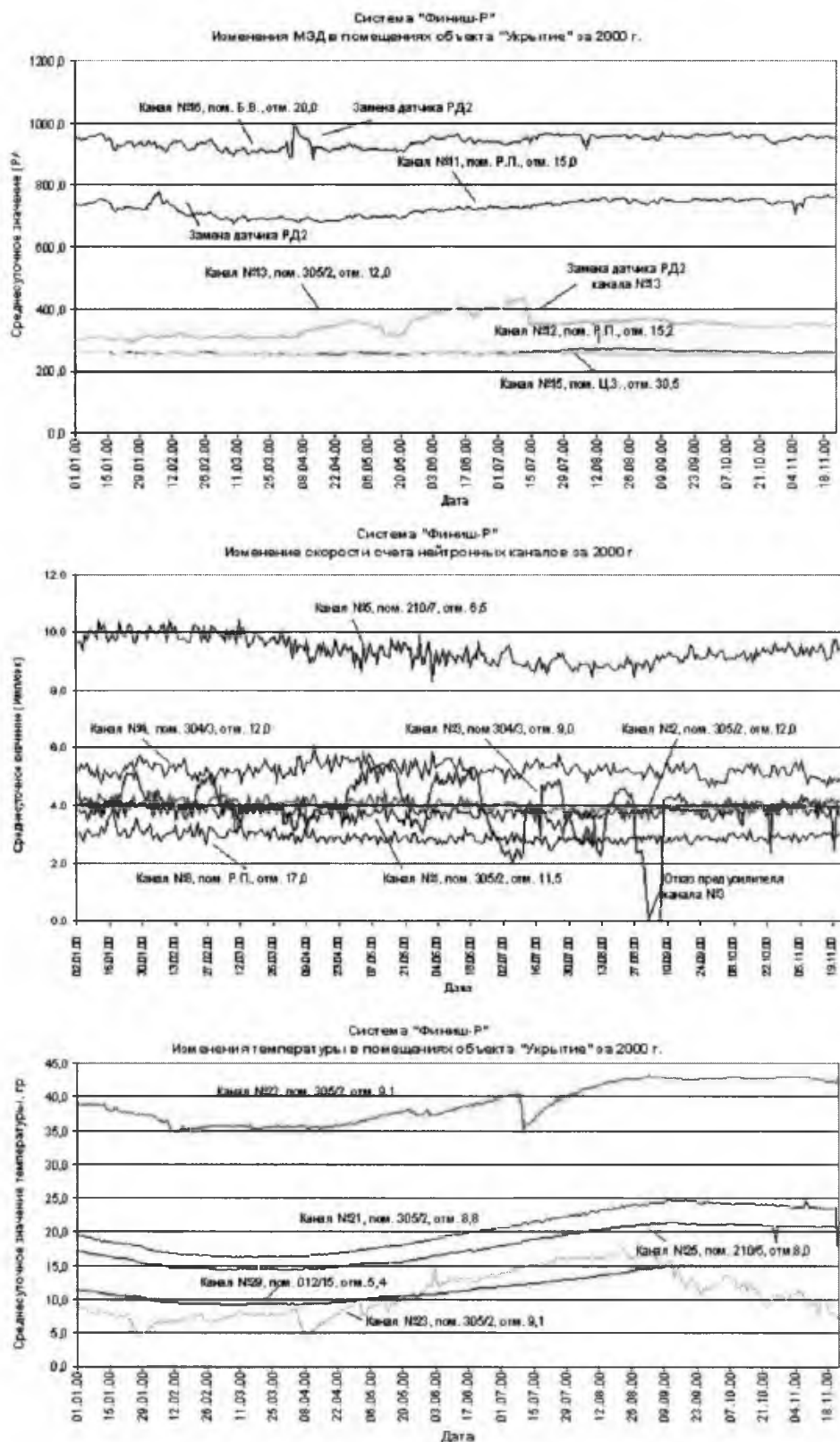


Рис. 3.2. Динамика параметров, измеряемых системой «Финиш-Р» за 2000 г.



Рис. 3.3. Отбор проб воды в одном из помещений бассейна-барботера

Исследования ставили своей целью изучение источников поступления и путей миграции (водопотоков) воды внутри объекта, динамики уровней и объемов водных скоплений. Проводился отбор и лабораторные исследования проб воды и донных отложений (спектрометрический, радиохимический, элементный и другие виды анализов).

Кроме того, для изучения путей распространения и стока воды был проведен цикл экспериментов с использованием трассеров [3.10]. В скопление вводилось специальное вещество — трассер (индикатор), который можно было относительно легко обнаружить в других скоплениях, расположенных по ходу распространения потока воды.

Так было показано, что удаление воды из помещений объекта «Укрытие» в основном происходит путем испарения в осенне-зимний период и в результате неорганизованных протечек на 3-ий блок.

На протяжении всех прошедших лет и до проведения масштабных работ по стабилизации строительных конструкций объекта (см. ниже), ежегодное поступление воды в «Укрытие» определялось такими факторами, как погодные условия и постепенное уменьшение тепловыделения ядерного топлива.

Эти два фактора определяли интенсивность главных источников воды — попадающих в объект осадков и образующегося в его помещениях конденсата.

Третий источник — технологическая вода, поступающая в «Укрытие» при работе системы пылеподавления, играл существенно меньшую роль.

После проведения работ по герметизации кровли «Укрытия» и начала дополнительного обогрева воздуха в помещениях объекта количество конденсационной влаги заметно уменьшилось.

В связи с этим определяющим для количества воды в объекте стало поступление внешней влаги.

В последние годы (2006–2010 гг.) баланс поступления воды оценивался следующим образом.

- Атмосферные осадки – $\leq 1800 \text{ м}^3/\text{год}^1$.
- Конденсационная влага – $\leq 500 \text{ м}^3/\text{год}^2$.
- Вода от растворов системы пылеподавления – от 200 до $400 \text{ м}^3/\text{год}$.

В результате обследования помещений было выяснено, что постоянные скопления воды в основном образуются на отметках ниже +12.500 и их общий объем составляет $\leq 500 \text{ м}^3$. На более высоких отметках (до +39.500) могут образовываться временные небольшие скопления объемами меньшими 50 л.

Наибольшее в «Укрытии» водное скопление находится в пом. 001/3 под каскадной стеной (рис. 3.4).

Оно формируется из протечек низкоактивной жидкости со стороны каскадной стены ($\sim 600 \text{ м}^3/\text{год}$), среднеактивной – из бассейна-барботера ($\sim 90 \text{ м}^3/\text{год}$) и других помещений блока ($\sim 18 \text{ м}^3/\text{год}$).

Средний (за последние годы) объем воды в пом. 001/3 составляет $\sim 300 \text{ м}^3$, а донных отложений (песок, бетонная крошка, ил и т. п.) – около 100 м^3 (рис. 3.5).

Исследования показали, что общее количество радионуклидов и делящихся веществ, находящихся во всех скоплениях воды, составляет незначительную часть ото всех сосредоточенных в «Укрытии». Например, в описываемом наиболее крупном скоплении (пом. 001/3) содержится менее 3×10^{-5} части от ^{137}Cs , оставшегося в объекте.

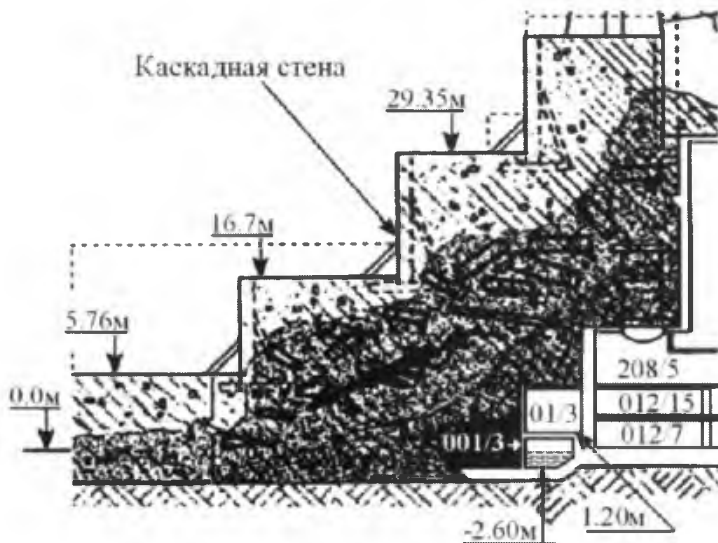


Рис. 3.4. Расположение пом. 001/3 и каскадной стены (разрез)

¹Этот верхний предел поступления атмосферных осадков в помещения реакторного блока и ВСРО ($1800 \text{ м}^3/\text{год}$) получен с учетом площади проекции кровли над этими помещениями (около 2600 м^2) и максимальной интенсивности атмосферных осадков ($690 \text{ мм}/\text{год}$).

²Количественная оценка объема конденсационной влаги во всех помещениях объекта «Укрытие» в настоящее время может быть сделана только по порядку величины. Такая оценка и дала значение $\leq 500 \text{ м}^3/\text{год}$.



Рис. 3.5. Схема расположения раствора и донных отложений в пом. 001/3

Поэтому, связываемая с потоками воды опасность неконтролируемого перемещения радиоактивности по внутренним помещениям «Укрытия» относительно мала.

Результаты многолетних наблюдений за содержанием в блочной воде пом. 001/3 ядерноопасных плутония и урана представлены на рис. 3.6.

Из рисунка видно, что за этот период концентрация Pu, в среднем, возрастала. Что касается концентрации U, то можно говорить, скорее, о волнообразном ее поведении.

Абсолютное значение концентрации U в растворе составляет десятки мг/л, что на много порядков меньше ядерноопасных значений [3.11].

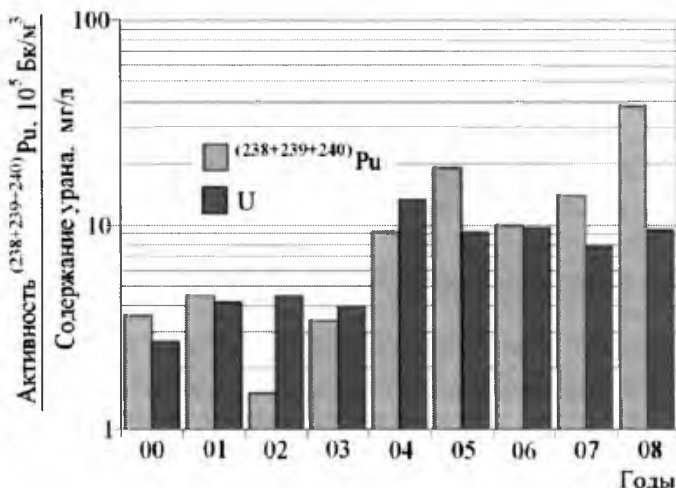


Рис. 3.6. Результаты наблюдений за содержанием в блочной воде (в пом. 001/3) плутония и урана за 2000–2008 гг.

Из сказанного выше следует, что в настоящее время вода в «Укрытии» не представляет определяющих проблем с точки зрения ядерной и радиационной безопасности.

3.2.4. Результаты измерений выноса РАУ (организованного и неорганизованного)

Выбросы радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в окружающую среду можно условно разделить на две основные группы (см. [3.1]).

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

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

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

Мониторинг неорганизованных выбросов

Система мониторинга неорганизованных выбросов была разработана и внедрена в 1990 г. КЭ. С 1990 г. наблюдения проводятся непрерывно и с 1992 г. осуществлялись персоналом Курчатовского института — ОЯРБ МНТЦ (ИПБ АЭС) (см., например, [3.12–3.17]).

Для выбора точек контроля были исследованы наиболее вероятные пути выноса аэрозолей. Особое внимание уделялось воздушным потокам, проходящим в «Укрытии» через места основных скоплений ТСМ — реакторное пространство и «развал» в центральном зале. В результате проведенных работ было решено использовать технологические люки 7, 10, 13 и 15 на легкой кровле «Укрытия» (см. рис. 3.7).

Непосредственно над люками были установлены планшетодержатели, каждый из которых был укомплектован двумя вертикальными планшетами, расположенными под прямым углом друг к другу, и двумя горизонтальными (рис. 3.8).

Планшеты (листы марлевой ткани) перед установкой пропитываются специальным составом — смесью нефтяных масел. Составы сохраняют способность удерживать осевшие на планшеты аэрозоли в течение времени экспозиции и резко уменьшают проскок аэрозолей через фильтр.



Рис. 3.7. Планшеты на легкой кровле «Укрытия»

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

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

По этим данным оценить полный выброс радиоактивных аэрозолей из всех щелей и отверстий объекта достаточно трудно. Ведь суммарная площадь щелей и до, и после герметизации «Укрытия» известна с точностью



Рис. 3.8. Планшетодержатель с вертикальным и горизонтальным планшетом

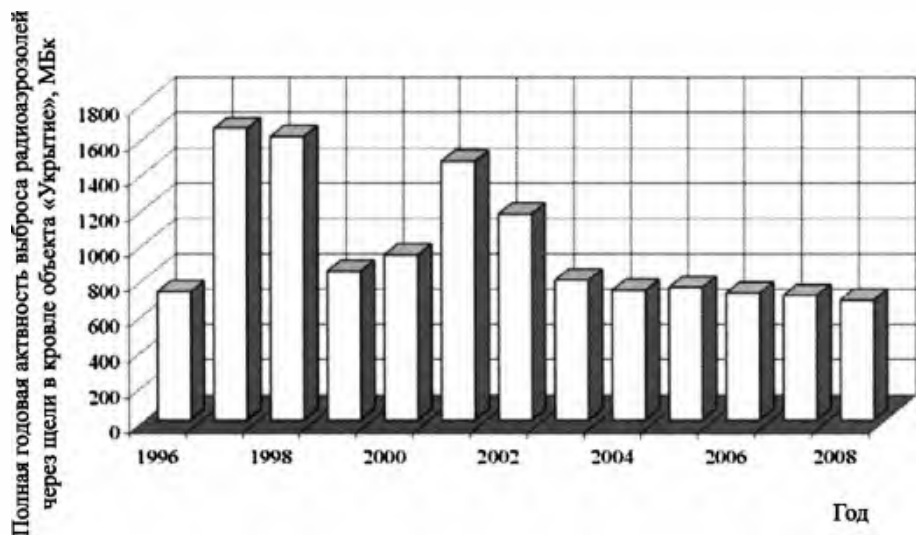


Рис. 3.9. Динамика неорганизованного выброса аэрозолей через неплотности объекта «Укрытие» за 1996–2008 гг.

не лучшей, чем 30%. Кроме того, скорости воздушных потоков, проходящих через разные щели, могут очень сильно отличаться (вплоть до знака). Поэтому на основе измерений с планшетами делаются лишь верхние оценки выброса при самых консервативных предположениях³.

Полученные в 1996–2008 гг. данные по динамике выброса (за каждый год) приведены на рис. 3.9 [5–6].

Мониторинг организованных выбросов

Для мониторинга организованных выбросов используется вентиляционная система объекта «Укрытие»⁴.

Полученные данные позволяют отслеживать относительные изменения концентрации аэрозолей, связанных с пылеподъемом и пылеобразованием на верхних отметках в объекте «Укрытие».

На рис. 3.10 приведена информация по динамике организованного выброса долгоживущих радионуклидов за период 1994–2005 гг.

Некоторые выводы из результатов многолетних измерений

При статистически значимых изменениях выброса радиоактивных аэрозолей из «Укрытия» наблюдается хорошая корреляция между организованными и неорганизованными выбросами. Отсюда следует, что:

³Так, суммарная площадь отверстий на верхних отметках «Укрытия» при оценке интегрального выброса принимается ~120 м² (начиная с 2000 г.).

⁴Описание системы приводится по работе [3.17].

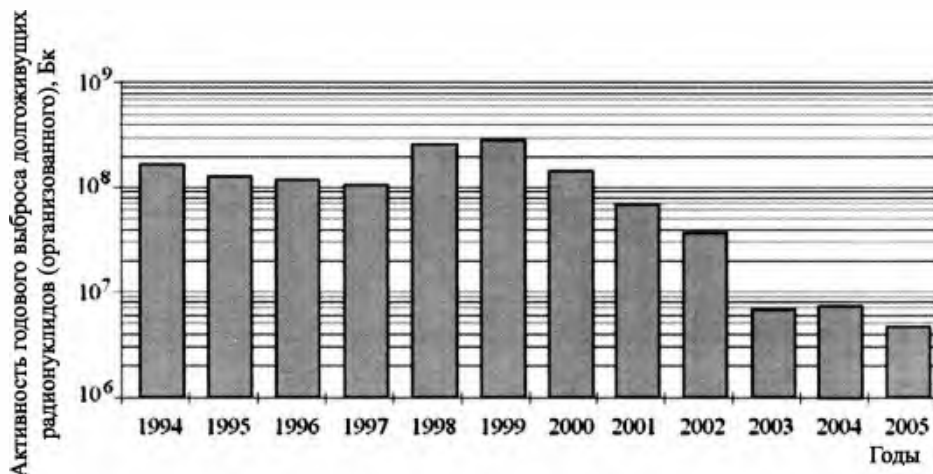


Рис. 3.10. Динамика организованного выброса долгоживущих радионуклидов через ВТ-2 за 1994–2005 гг.

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

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

- интенсивностью и периодичностью выпадения атмосферных осадков;
- метеоусловиями на промплощадке (температура, влажность, направление и скорость ветра);
- разностью температур внутри и снаружи объекта;
- интенсивностью процессов конденсации и испарения влаги внутри «Укрытия»;
- характером и интенсивностью выполняемых на «Укрытии» работ и т.д.

Природные и техногенные факторы, естественно, маскируют зависимость выброса от собственного состояния ТСМ. Однако любое, сколь угодно сильное изменение этого состояния, например начавшееся быстрое разрушение ЛТСМ, несомненно, было бы замечено.

Важно еще отметить, что за все время наблюдений величина выброшенной активности не превышала установленных контрольных уровней.

3.2.5. Система пылеподавления и ее модернизация

Полученные за два десятилетия наблюдений удовлетворительные результаты по выбросам радиоактивных аэрозолей из «Укрытия» во многом объясняются мерами, принимаемыми для ограничения образования пыли в объекте. И, прежде всего, созданием системы пылеподавления (СПП) и ее модернизацией, в которых активно участвовали специалисты Курчатовского института.

В конце 1989 г. над развалом в Центральном зале по инициативе Курчатовского института и НИКИМТ была создана система пылеподавления, которая выполняла локализирующую функцию [3.1, 3.18].

С помощью 14 форсунок, опущенных в воздушное пространство над ЦЗ через люки в легкой кровле и проходки в трубном накате производилось периодическое распыление специальных жидких составов над поверхностью развала (см. рис. 3.11, 3.12).

Таким образом смачивалась и связывалась пыль на поверхности развала. В дальнейшем она высыхала, создавая поверхностную пленку, препятствующую пылеобразованию. Пленка обладает высокой радиационной и химической стойкостью и стойкостью к воздействию моющих растворов. Она относится к классу пожаро-взрывобезопасных и экологически безопасных материалов.

Резкое уменьшение концентрации радиоактивных аэрозолей в локальной зоне «Укрытия» после начала работы СПП (см. рис. 3.13) явилось убедительным доказательством эффективности вновь созданного барьера безопасности [1].

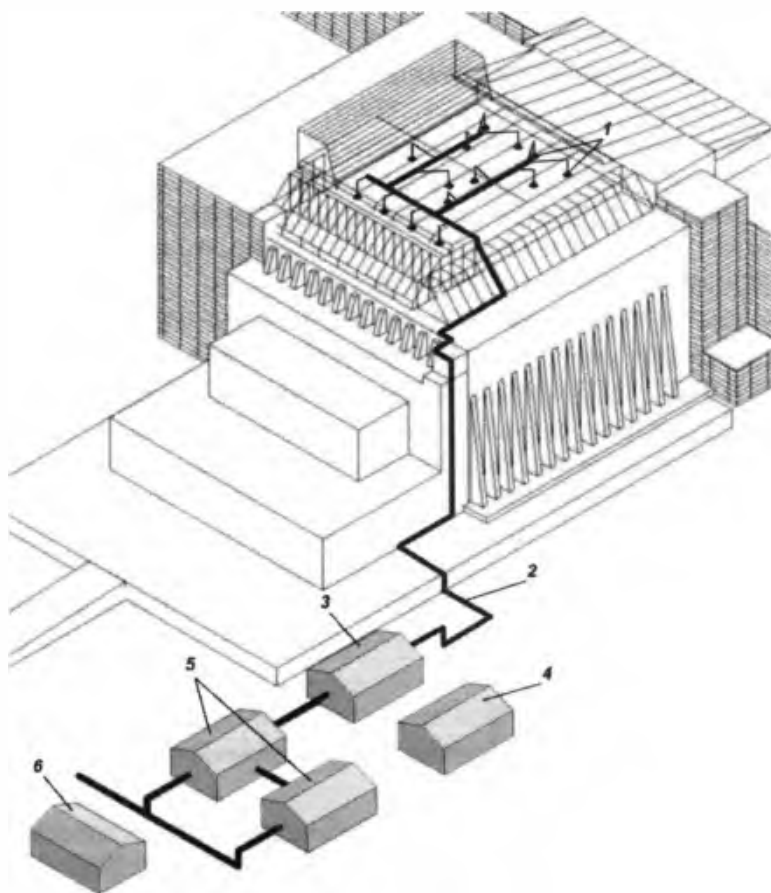


Рис. 3.11. Принципиальная схема стационарной системы пылеподавления — СПП (1989 г.): 1 — форсунки, закрепленные над развалом ЦЗ; 2 — напорный коллектор; 3 — насосное отделение; 4 — операторская; 5 — реакторное отделение (помещение для емкостей смесителей); 6 — склад химреагентов



Рис. 3.12. Пылеподавляющий факел СПП над развалом ЦЗ

Специалисты Курчатовского института предложили, чтобы кроме локализирующей функции, СПП выполняла бы и дополнительную функцию безопасности — поддержание ТСМ в подкритичном состоянии.

Это достигалось включением в состав используемых растворов нейтроннопоглощающей добавки (раствора азотнокислого гадолиния), уменьшающей $K_{эфф}$ в скоплениях ТСМ, находящихся в ЦЗ.

С течением времени становилось все более очевидным, что СПП далеко не полностью использует возможности пылеподавления в подкровельном пространстве «Укрытия». Эффективная площадь нанесения специальных составов составляла всего $\sim 1/3$ от общей площади развала, а состав самих растворов нуждался в оптимизации.

В то же время, при проведении масштабных мероприятий по преобразованию «Укрытия», безопасность работы персонала напрямую зависит от снижения концентрации радиоактивных аэрозолей в местах проведения работ.

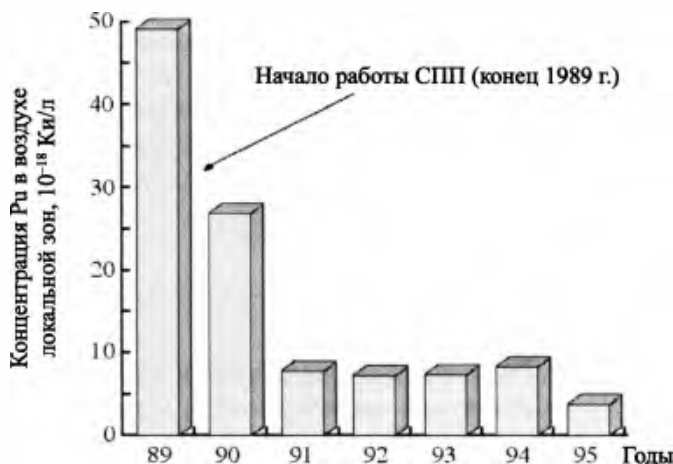


Рис. 3.13. Среднегодовая концентрация плутония в аэрозолях на промплощадке объекта «Укрытие»



Рис. 3.14. Сотрудники Курчатовского института и ОЯРБ ИПБ АЭС после отбора проб в ЦЗ (испытания МСПП, 2005 г.).

Модернизация СПП была проведена в 2003 г. под научным руководством Курчатовского института и ИПБ АЭС (см. [3.20]).

Она включала монтаж двух дополнительных коллекторов и форсунок по периферии кровли, что позволило наносить пылеподавляющие покрытия на ранее не обрабатывавшиеся западную, южную и восточную зоны подкровельного пространства.

В 2004–2005 гг. в период опытно-промышленной эксплуатации модернизированной системы пылеподавления (МСПП) сотрудниками Курчатовского института, ИПБ АЭС, специалистами ЧАЭС был выполнен целый комплекс исследовательских работ (см. рис. 3.14).

Он позволил оптимизировать составы пылеподавляющих растворов и регламент их нанесения, оценить эффективность работы МСПП и ее влияние на радиационную обстановку внутри объекта «Укрытие» и на окружающую среду при различных режимах работы.

Эти испытания подтвердили соответствие МСПП техническим требованиям и возможность выполнения системой запланированных функций безопасности.

3.2.6. Загрязненность воздуха в локальной зоне объекта

Систематические исследования аэрозолей в локальной зоне «Укрытия» проводились сначала персоналом КЭ, а начиная с 1992 г. – сотрудниками Курчатовского института – ОЯРБ МНТЦ (ИПБ АЭС) и ЧАЭС (см. [3.1], [3.12, 3.13], [3.15 – 3.17], [3.21]).

Для этого по периметру локальной зоны «Укрытия» были установлены калиброванные аспирационные установки (рис. 3.15).

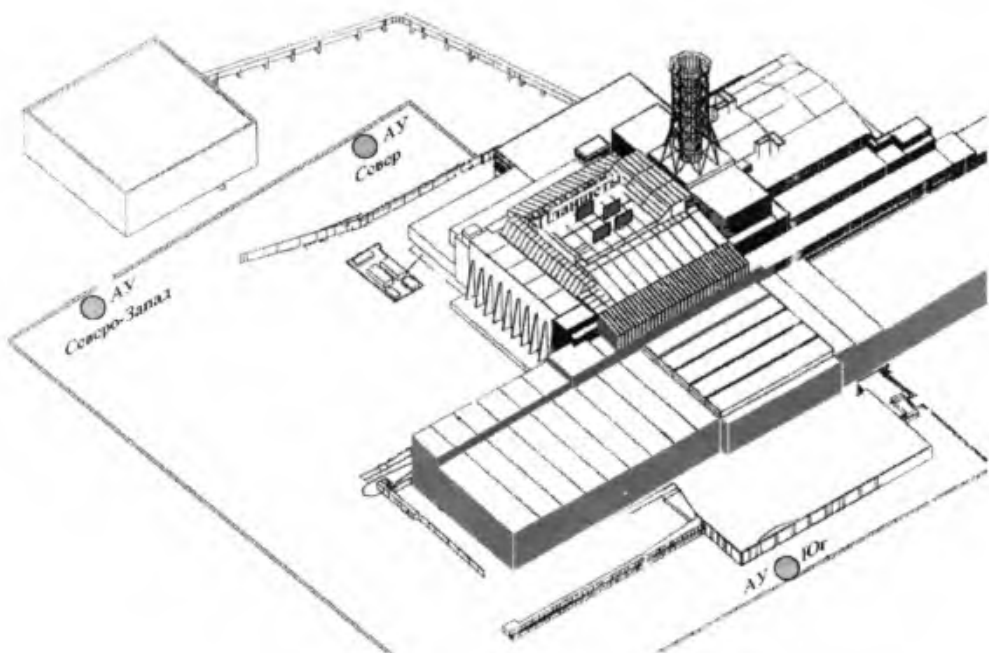


Рис. 3.15. Аспирационные установки (АУ), с помощью которых определялась загрязненность воздуха в локальной зоне «Укрытия»

В качестве материала фильтров использовался фильтрующий материал ФПП-15-1,5 площадью около $0,8 \text{ м}^2$. Время экспозиции фильтров составляло 10–17 суток, при этом каждая установка в зависимости от времени экспозиции прокачивала через фильтры 120–250 тыс. м^3 воздуха.

После окончания экспозиции фильтры транспортировались в лабораторию в г. Чернобыле. Лабораторные исследования осажденных на фильтрах аэрозолей включали гамма-спектрометрические измерения, при этом количественно определялись активности $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$, ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{155}Eu , и ^{241}Am ⁵.

Загрязнение воздуха в местах расположения аспирационных установок определяется целым рядом природных и техногенных факторов:

- интенсивностью выноса радиоактивных аэрозолей из «Укрытия»;
- метеоусловиями (температура, влажность, направление и скорость ветра);
- характером и интенсивностью выполняемых в локальной зоне работ;
- интенсивностью и периодичностью выпадения атмосферных осадков и т. п.

Опыт показывает, что первый из перечисленных факторов играет существенную роль.

⁵Активность (А) других α -излучающих радионуклидов можно определить с помощью расчетных коэффициентов корреляции (К), например, $A(^{238} + ^{239} + ^{240}\text{Pu}) = K_{\text{Pu}} \times A(^{241}\text{Am})$. Через 20 лет после аварии $K_{\text{Pu}} \approx 1$.

В случае интенсификации процессов разрушения ТСМ это было бы зафиксировано системой АУ.

Многолетние наблюдения показывают, что концентрация РАУ в воздухе локальной зоны в первые годы после аварии быстро уменьшалась, особенно заметно это стало после ввода в строй СПП (см. рис. 3.13).

Небольшой «всплеск» объемной активности произошел в 1997–2000 гг.

В «Анализе безопасности объекта «Укрытие»...» [3.1] по этому поводу говорится:

«В целом хорошо заметно, что воздух рядом с объектом с течением времени очищается от радиоактивности и только в последние годы, в связи с активизацией работ на объекте и в локальной зоне, наблюдается небольшой ее рост».

В 2000–2009 гг. объемная активность РАУ на площадке объекта по двум направлениям (север, северо-запад) практически стабилизировалась. И только на южном направлении в 2008 г. произошло заметное (в ~2,5 раза) ее возрастание, связанное с работами на площадке.

3.2.7. Загрязненность грунтовых вод в локальной зоне «Укрытия»

Исследования грунтовых вод (ГВ) на локальной площадке объекта, прежде всего, имели целью определить влияние «Укрытия» на степень их загрязнения. Именно для этого в 1991 г. КЭ начались работы по программе «Ареал» [3.1].

В ходе выполнения этой программы были пробурены наблюдательные скважины 1Г–6Г⁶, отобраны и проанализированы пробы кернов, грунтовой и поровой воды из скважин. В дальнейшем в этих скважинах, сначала специалистами КЭ, а затем Курчатовского института – ОЯРБ МНТЦ (ИПБ АЭС), регулярно проводились измерения радионуклидного состава воды (см. рис. 3.16).

В 1994–1995 гг. буровым участком объекта «Укрытие» были пробурены еще 25 скважин, относительно равномерно расположенных по локальной зоне объекта. В ряде из них также проводились наблюдения за подземными водами

Ряд помещений объекта «Укрытие» находится ниже УГВ. При этом создаются условия для проникновения и накопления ГВ в нижних помещениях разрушенного 4-го блока.

Для ряда других помещений, которые находятся выше УГВ и в которых скапливаются загрязненные «блочные» воды, существует возможность инфильтрации последних в грунт. Так, выше УГВ расположен пол пом. 001/3 (на 1+1.5 м), в котором находится наибольшее скопление «блочной» воды (см. раздел 3.2.3).

⁶Движение грунтовых вод в локальной зоне «Укрытия» происходит с юга на север и северо-восток. Скорость движения составляет 20–50 м/год.

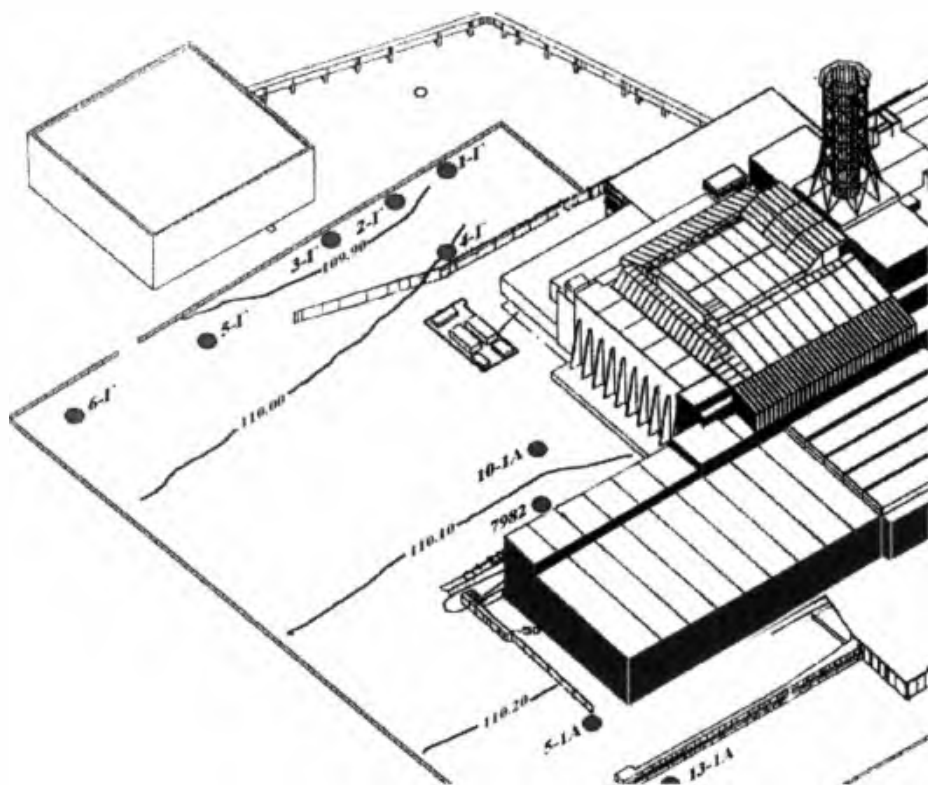


Рис. 3.16. Локальная зона объекта «Укрытие». Скважины 1-Г–6-Г, в которых много лет проводились регулярные измерения радионуклидного состава воды (отмечены красным цветом), ряд других наблюдательных скважин, упоминаемых далее (отмечены синим цветом), и гидроизогипсы (линии серого цвета); цифры в разрыве линий – значение уровня грунтовых вод в 2002 г., м

Несмотря на имевшиеся первоначально опасения о сильном влиянии блочных вод на загрязнение грунтовых, это не подтвердилось.

На основе многолетних наблюдений можно сделать следующие выводы.

- Содержание урана в ГВ в северной части локальной зоны колеблется в пределах от 0.1 до 1 мкг/дм³. Такие значения характерны для природных (фоновых) концентраций в подземных водах и не являются радиологически значимыми.

- Активность ²⁴¹Am, ^{238–241}Pu также не является радиологически значимой.

- Сравнение динамики среднегодовых концентраций ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в скважинах 1-Г, 2-Г, 3-Г, 5-Г, 6-Г, 10-1А, 7982, 5-1А, 13-1А и ряда других за длительный период указывает на то, что загрязнение грунтовых вод в них либо остается практически на первоначальном уровне, либо снижается.

- Вся совокупность приведенных данных указывает на то, что загрязнение грунтовых вод, в первую очередь, определяется миграцией радионуклидов из активного слоя почвы, образовавшегося в результате аварии и закрытого сверху слоем песка, щебня, бетона. Влияние попадания «блочных» вод из нижних помещений объекта если и существует, то незначительное.

3.3. Исследования по специальным программам (1)

3.3.1. О специальных программах

Как уже говорилось, эти исследования, проводимые под руководством и при участии специалистов Курчатовского института, были направлены на дальнейшее, более глубокое, изучение объекта «Укрытие», обоснование и подготовку к его преобразованию.

Среди работ можно отметить такие, как:

- *исследования опасности выброса радиоактивной пыли при обрушении конструкций «Укрытия»;*
- *дальнейшее изучение скоплений топливосодержащих материалов в подаппаратном помещении (305/2) и на нижних отметках «Укрытия», определение их ядерной и радиационной опасности;*
- *участие в работах по созданию модернизированной системы пылеподавления (см. раздел 3.2.5);*
- *расчетно-аналитические работы по ядерной и радиационной безопасности объекта «Укрытие»;*
- *создание базы данных по радиоактивным материалам и топливосодержащим материалам, находящимся в объекте «Укрытие» (инициатор проекта – научные институты Франции и Германии);*
- *создание прогнозной модели поведения топливосодержащих материалов объекта «Укрытия»;*
- *создание модели образования и растекания лавообразных ТСМ во время активной стадии чернобыльской аварии (совместно с ИБРАЭ РАН).*

И целый ряд других. Особое место среди этих программ занимает разработка документа «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации», который суммировал всю полученную информацию об этом уникальном ядерном объекте, показал область применения к нему существующих норм и правил, наметил пути дальнейшей работы по обеспечению его безопасности.

В настоящем разделе (3.3) приводится описание работ, выполненных по первым двум из перечисленных пунктов. Работы, составляющие содержание других пунктов и выполненные позже, будут описаны ниже.

3.3.2. Исследования радиоактивной пыли на поверхности развала в 1997–2000 гг. ([3.1, 3.9, 3.22–3.25])

Исследования радиоактивной пыли и РАУ, находящихся внутри «Укрытия», в первую очередь, преследовали цели радиационной защиты персонала. В 1988 г., 1990 г. и 1994 г. сначала специалисты КЭ, затем сотрудники Курчатовского института – ОЯРБ МНТЦ, выполнили три больших цикла таких исследований. В них, в основном, изучалось распределение РАУ по размерам и активности (см. раздел 2.12 и работы [3.22, 3.23]).

Полученные данные позволили принять эффективные меры по коллективной и индивидуальной защите персонала, работающего внутри объекта и на его площадке.

Позднее вопросы, связанные с пылью, стали привлекать к себе внимание по другой причине. Чем более детальные обследования строительных конструкций «Укрытия» проводили сотрудники ВНИПИЭТ, НИИСК и других проектных и строительных организаций, тем яснее становилось, что экстремальные природные воздействия (землетрясение, смерч и т.п.) могут привести к обрушению этих конструкций.

Главную потенциальную опасность эксперты стали связывать с возможностью обрушения верхних балок на развал реактора. Такое падение должно было сопровождаться подъемом и выходом в окружающую среду большого количества радиоактивной пыли.

Чтобы оценить радиационные риски при этой аварии, необходимо было собрать максимально полную информацию о количестве и свойствах топливной пыли, находящейся на поверхности развала и на верхних отметках объекта.

Проведение необходимых масштабных исследований в условиях больших радиационных полей потребовало создания специальной программы и долговременной подготовки. В результате они были выполнены в 1997–1998 гг. группой сотрудников Курчатовского института, МНТЦ «Укрытие» и ЧАЭС [3.24, 3.25].

На начальном этапе работы на верхних отметках были отобраны 88 образцов, включая 38 образцов из центрального зала. Рис. 3.17 дает представление о топографии развала, а на рис. 3.18 указаны места отбора проб.

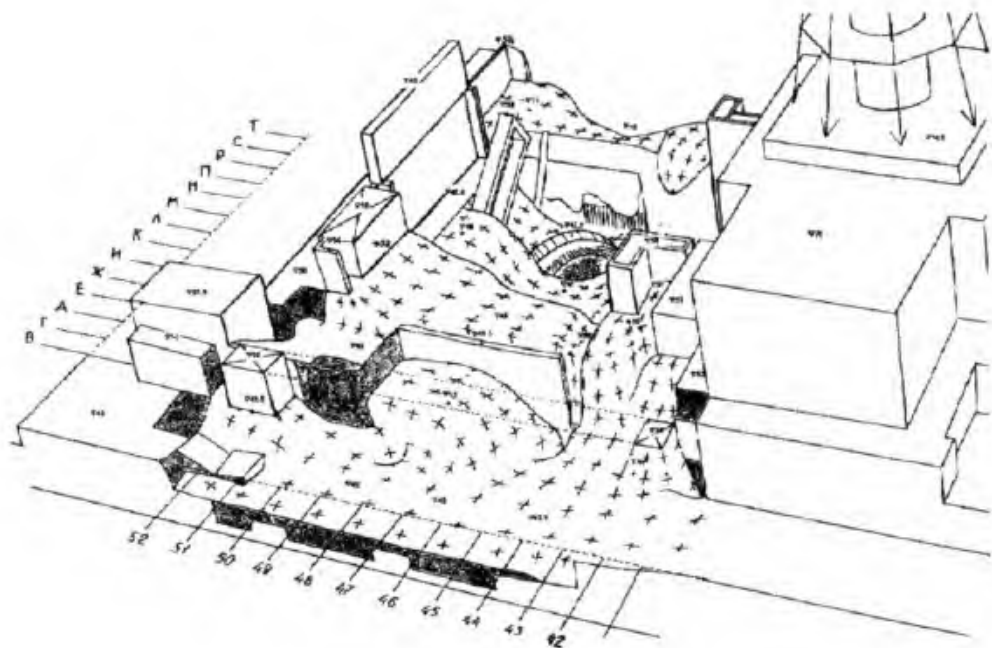


Рис. 3.17. Под кровлей «Укрытия». «Холмы» сброшенных с вертолетов материалов и выброшенных при взрыве обломков, покрытые радиоактивной пылью

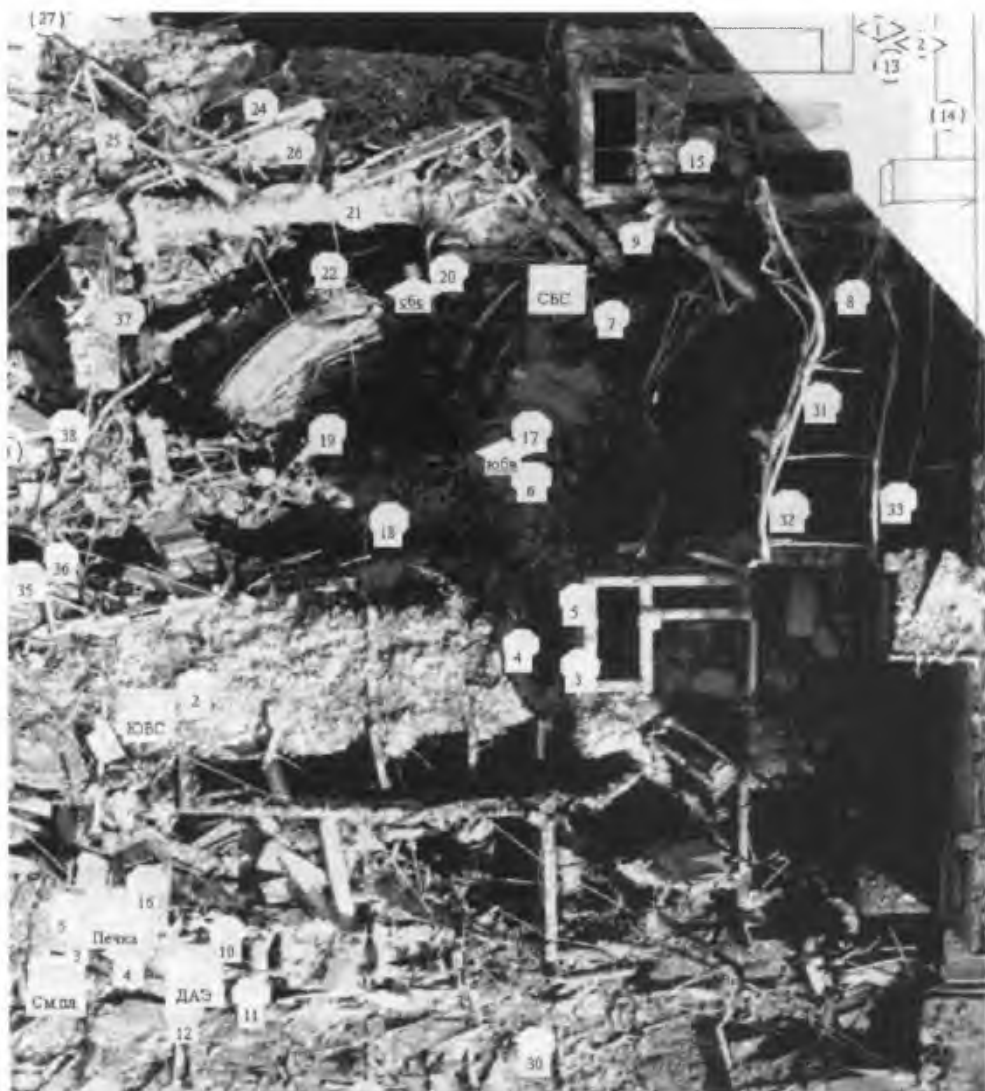


Рис. 3.18. Места отбора проб в центральном зале (места отбора с помощью мазка отмечены цифрами на белой вставке)

Кроме того, непосредственно на поверхности развала была определена интенсивность пылеподъема и пылепереноса (опыты проводились на объекте с помощью адсорбирующих планшетов).

На следующем этапе с помощью лабораторных анализов отобранных проб были получены данные о количестве и физико-химических свойствах радиоактивной пыли на поверхности развала.

Эти измерения (и расчеты) позволили найти основные константы, которые описывали бы способность топливной пыли к подъему при падении определенного груза с определенной высоты (они различались для различных участков поверхности развала).

Наконец, последним шагом стало моделирование пылеподъема при падении реальных верхних конструкций на реальную поверхность развала.



Рис. 3.19. Зона образования и подъема пыли при гипотетическом падении северной части кровли «Укрытия» (северных клюшек)

Это потребовало выполнения сложных расчетов, в чем легко убедиться, взглянув на рис. 3.19.

Приведем некоторые выводы, полученные в результате этой работы [3.26].

- С учетом площади горизонтальной проекции поверхности всего развала, способной к пылегенерации, интегральный запас топливной пыли на этой поверхности составит 4–5 т (по урану).

- Общее количество поднятой в воздух топливной пыли составит ~8 кг (по урану).

- Опасная составляющая (ингаляционная) в топливном выбросе составит ~3 кг (U).

Эти выводы стали основой для расчета рисков при радиационной аварии на объекте «Укрытие», выполненных в работе «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации» [3.1] (см. ниже).

3.2.3. Дальнейшее изучение скоплений топливосодержащих материалов в подаппаратном помещении (305/2) и на нижних отметках «Укрытия»

Медленно, в течение многих лет происходило накопление информации о местах скопления ТСМ на средних и нижних отметках объекта «Укрытия» (+ 15.000 – 0.000) и об их физико-химических свойствах. После того, как окончились активные исследования с помощью скважин, первенство перешло к дистанционным устройствам и разведывательным группам. В 1990 г. в КЭ был сконструирован робот, который по рельсам, проложенным над завалом в южных откатных воротах пом. 305/2 (см. рис. 3.20), проехал в это помещение и произвел видеосъемку его юго-



Рис. 3.20. Робот-разведчик, оснащенный телекамерой, осветительными и другими приборами, передвигаясь по специальным рельсам, проник в подаппаратное пом. 305/2

восточной части (дозы в ней достигали сотен Р/ч). Понадобились еще значительное время, прежде чем на основе материалов фото- и видеосъемки (см., например, рис. 3.21), чертежам и схемам, выполненным несколькими разведывательными группами, результатам многочисленных лабораторных исследований проб, удалось выполнить детальную реконструкцию общего вида завала из различных материалов, находящихся в пом. 305/2 [3.9, 3.27] (рис. 3.22).

В 1997 г. была сделана дополнительная оценка количества топлива в завалах пом. 305/2, которая проводилась следующим образом (см. [3.9, 3.27]).



Рис. 3.21. Фото южного квадранта пом. 305/2. Под смятыми трубами нижних водяных коммуникаций обгоревшие графитовые блоки, пол залит бетоном

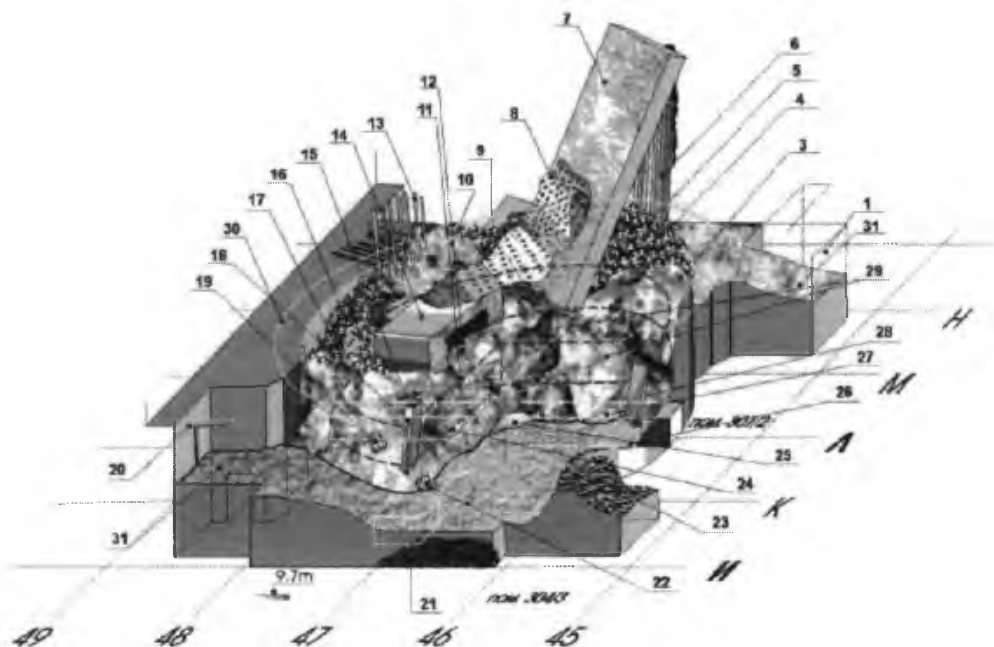


Рис. 3.22. Схема расположения конструкций и ТСМ в пом. 305/2 (по данным исследований с помощью скважин и информации разведывательных групп): 1 – проем северных откатных ворот; 2 – поверхность «свежего бетона»; 3 – засыпка из межкомпенсаторного зазора; 4 – «сталагмит»; 5- область, заполненная фрагментами активной зоны; 6 – каналы охлаждения; 7 – наклонно стоящая железобетонная плита; 8 – деформированный лист металла; 9 – фрагмент завала (железобетонная конструкция), (отметка +17.000); 10 – «траншея»; 11 – схема «ОР»; 12 – провал (отметка +13.000); 13 – каналы охлаждения отражателя; 14 – железобетонная конструкция; 15 – фрагмент элемента завала (железобетонная конструкция?); 16 – сборки с сохранившимися ТВЭЛ-ами; 17 – край схемы «ОР»; 18 – южная дополнительная опора; 19 – фрагменты ТВС; 20 – западная стена пом. 305/2; 21 – ТСМ (пролом в стене); 22 – графитовые блоки и обломки труб (ТК?); 23 – «гравийная» куча; 24, 25, 27 – бреши в стене из переплавленного вещества; 26 – прожог в стене («грот»); 28 – колонна; 29 – стена из рыхлого переплавленного вещества; 30 – проекция бака «Л» на отметку +15.950

Весь объём помещения был разбит на отдельные вертикальные колонны – «квартиры» с площадью сечения 2×2 м и высотой, определяемой соответствующими поперечными сечениями. Таких «квартир» оказалось 144.

В каждой «квартире» вычислялся объём, приходящийся только на ТСМ, плотность и содержание урана в которых учитывались по обобщённым результатам ранее проведённых исследований.

При расчётах в том случае, когда для данной «квартиры» не было данных по содержанию топлива, принималось, что его в данном объёме вообще нет.

В результате было получено, «что предельно осторожная оценка количества топлива в пом. 305/2 составляет: = 60 т» [3.27].

В 1999 и 2000 гг. выходят работы с описанием ТСМ и оценками количества топлива в них для помещений на отм. +9.000, +6.000, +3.000 и 0.000 (см., например, [3.28, 3.29]).

Все эти данные были включены в «Анализ безопасности...» (редакция 2001 г.).

3.4. «Анализ безопасности...»

Исследования этих лет позволили приступить к созданию документа, который был необходим ЧАЭС для обеспечения нормальной эксплуатации «Укрытия» и позволил бы начать выработку более детальной стратегии преобразования объекта.

Поэтому важнейшей работой Курчатовского института, ИБРАЭ РАН, МНТЦ и ЧАЭС стала разработка в 1996г. отчета «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации» [3.30].

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...» исходил из того, что «главной особенностью «Укрытия» продолжает оставаться его потенциальная опасность – существенно большая, по оценкам специалистов, чем это допускается нормами и правилами, существующими для объектов, содержащих делящиеся и радиоактивные материалы».

В начале документа перечислялись другие особенности «Укрытия», такие, как отсутствие документации по обоснованию безопасности, которая не могла быть разработана в условиях строительства, существующая до сих пор неполная исследованность и неполная контролируемость объекта, наконец, то, что «Укрытие» находится внутри сильно загрязненной радиоактивностью зоны и рядом с другими блоками ЧАЭС.

Вопрос о том, как провести анализ безопасности такого объекта, является достаточно сложным. Перечисленные выше его основные особенности и отсутствие каких-либо аналогов делают невозможным применение традиционного подхода вероятностного анализа безопасности, развитого для предприятий атомной энергетики.

Поэтому в «Анализе...» впервые был обоснован и развит метод оценки рисков ядерных и радиационных аварий, учитывающий специфику «Укрытия». Это – сочетание расчетов с экспертными оценками. С помощью этого метода были определены риски возможных аварий, уточнены исходные события, рассмотрен ряд сценариев протекания аварий и оценены их последствия.

В основу оценок риска был положен консервативный подход, при котором для параметров и характеристик принимаются значения и пределы, заведомо приводящие к более неблагоприятным последствиям.

В результате в «Анализе...» было показано, что на данном этапе нельзя считать «Укрытие» ядерно-безопасным объектом. Произошло ухудшение ситуации, о возможности которого говорилось еще в ТОЯБ (см. раздел 2.14).

Действительно, исследования образцов топливосодержащей лавы из подапаратного помещения 305/2, выполненные в 1992–93 гг. специалистами Курчатовского института, показали присутствие в некоторых из них фрагментов активной зоны в непереплавленном виде. Кроме того, визуальные наблюдения регистрировали фрагменты топлива, находящиеся в непосредственном соприкосновении с лавой. Таким образом, при расчетах и оценках ядерной безопасности стало необходимо учитывать новую композицию «лава + фрагменты топлива + вода», во многих случаях более опасную, чем композиция «лава + вода» (см. рис. 2.33).

В то же время ряд барьеров безопасности на пути возникновения СЦР (как и предсказывалось в ТОЯБ) заметным образом понизился.

Если ранее проникновению воды в лавообразные ТСМ препятствовали их высокая температура и водонепроницаемость самого вещества, то сейчас ситуация изменилась. Наблюдения регистрировали значительное охлаждение лавы, ее растрескивание и превращение в водопроницаемую структуру.

В результате в «Анализе...» делается вывод, что совокупность знаний о ряде скоплений ТСМ недостаточны, чтобы доказать невозможность (или вероятность $<10^{-5}$ 1/лет) возникновения в них СЦР.

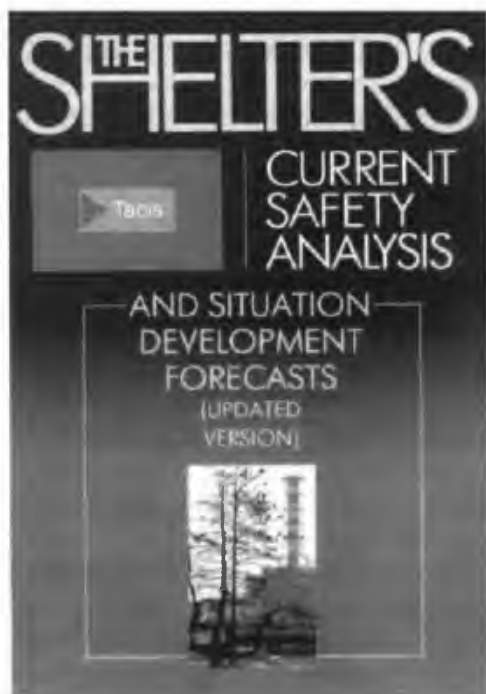


Рис. 3.23. Обложка работы «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации». Исправленный и дополненный вариант на английском языке. 1998 г.

Правда, оценки опасности возникновения СЦР показали, что реальная угроза будет существовать только для персонала, находящегося внутри самого объекта «Укрытие».

Далее, в «Анализе...» было показано, что из всех аварийных ситуаций наиболее опасной представляется выброс радиоактивной пыли, который может произойти из-за обрушения верхних конструкций «Укрытия». Рассчитаны риски, возникающие при подобной аварии, рекомендованы контрмеры.

Были рассмотрены мероприятия, планируемые для обеспечения долговременной безопасности объекта (стабилизации) и для подготовки полного преобразования «Укрытия» в экологически безопасное состояние.

«Анализ...» стал одним из основных документов, на основании которых в 1997 г. была выдана «Лицензия № 07/5-Б-0397-32 на эксплуатацию объекта «Укрытие» – 4-го блока Чернобыльской АЭС».

В 1998 г. для выпуска английского варианта [3.31] (см. рис. 3.23) «Анализ...» был дополнен. В виде сносок приведены некоторые результаты НИР и ОКР, выполненных за 1996–1997 гг.

Позднее, в связи с большим комплексом экспериментальных и расчетных исследований, выполненных за 1996–2001 годы и развертыванием работ по укреплению конструкций «Укрытия», представлялось необходимым снова провести оценку ядерной и радиационной безопасности объекта, надёжности строительных конструкций, дополнить и переработать первую редакцию «Анализа...».

Новый отчет готовился в два этапа. Сначала коллективом российских специалистов под руководством Курчатовского института был выпущен документ «Подготовка материалов для «Анализа...», в котором рассматривалось состояние топливосодержащих материалов в «Укрытии», а также проблемы ядерной и радиационной безопасности объекта.

Затем в МНТЦ «Укрытие» был подготовлен окончательный документ [3.1], включающий главы по общетехнической безопасности, безопасности строительных конструкций, преобразованию «Укрытия» и др. (рис. 3.24).

В настоящей статье нет возможности сколько-нибудь детально рассмотреть результаты этой работы⁷. Отметим только, что экспериментальные и расчетно-аналитические исследования, проводившиеся в эти годы, позволили для целого ряда помещений перейти от общего описания топливосодержащих материалов к описанию отдельных, наиболее опасных скоплений.

Было убедительно показано, что *прямые наблюдения и оценки общего количества топлива из разрушенного реактора, оставшегося в «Укрытии», дают значение ~150 т (по урану). На площадке объекта под слоем гравия, песка, бетона лежит ~0,75 т топлива.*

⁷Отчет содержал 337 с., 154 рис., 71 табл., 3 приложения, 214 ссылок.



Рис. 3.24. Первый лист работы «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации». Исправленный и дополненный вариант. Издание 2001 г.

Находящиеся в «Укрытии», но еще не найденные $\sim 35\text{т}^8$, могут быть в «белых пятнах» — местах, которые остались недоступными для исследователей:

- в центральном зале, под слоем сброшенных материалов;
- под каскадной стеной;
- внутри больших скоплений в пом. 305/2;
- в пом. 307/2.

Приведем также краткие выводы «Анализа...», связанные с наиболее опасной — радиационной аварией.

«До 1999 г. основная опасность объекта «Укрытие» связывалась с залповым выбросом радиоактивной пыли при гипотетическом обрушении верхних конструкций («коллапс»). При этом для персонала, находящегося на небольших расстояниях от «Укрытия», ингаляционные дозы могли на два порядка превысить ПДД. После проведения ЧАЭС работ по укреплению несущих балок вероятность аварии такой большой аварии стала малой.

⁸Напомним, что в пределах «Укрытия» осталось ~ 185 т ядерного топлива (по урану) из разрушенного реактора (из ~ 192 т).

Согласно имеющимся оценкам, падение следующих по опасности конструкций (стена по оси 50) уже не вызовет столь негативных последствий. Можно полагать, что ингаляция от залпового выброса топливной пыли на площадке не превысит нескольких годовых поступлений.

В этом случае на первое место по опасности могут выйти долговременные последствия обрушения. Вторичный пылеподъем с радиоактивного следа может привести к возрастанию концентрации трансурановых элементов в приземном слое воздуха».

Текст документа многократно обсуждался на семинарах и научных советах и всюду получил положительную оценку.

Он был прорецензирован крупнейшим в Европе институтом по безопасности – GRS (Германия). В выводах рецензии отмечалось:

«Работа выполнена на высоком уровне, собран и верифицирован огромный материал (особенно это относится к исследованиям последних лет).

Проведен детальный анализ вопросов ядерной и радиационной безопасности и на его основе сделаны убедительные выводы.

Такой документ необходим в процессе проведения стабилизационных мероприятий, при создании безопасного конфаймента и на дальнейших стадиях преобразования «Укрытия».

«Анализ...» стал настольной книгой для специалистов, работающих на объекте «Укрытие».

3.5. Участие «Курчатовского института» в работах по преобразованию объекта «Укрытие» (1989–2005 гг.)

3.5.1. Первые предложения

Как уже говорилось в последнем разделе предыдущей главы, первое предложение по преобразованию объекта «Укрытие» в безопасное состояние относится к 1989 г.

К этому моменту собранная в результате исследований внутренних помещений и строительных конструкций информация показала, что «Укрытие» может представлять опасность для окружающей среды и эта опасность с течением времени возрастает.

В середине 1989 г. сотрудники Курчатовского института С.Т. Беляев и А.А. Боровой выдвинули свою концепцию особо долговременного и экологически безопасного захоронения топлива [3.33]. Она предлагала создание над существующим объектом герметичного «Укрытия-2», позволяющего полностью изолировать внешнюю среду от ТСМ внутри объекта. Одновременно «Укрытие-2» должно было служить надежной оболочкой, под которой можно было бы провести разборку объекта.

Предварительная проработка различных вариантов преобразования была поручена ВНИПИЭТ и выполнена им в 1991 г.

Рассматривалось несколько вариантов (см. рис. 3.25):



Рис. 3.25. Варианты преобразования «Укрытия», рассмотренные в работе ВНИПИЭТ

- «Холм» (полная засыпка объекта);
- «Зеленая лужайка» (полная разборка Укрытия);
- «Арка» (создание герметичного Укрытия-2 над существующим объектом, обеспечивающего длительное хранение топлива, вплоть до окончательной разборки);
- «Промежуточное омоноличивание» (последовательная заливка бетоном помещений объекта, а в далеком будущем его разборка).

Надо отметить, что к моменту создания данной работы не были выявлены многие недостатки конструкции, исследованные позднее, а все скопления топливосодержащих масс (ТСМ) считались полностью ядерно-безопасными.

Хотя выполненная работа называлась «Технико-экономическое обоснование», но по сути она представляла собой не более чем первоначальные технические предложения, поскольку не была разработана сколько-нибудь убедительная система сравнения дозовых и материальных затрат.

Тем не менее авторы работы высказывались в пользу варианта омоноличивания.

15 марта 1991 г. результаты работы ВНИПИЭТ обсуждались на Научно-техническом Совете Минсредмаша СССР. В решении Совета было записано: «Принять в качестве 1-го этапа для дальнейшей работы над проектом и практической реализации вариант «Промежуточного омоноличивания ... и длительной консервации объекта «Укрытие».

Однако целый ряд экспертов выступил как на Совете, так и после выхода решения, против скоропалительных действий в этой области (Барьяхтар В.Г., Боровой А.А., Готовиц Г.А. и др.).

Поскольку их возражения против «Промежуточного омоноличивания...», поддержанные КЭ, до сих пор не потеряли актуальность, мы кратко приведем их здесь.

На первый взгляд предложение заполнить бетоном существующее «Укрытие» и, обезопасив тем самым внешнюю среду от проникновения радиоактивности на 100 и более лет, значительно отодвинуть сроки разборки, кажется привлекательным по многим параметрам. В том числе по стоимости проведения работ, дозозатратам, надежности временного захоронения и т.п.

Однако более внимательное рассмотрение показывает, что при реализации проекта все эти преимущества теряются.

Вот несколько примеров.

При омоноличивании огромные массы заливаемой в «Укрытие» «смеси» придут в соприкосновение с радиоактивными и топливосодержащими материалами, перемешаются с ними и во много раз увеличат количество РАО в ОУ, которых уже сейчас насчитывают более 150.000 м³. То же произойдет и с ТСМ. Во много раз увеличится при этом объем материалов, содержащих ядерное топливо и трансураны.

Такой подход противоречит основным документам МАГАТЭ.

В сформулированных этой организацией «Принципах обращения с радиоактивными отходами» говорится.

Принцип 7. Контроль за появлением радиоактивных отходов.

Появление радиоактивных отходов должно сохраняться на минимально возможном уровне.

В проекте «Арка» и «Монолит» окончательное извлечение РАО и ТСМ предполагается предоставить будущим поколениям (мы не обсуждаем пока каких-то оценок этих сроков, однако ясно, что это десятки лет). И если в «Арке» сделано все, чтобы облегчить будущую разборку, то в проекте «Монолит» она затрудняется самим омоноличиванием помещений, содержащих РАО.

Снова обратимся к «Принципам обращения с радиоактивными отходами».

Принцип 5. Обременение будущих поколений.

Обращение с радиоактивными отходами должно выполняться таким образом, чтобы не налагать дополнительных трудностей на будущие поколения.

Таким образом, выбор варианта «Монолит» означает сознательное отступление от основополагающих документов по безопасности.

Далее при рассмотрении организации работ по осуществлению проекта «Монолит» многие преимущества оказываются нереализуемыми. Так, заполнение сотен помещений «Укрытия» «смесью» потребует проведения значительных работ не только на площадке, но и внутри самого объекта. Даже в целых, не имеющих серьезных повреждений помещениях, заполнение «самотеком» вызовет образование объемных воздушных пузырей. Например, под потолком, если «смесь» вливается через дверь. Пузыри опасны тем, что при заливании следующего этажа, при значительном увеличении нагрузки, могут произойти обрушения, сопровождающиеся выбросом и перемещением радиоактивности.

Следовало бы вспомнить, что неконтролируемое бетонирование при создании опорных конструкций «Укрытия» в 1986 г. сопровождалось обрушением части разрушенных внутренних стен и потолков и ухудшением радиационной обстановки на площадке.

Что бы избежать этого, скорее всего, придется бурить скважины в помещения и уже контролируемым образом заливать «смесь» и выпускать воздух. А бурение скважин в объекте связано с проведением большой дополнительной работы по дезактивации помещений для буровых станков,

укреплению полов, монтаживанию оборудования и т.п. Можно предположить, что материальные и, особенно, дозовые затраты могут стать сопоставимыми с затратами на создание «Арки».

До последнего времени (2010 г.) при рассмотрении проекта «Промежуточное омоноличивание...» реалистичной оценки материальных и дозовых затрат, связанных с заполнением бетоном помещений, сделано не было.

Существуют и пессимистические предсказания относительно устойчивости фундамента блока при значительном увеличении нагрузки на него.

Поэтому без конкретной проработки технических и технологических проблем нельзя обсуждать проект «Монолит» и считать его более привлекательным по сравнению с другими более детально разработанными сценариями.

В результате разгоревшейся дискуссии было предложено провести Международный конкурс.

3.5.2. Обсуждение проблем преобразования «Укрытия». Международный конкурс

Впервые об опасности объекта «Укрытие» и проектах по его преобразованию международная общественность детально узнала из доклада Курчатовского института на конгрессе «Ядерные аварии и будущее энергетики», проходившей в Париже в апреле 1991 г. [3.34].

В докладе, в частности, говорилось:

«С нашей точки зрения было бы весьма желательным привлечь к обсуждению и решению проблем будущего «Саркофага» («Укрытия-2») ученых и инженеров различных специальностей, как в стране, так и за рубежом».

Это сообщение вызвало серьезный интерес. Уже в августе 1991 г. в КЭ в Чернобыль приехал заместитель Министра здравоохранения Франции профессор П. Пелерен. Его визит носил ознакомительный характер, но одновременно он передал в Курчатовский институт и на ЧАЭС предложения крупнейшей французской строительной фирмы «Буик» по сотрудничеству в строительстве «Укрытия-2».

Можно считать, что это были первые шаги на долгом пути, который через 7 лет привел к реальным результатам по преобразованию «Укрытия».

Начиная с 1991 г., Чернобыльская зона, ЧАЭС и объект «Укрытие» перешли под юрисдикцию Украины.

Украинское Правительство поддержало идею проведения Международного Конкурса на преобразование «Укрытия» в экологически безопасную систему.

Его организация была поручена Минчернобылю и Академии Наук Украины (постановление Кабинета министров Украины №-94 от 27 февраля 1992 г.). Активное участие в подготовке Конкурса приняли и российские специалисты Курчатовского института, ВНИИПИЭТ, ИБРАЭ РАН и др. (см. [3.35]).

Еще до начала рассмотрения работ, поданных на Конкурс, Курчатовский институт и МНТЦ «Укрытие» выступили с совместным предло-



Рис. 3.26. Профессор П. Пелерен (первый справа) обсуждает с руководством КЭ проект «Укрытия-2» (1991 г.)

жением об обязательном включении в план проведения работ по преобразованию (при любых дальнейших действиях) стадию «Стабилизации существующего «Укрытия». В направленных в Минчернобыль и на ЧАЭС документах [3.36] говорилось:

«Рассчитывать на возможность за короткий срок в 2, 3 даже 5 лет полностью преобразовать объект или изолировать его от внешней среды с помощью «Укрытия-2», представляется неоправданным оптимизмом. Даже не столько с технической точки зрения, как с финансовой, поскольку потребует затрат в сотни миллионов долларов. Поэтому любой проект должен включать в себя некую стадию, которую можно назвать «СТАБИЛИЗАЦИЕЙ».

Во время этой стадии принимаются меры по достаточно долгосрочной (для Укрытия >10 лет) стабилизации объекта и минимизации его влияния на окружающую среду.

Для Укрытия проведение этих мероприятий позволит безопасно и тщательно подготовить и провести преобразование объекта. Стоимость мероприятий по стабилизации на порядок меньше стоимости полного преобразования, а работы могут быть выполнены силами организаций Украины.

В случае проведения соответствующих работ по стабилизации не будет представлять опасности задержка с окончательным преобразованием, которая может произойти по самым различным причинам».

Далее в разосланном письме приводилось описание конкретных мер по стабилизации.

Возвращаясь к Конкурсу, следует отметить, что к экспертизе конкурсных предложений были приглашены ведущие специалисты Украины, России, Беларуси, Англии и Бельгии.

По результатам открытого обсуждения (8–10 июня 1993 г.) определились шесть проектов, в наибольшей степени отвечающих условиям и целям Конкурса.

17 июня 1993 г. Конкурс был завершен. Первую премию было решено не присуждать, поскольку ни один из проектов в полной мере не отвечал объявленным условиям.

По результатам тайного голосования лучшим проектом, удостоенным второй премии, был признан проект «Resolution».

Главным результатом Конкурса стала выработка стратегической линии преобразования. Она должна была включать несколько этапов.

Этап 1. Исследование состояния объекта «Укрытие» и мониторинг окружающей среды.

Этап 2. Информационное обеспечение общественности о состоянии объекта «Укрытие» и окружающей его территории.

Этап 3. Стабилизация состояния объекта «Укрытие».

Этап 4. Сооружение нового защитного сооружения вокруг объекта «Укрытие» («Укрытие-2»).

Этап 5. Сооружение приповерхностных хранилищ радиоактивных отходов.

Этап 6. Создание технологического участка по сортировке и переработке РАО.

Этап 7. Извлечение, кондиционирование и складирование в хранилищах радиоактивных материалов, находящихся внутри «Укрытия-2».

Конкурс еще раз позволил оценить порядок стоимости работ по преобразованию «Укрытия». Финансовые затраты должны были составлять сотни миллионов долларов. Стало очевидным, что без помощи всего международного сообщества выполнить эти работы не представляется возможным.

3.5.2. Shelter Implementation Plan

В декабре 1993 года Альберт Гор прибыл в Россию в качестве вице-президента США с первым официальным визитом. Во время одной из встреч руководитель Курчатовского института познакомил его с проблемами «Укрытия» и по просьбе вице-президента передал ему памятную записку, в которой содержалась просьба помочь в реализации преобразования объекта (рис. 3.27).

Через некоторое время в Вашингтон был вызван представитель Курчатовского института, который подробно рассказал о состоянии «Укрытия» в Белом доме, Государственном Департаменте и Комитете по ядерному регулированию (NRC). Обсуждались возможности участия США в работах по преобразованию и созданию специального Фонда для финансирования работ.

Надо отметить, что и в дальнейшем с российской стороны делались постоянные шаги по привлечению внимания международной общественности к вопросу о безопасности «Укрытия».

Но, безусловно, главную роль в решении проблемы сыграла последовательная и настойчивая политика украинского Правительства и Президента Украины.

MEMORABLE NOTE

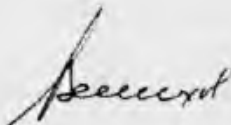
Dear Mr. Vice-President,

I would like to draw Your attention to the real hazard of radioactive contamination on the territory of Europe coming from the object "Shelter" (Chernobyl).

After Chernobyl accident the destroyed unit was covered with the help of special construction "Shelter". Tens thousand tons of radioactive materials, about one hundred and eighty tons of nuclear fuel and considerable quantity of radioa-

I believe, that the USA assistance in implementation of our suggestions will be appreciated by people of Ukraine, Russia and Byelorussia injured in Chernobyl disaster.

Truly Yours,



E P Velikhov

Рис. 3.27. Первая и последняя страницы памятной записки о необходимости преобразования объекта «Укрытие», переданной вице-президенту США А. Гору

После многолетней подготовительной работы в июне 1997 г. на заседании Большой семерки был принят «План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие» — Shelter Implementation Plan⁹ [3.37]. Этот план, опирающийся на результаты работы российских и украинских специалистов, определил ряд шагов, направленных на приведение объекта «Укрытия» к экологически безопасному состоянию.

Были определены основные этапы деятельности по преобразованию объекта «Укрытие»:

Этап 1. Стабилизация и другие первоочередные мероприятия.

Этап 2. Подготовка к преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему.

Этап 3. Преобразование объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему.

20 ноября 1997 года в Нью-Йорке состоялась конференция стран-доноров, которые взяли обязательства относительно выделения средств на реализацию данного плана в специально созданный Чернобыльский Фонд «Укрытие».

Управление Фондом было поручено Европейскому Банку Реконструкции и Развития (ЕБРР). Срок реализации работ в SIP первоначально определялся от 7 до 10 лет.

⁹Ванглийской аббревиатуре — SIP, в русской — ПОМ (план осуществления мероприятий).

ЭТАПЫ РАБОТ ПО ПРЕОБРАЗОВАНИЮ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

1998–2003 гг. Подготовительная стадия

2004–2007 гг. Стабилизация строительных конструкций, позволяющая в течение 10 лет гарантировать неразрушение объекта

2008–2012 гг. Проектирование и строительство Нового безопасного конфаймента (НБК) в виде «Арки». Надвижение «Арки» на существующее «Укрытие»

2012–20... (?) Десятки лет. Демонтаж строительных конструкций, извлечение ТСМ и РАО. Их окончательное захоронение

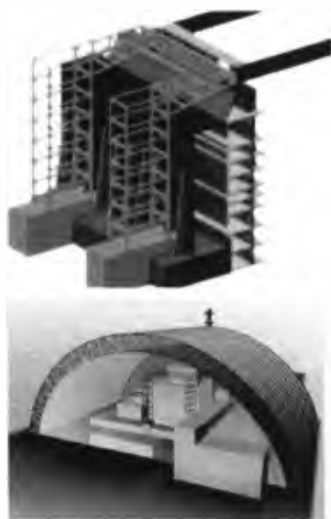


Рис. 3.28. Основные стадии работ по преобразованию объекта «Укрытие»

Стоимость всех работ, запланированных в SIP, оценивалась тогда в 758 млн. долл. США.

За прошедшие годы закончить преобразование «Укрытия» в запланированные сроки не удалось.

Выполнены два большие этапа работы — подготовительная стадия и стабилизация строительных конструкций (см. рис. 3.28). Окончена основная часть проектных работ по созданию нового безопасного конфаймента¹⁰.

Работы на Чернобыльской АЭС ведутся при финансовой, технической и организационной помощи всего международного сообщества, в том числе и России.

Курчатовский институт продолжает активно участвовать в этих работах (см. следующий раздел).

В заключение хотелось бы отметить, что в ходе преобразования объекта «Укрытие» возникало и возникает множество новых вопросов, направлений и вариантов действий.

Обсуждаются самые различные предложения. Но тем не менее, в целом *магистральное направление движения остается тем, что было предложено специалистами Курчатовского института:*

- *стабилизация строительных конструкций,*
- *создание «Укрытия-2»,*
- *разборка, извлечение и окончательное захоронение радиоактивных материалов.*

¹⁰Новый безопасный конфаймент — НБК («Укрытие-2»). Радиус арки ~127 м. Высота арки ~92 м. Пролет арки ~250 м. Длина НБК ~150 м. Внутренний объем НБК 2,5×10⁶ м³.

3.6. Исследования по специальным программам (2)

3.6.1. Основные направления исследований Курчатовского института в 1998–2011 гг.

Основные исследования, выполненные в 1998–2011 гг. по специальным программам, связаны с преобразованием объекта «Укрытие». При этом только одна большая программа — «Сопровождение ввода в эксплуатацию модернизированной системы пылеподавления» потребовала выполнения работ сотрудниками Курчатовского института непосредственно на объекте (эти работы упомянуты в конце раздела 3.2.5).

Другие программы были ориентированы на обеспечение безопасности «Укрытия» на стадии подготовки к извлечению ТСМ и РАО, которая по существующим оценкам может занять десятки лет (см. рис. 3.28).

В настоящей работе мы остановимся на трех из них.

3.6.2. Создание базы данных «Состояние топливосодержащих материалов и радиоактивных веществ объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС» [3.9, 3.38–3.39]

В 1998–2001 гг. в Курчатовском институте (по особому соглашению между IPSN/GRS, Чернобыльским Центром и Курчатовским институтом) была создана база данных «Состояние топливосодержащих материалов и радиоактивных веществ объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС».

Необходимость такой работы для реализации проектов на всех стадиях преобразования «Укрытия» очевидна. Это касается стабилизационных мероприятий, строительства нового безопасного конфаймента и особенно работ по извлечению и захоронению ТСМ и радиоактивных материалов.

Для создания БД были собраны и оценены документы, находящиеся в библиотеках и архивах Курчатовского института, ЧАЭС, МНТЦ «Укрытие», «РИ», ИБРАЭ РАН и многих других учреждений, а также у физических лиц.

Общее число просмотренных материалов превысило 600 единиц. Из них были выбраны более 100 основных источников информации для внесения в каталог и дальнейшего использования.

Структура базы построена таким образом, что центральным ее элементом стало понятие — «скопление ТСМ». Иногда в помещении находится одно скопление, иногда — несколько. Общее число скоплений, описанных в базе, составляет ~100, число записей об их состоянии превышает 6000. На рис. 3.29 приводятся фотографии экрана монитора ПК, на которых отображены «Вход в базу» и «Главное меню».

Элементы верхнего уровня — строительная отметка объекта «Укрытия», затем — помещение. Элементы нижнего уровня связаны с характери-

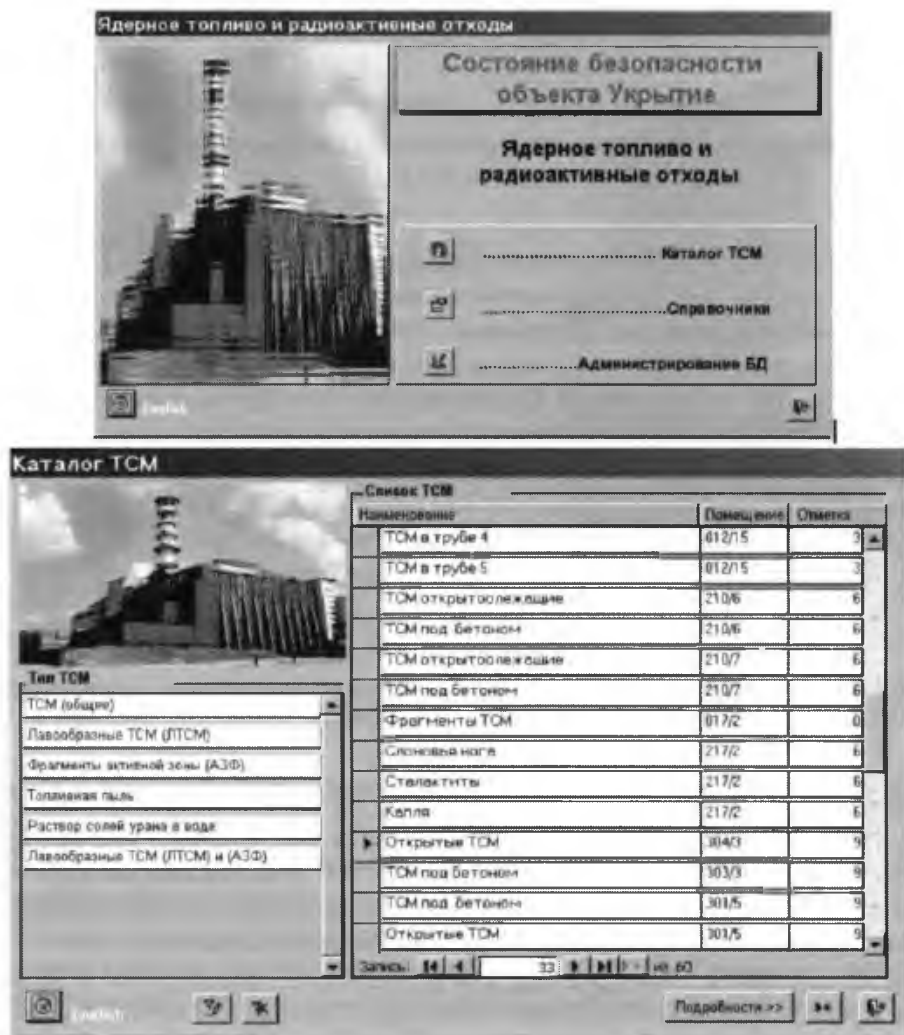


Рис. 3.29. «Вход в базу» и «Главное меню»

ками скопления — макро и микро свойствами. БД позволяет пользователю обращаться как к усредненным свойствам скопления, так и непосредственно к экспериментальному материалу — анализам проб, отобранных в различных точках скопления, измерениям гамма и нейтронных полей и т.п.

Вот некоторые статистические данные, характеризующие БД.

Количество описанных скоплений топливосодержащих материалов — 97.

Количество данных по общим свойствам TCM (микросвойства и макросвойства) — 965.

Количество данных по элементному и радионуклидному составу проб — 5918.

Общая структура БД представлена на рис. 3.30.

В настоящее время БД передана специалистам ЧАЭС и Группе управления проектом (SIP).

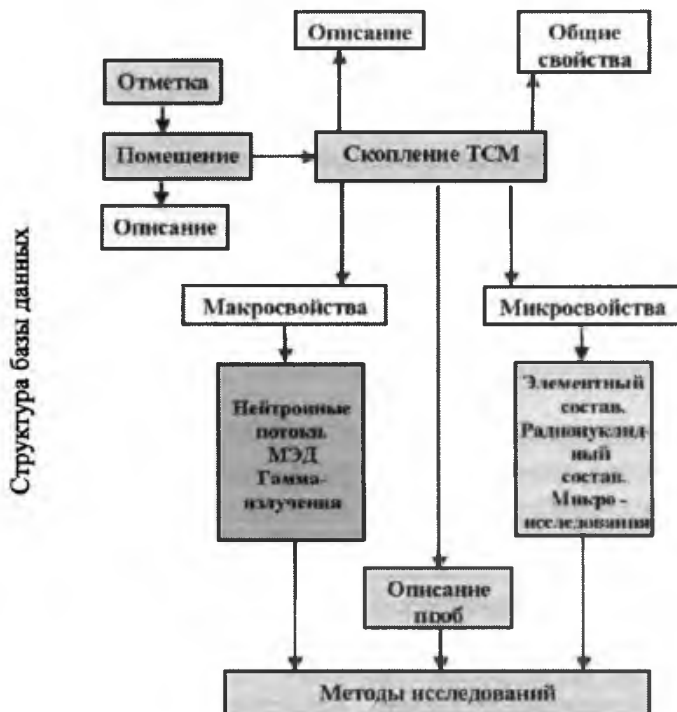


Рис. 3.30. Общая структура базы данных

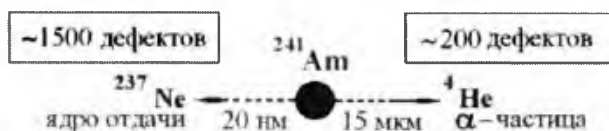
3.6.3. Модель долгосрочного поведения лавообразных ТСМ

В 1997–2002 гг. в печати появилось несколько статей (см., например, [3.40–3.42]), в которых говорилось о возможности близкого по времени (три–четыре года) и стремительного (недели) превращения всех 1200 т черновильской лавы (кориума) под действием собственной α -активности в субмикронную пыль (рис. 3.31).

Это вызвало ряд предложений о приостановке работ по преобразованию объекта «Укрытие», поскольку проект нового безопасного конфайнмента («Арка») не рассчитывался на удержание такого гигантского количества субмикронной пыли.

Отметим, что вопрос о том, правильна ли гипотеза о внезапном разрушении кориума под действием внутреннего облучения, важен не только для черновильской проблемы.

Такое разрушение может стать одним из главных препятствий на пути работ по ликвидации последствий тяжелых аварий на АЭС, сопровождающихся образованием кориума.

Рис. 3.31. Образование радиационных дефектов при α -распаде (для ^{241}Am) в лаве

Поэтому в 2003–2010 гг. РНЦ «Курчатовский институт» и ИПБ АЭС выполнили ряд независимых исследований по этой тематике.

К 2004 г. они пришли к единому выводу, что после создания НБК (~2012 г.), в течение ~25 лет разрушение ТСМ будет носить такой характер, при котором ни радиоактивная пыль, ни радиоактивная вода еще не смогут выйти за пределы НБК в опасных для окружающей среды и персонала количествах (при заявленных проектных критериях НБК) [3.43].

Однако, относительно дальнейшего поведения лавы точки зрения двух институтов не совпали.

Это заставило специалистов Курчатовского института провести дальнейшие подробные исследования вопроса. Изложим кратко полученные результаты.

Разрушение скоплений лавообразных ТСМ (например, так называемой «слоновой ноги»), появление на поверхности лавы растворимых солей урана и их перенос водяными потоками, образование топливной пыли, наблюдались и действительно говорили о том, что за десятилетия, отделяющие сегодняшний день от момента извлечения ТСМ, их геометрия, структура, даже тип могут измениться. При этом очевидной и главной причиной таких изменений является вода.

В то же время исследования показали, что перечисленные процессы развиваются достаточно медленно. Экспериментальные оценки скорости разрушения водой поверхности лавы дали значение $\sim 10^{-7}$ г/(см²×сут.) ([3.9, 3.44]). Даже, если принять, что площадь поверхности лав, омываемых водой, равна 10 тысяч м², то количество разрушенного материала составит $\approx 3,5$ кг в год. Это малая величина (в сравнении с оценками полной массы лавообразных ТСМ в «Укрытии» ~ 1200 т), и она никак не свидетельствует о развитии «катастрофических» процессов.

Это же подтверждают и анализы сотен проб воды и воздуха в «Укрытии» и воздуха на его площадке, проведенные за более чем два десятилетия. В пределах наблюдаемого разброса величин не выявлены какие-либо «опасные» тенденции в интегральных выбросах и сбросах из объекта.

Для аэрозольного выброса скорее можно предполагать долговременную (с начала 90-х годов) тенденцию к регулярному снижению активности, выходящей за пределы «Укрытия», а для содержания радионуклидов и урана в воде внутренних помещений — тенденцию к повышению, но никак не носящему быстрый (а тем более катастрофический) характер.

Исследования показывают, что из помещений реакторного отделения 4-го блока растворяется¹¹ и выносится за его пределы¹² по порядку величины 10 кг топлива (U) в год (5.5×10^{-5} часть оставшегося в «Укрытии»).

Итак, все наблюдения никак не указывают на развитие каких-либо быстро нарастающих процессов разрушения, происходящих с ТСМ.

После сооружения НБК ситуация должна существенно измениться. Надвижение «Арки» приведет к полному исключению попадания в

¹¹Идет растворение топлива, входящего в состав всех модификаций ТСМ — фрагментов активной зоны, ЛТСМ, топливной пыли.

¹²В основном, на нижние отметки 3-го блока, затем загрязненная вода поступает на системы переработки ЧАЭС.

«Укрытие» дождевой и талой воды и к существенному уменьшению конденсированной влаги. Скорость разрушения лавы сильно замедлится.

В Курчатовском институте были также проанализированы результаты десятков работ, в которых изучалась динамика поведения различных стекол с введенными в них радиоактивными добавками (проблема стабильности остеклованных отходов).

Учитывалось то, что матрица лавообразных топливосодержащих материалов не представляет собой какого-нибудь уникального материала и достаточно близка по своим свойствам к обычным щелочным стеклам.

По сравнению со своими промышленными аналогами, созданными для хранения отходов, лава должна даже отличаться в «выгодную» сторону [3.45].

Проведенные в Курчатовском институте оценки показывают, что по прошествии даже 100 лет после аварии поглощенные дозы в силикатной матрице лавы все еще будут, по крайней мере, на порядок меньше тех, при которых наблюдаются первые признаки ее серьезных разрушений.

3.6.4. Модель образования и растекания черномыльских лав

Создание этой модели, которым занимались в 2004–2007 гг. Курчатовский институт и ИБРАЭ РАН, преследовало несколько целей.

Среди них:

- помочь уточнить количество, расположение и свойства лавы в недоступных помещениях;
- выработать рекомендации по предотвращению возможных аварий;
- способствовать созданию оптимальных технологий извлечения лавы и тем самым снизить материальные и дозовые затраты.

Еще одна цель состояла в том, чтобы использовать результаты огромного по своим масштабам и практически неповторимого «эксперимента», поставленного над ядерным топливом 4-го блока, для решения общих проблем безопасности атомной энергетики, связанных с образованием кориума.

Первым шагом в этой работе стала реконструкция состояния разрушенного блока после взрывов (условно было выбрано время — полчаса после начала аварии).

Для этого была проведена верификация, анализ и структурирование огромного экспериментального материала, полученного при исследованиях на объекте «Укрытие» в 1986–2005 гг.

Использовались данные, почерпнутые из статей, отчетов, актов обследований, строительных чертежей и т.п. Привлечены фото- и видеоматериалы.

Сбор информации был закончен в 2005 г. Его результаты были опубликованы в работе [3.46], где был подробно рассмотрен вопрос о составе и количестве материалов, вошедших в состав лавы (см. рис. 3.32).

При моделировании процессов образования лавы учитывались три источника тепла:



Рис. 3.32. Материалы, вошедшие в состав лавы

- остаточное тепловыделение топлива 4-го блока ЧАЭС;
- тепло от горения графита;
- тепло от парациркониевой реакции.

Первый из них являлся определяющим.

При образовании лавы многие материалы, вошедшие в ее состав или соприкасавшиеся с основными ее потоками, сыграли роль своеобразных термометров, по которым впоследствии можно было восстановить температурные диапазоны происходивших процессов.

Созданная модель образования лавы показала, что в глубине подаппаратного помещения 305/2 могут существовать скопления топлива со значительным содержанием урана. В настоящее время совокупность тепловых и нейтронных измерений указывает на два таких гипотетических скопления [3.47]. Повышение критичности этих скоплений связано с поступлением и оттоком воды из мест их расположения.

Модель растекания лавы учитывала такие ее параметры, как состав ЛТСМ, тепловые характеристики (остаточное тепловыделение, начальные температуры лавовых масс, зависимость вязкости лавы от температуры и др.). Особое внимание уделялось путям растекания лавы и ее взаимодействию со строительными конструкциями.

При моделировании растекания лавы параметры модели верифицировались для относительно исследованного так называемого «горизонтального потока». Были получены результаты для границ распространения лавы в тех помещениях (частях помещений), относительно которых экспериментальной информации нет, а также оценки количества лавы во всех помещениях и во всем горизонтальном потоке.

Модель позволила полностью исключить из рассмотрения варианты, в которых предполагается, что лава горизонтального потока имеет заметно меньший объем и содержит заметно меньшее количество топлива, чем это обосновано в «Анализе...» [3.1].

В этом случае, из-за остывания, ее распространение по помещениям от 9.000 м и на расстояние ~25 м становится невозможным.

3.6.5. База медико-биологических и дозиметрических данных на сотрудников РНЦ КИ – участников ЛПА на ЧАЭС

Работы Курчатовского института, связанные с аварией на ЧАЭС, не ограничивались деятельностью ОЯРБ – ОМТРИ – ЛПЧ. Так, в 1996 году в Институте ядерных реакторов Курчатовского института была создана база медико-биологических и дозиметрических данных на ~700 сотрудников центра – участников ЛПА на ЧАЭС. В дальнейшем база развивалась, совершенствовалась, а ее данные анализировались. Важнейшей задачей для создателей базы стало определение фактической дозовой нагрузки для участников ЛПА. Для этого данные, полученные на основе средств индивидуального дозиметрического контроля – ИДК, сопоставлялись с результатами медицинских наблюдений и биологического ретроанализа. Последняя работа выполнялась совместно с Институтом физической химии (ИФХ) РАН, Институтом общей генетики РАН (ИОГ РАН) при участии Портсмутского и Бременского университетов.

«В ходе этих исследований выявлены и подтверждены биологические эффекты действия ионизирующего излучения, особенно при средних и значительных дозовых нагрузках. В результате исследований достоверно установлены нарушения хромосомного аппарата клеток периферической крови у нескольких специалистов. Из имеющихся медицинских документов наглядно виден эффект нарушений хромосомного аппарата, который медики связывают с последствиями радиационного воздействия» [3.48].

Для оценки внутреннего облучения специалистов были использованы данные, полученные с использованием спектрометра излучения человека (СИЧ-1.4М).

На основании полученных данных был проведен анализ заболеваемости, инвалидности и смертности в зависимости от полученной дозы и года рождения.

Авторы работы [3.49] сообщают следующее.

«Анализ заболеваемости по различным классам заболеваний наглядно демонстрирует возрастную зависимость.

Дозовой зависимости как по отдельным классам заболеваний, так и по заболеваемости в среднем, не наблюдается.

Анализ инвалидности выявил наличие как возрастной так и дозовой зависимости. Дозовая нагрузка является аргументом, позволяющим связывать инвалидность с действием радиации.

Анализ смертности подтверждает логичную возрастную зависимость. Дозовая зависимость смертности отсутствует или скрывается на фоне более значимых факторов. Исследования хромосомных aberrаций для участников с повышенными восстановленными дозами облучения подтверждают наличие повреждений, но не позволяют строго увязать количество повреждений с дозовой нагрузкой».

ЛИТЕРАТУРА

к 3 главе

- 3.1. 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.
- 3.2. Borovoi A.A. Chernobyl Sarcophagus: Safety Problems, IAEA International forum «One decade after Chernobyl: nuclear safety aspects», Vienna, April 1-3, 1996, IAEA-J4-TC972, Working Material, p. 265–286.
- 3.3. Боровой А.А., Евстратенко А.С., Криницын А.П. и др. Динамика радиационной обстановки на объекте «Укрытие». Сборник «Объект «Укрытие»-10 лет, основные результаты научных исследований», Национальная Академия Наук Украины, Чернобыль 1996 г., с. 100–111.
- 3.4. Боровой А.А., Высотский Е.Д., Иванов А.И., Иванов И.Е., Шевченко В.Г., Яковлев Г.В. Система контроля ТСМ объекта «Укрытие» «Финиш». Сборник «Объект «Укрытие» – 10 лет, основные результаты научных исследований», Национальная Академия Наук Украины, Чернобыль 1996 г., с. 128–139.
- 3.5. Боровой А.А., Высоцкий Е.Д., Иванов А.И. и др. Регламентная эксплуатация и развитие информационно-измерительной системы «Финиш», Сборник «Проблемы Чернобыля», выпуск 3, 1998 г., с. 52–54.
- 3.6. Боровой А.А., Богатов С.А., Криницын А.П. и др. Исследование процессов воздушной и водной миграции радионуклидов на промплощадке объекта «Укрытие», Сборник «Проблемы Чернобыля», выпуск 3, 1998 г., стр. 56–59.
- 3.7. Боровой А.А., Богатов С.А., Пазухин Э.М. Современное состояние объекта «Укрытие» и его влияние на окружающую среду, Радиохимия, 1999, т. 41, № 4, с. 368–378.
- 3.8. Богатов С.А., Боровой А.А., Высоцкий Е.Д. и др. Работы по обеспечению безопасности объекта «Укрытие» (1996–2001 гг.). Препринт «Курчатовского института», ИАЭ-6226/11, Москва, 2001 г., 23 с.
- 3.9. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П., Ключников А.А. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС Москва, Наука, 2010, 240 с.
- 3.10. Богатов С.А., Корнеев А.А., Криницын А.П., Симановская И.Я. и др. Проблема воды в объекте «Укрытие» Препринт МНТЦ «Укрытие», Чернобыль, 1999, 21 с.
- 3.11. Боровой А.А. Ядерная безопасность скоплений воды в объекте «Укрытие». Атомная энергия, т. 107, вып. 2, август 2009 г., стр. 91–98.
- 3.12. Боровой А.А., Евстратенко А.С., Криницын А.П. и др. Динамика радиационной обстановки на объекте «Укрытие». Сборник «Объект «Укрытие» – 10 лет», основные результаты научных исследований», Национальная Академия Наук Украины, Чернобыль 1996 г., стр. 100–111.
- 3.13. Боровой А.А., Богатов С.А., Пазухин Э.М. Современное состояние объекта «Укрытие» и его влияние на окружающую среду. Радиохимия, 1999 г., т. 41, № 4, с. 368–378.
- 3.14. Хан В.Е., Огородников Б.И., Калиновский А.К. и др. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2007 г. Сборник «Проблемы безопасности атомных электростанций i Чернобыля», Вип. 9, 2008, с. 48–53.
- 3.15. Отчеты по состоянию безопасности объекта «Укрытие». ГСП ЧАЭС, 1994–2006 гг.
- 3.16. Контроль неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие». Заключительный отчет ИПБ АЭС по договору № 249/07, Чернобыль, 65 с.

- 3.17. Огородников Б.И., Пазухин Э.М., Ключников А.А. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие». 1986—2006 гг., Чернобыль 2008, НАН Украины, ИПБ АЭС, 455 с.
- 3.18. Богатов С.А., Евстратенко А.С., Симановская И.Я. Улучшение радиационной обстановки при ликвидации последствий чернобыльской аварии. Сборник «Проблемы Чернобыля», Выпуск 7, Чернобыль 2001 г., с. 141—148.
- 3.19. Рабочий проект МСПП (SIP 05-4-008-279-016-ПЗ, SIP UKN 01 10GEN 02 043, SIP UNK 03 10 RSR 03 000)
- 3.20. Техническое решение о вводе в опытно-промышленную эксплуатацию МСПП, инв. №11 от 14.04.2004 г.
- 3.21. Контроль неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие». Отчет ИПБ АЭС по договору № 267/08, 2008 г. Приложение Б. Вынос радиоактивных аэрозолей и загрязненность воздуха локальной зоны «Укрытия».
- 3.22. Богатов С.А., Боровой А.А., Дворецкий В.И. и др. Исследование устойчивости наиболее радиологически опасных нуклидов в различных формах топливного выброса Чернобыльской аварии. Препринт ИАЭ-5022/3. — М., 1990.
- 3.23. Баев А.С., Богатов С.А., Быковская Л.И. и др. Расчетно-экспериментальное определение дозовых нагрузок на дыхательную систему при ингаляции «горячих частиц» для персонала, принимавшего участие в работах по ЛПА на ЧАЭС. Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова, ИАЭ-5484/14, Москва — 1992.
- 3.24. Получение экспериментальных данных для определения современного состояния пылевого загрязнения и проведение количественных оценок последствий радиационной аварии на объекте «Укрытие». Отчет по второму этапу договора 78/96. Ответственный исполнитель С.А. Богатов. ТО ОУ № 1432, Чернобыль, 1997.
- 3.25. Богатов С.А., Боровой А.А. Оценка запасов и определение свойств пылевого загрязнения в подкровельном пространстве объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие» № 002, Чернобыль, 2000, 16 с.
- 3.26. Богатов С.А. Оценка запасов и определение свойств пылевого загрязнения в подкровельном пространстве объекта «Укрытие». Препринт МНТЦ «Укрытие», 00-2, Чернобыль — 2000.
- 3.27. Боровой А.А., Лагуненко А.С., Пазухин Э.М. Оценка количества топлива в подапаратном помещении 305/2 4-го энергоблока ЧАЭС. Атомная энергия, т. 84, вып. 4, 1998 г., с. 356—362.
- 3.28. Borovoi A.A., Lagunenkov A.S., Pazukhin E.M. Radiochemical and Selected Physicochemical Characteristics of Lava and Concrete Samples from Sub Reactor Room no. 304/3 of the Fourth Unit of ChNPP and Their Connection with the Accident Scenario. Radiochemistry, Vol. 41, No. 2, 1999, pp. 187—192.
- 3.29. Боровой А.А., Лагуненко А.С., Пазухин Э.М. Новые оценки количества ядерного топлива, находящегося на нижних отметках объекта «Укрытие». Сборник «Проблемы Чернобыля», выпуск 6, Чернобыль 2000 г., стр. 13—16.
- 3.30. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отчет МНТЦ «Укрытие», № 3601, Чернобыль, 1996 г., 272 с.
- 3.31. The Shelter current safety analysis and situation development forecasts (update version). A. Borovoi et. all, Tasis, European Commission, 1998, 103 p.
- 3.32. 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.

- 3.33. Беляев С.Т., Боровой А.А. О преобразовании объекта «Укрытие». Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова № 57-05/110 от 29.09.89 г., 5 с.
- 3.34. Беляев С.Т., Боровой А.А., Бузулуков Ю.Г. Работы на площадке ЧАЭС. Настоящее и будущее «Саркофага». Доклад на международном конгрессе «Ядерные аварии и будущее энергетики. Уроки, вынесенные из Чернобыльской аварии». (Париж 15–17 апреля 1991 года).
- 3.35. Описание объекта «Укрытие» и требования к его преобразованию. Минчернобыль Украины, Академия Наук Украины. Киев; Наукова думка, 1992.
- 3.36. Служебная записка, направленная Министру Минчернобыля Готовицу Г.А. и Генеральному директору ПО ЧАЭС Сорокину Н.М., 2 апреля 1993 г.
- 3.37. Чернобыльский блок 4 План Осуществления Мероприятий на «Объекте «Укрытие» (SIP). 1997 г. 125 с.
- 3.38. Pretzsch G., Lange F., Bogatov S. and Borovoi A. A. Radioactive Dust inside the Chernobyl Sarcophagus. Proc. of Spectrum'98, International Conference on Decommissioning and Decontamination and on Nuclear and Hazardous Waste Management, Sept 13–18, 1998, Denver, Colorado, U.S.A., Vol. 1, pp. 221–226.
- 3.39. Borovoi A., Gavrilov S. Development of the database «Nuclear fuel and radioactive waste in the Shelter of Chernobyl NPP». Preprint IBRAE-2001-01, Moscow 2001, 28 p.
- 3.40. Барьяхтар В.Г., Гончар В.В., Жидков А.В. и др. Радиационные повреждения в лавообразных топливосодержащих материалах объекта «Укрытие»: Препринт МНТЦ «Укрытие» № 98-12, 1998, 23 с.
- 3.41. Жидков А.В. Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния». В сб.: Проблемы Чернобыля, 2001, вып. 7, с. 23–40.
- 3.42. Baryakhtar V., Gonchar V., Zhidkov A., Zhidkov V. Radiation damages and self – sputtering of high radioactive dielectrics: spontaneous emission of submicron dust particles. Condensed Matter Physics, 2002, V. 5, N 3(31), p. 449–471.
- 3.43. Разработка расчетно-аналитической прогнозной модели поведения TCM. SIP FCMP 03 2 EAM 01, 2004 г., 72 с.
- 3.44. Богатов С.А., Боровой А.А., Пазухин Э.М. Результаты исследований долговременного поведения чернобыльских лав в объекте «Укрытие». Препринт РНЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6565/3, Москва, 2009 г., 37 с.
- 3.45. Боровой А.А., Цуриков Д.Ф., Штромбах Я.И. Чернобыльские лавы и остеклованные отходы. Препринт РНЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6626/3, Москва, 2010 г., 31 с.
- 3.46. Bogatov S., Borovoi A., Gavrilov S., Lagunenkov A., Pazukhin E. Half an hour after the beginning of the accident. Moscow, 2006, OKPRINT, 22 p.
- 3.47. Боровой А.А. Материалы по ядерной безопасности объекта «Укрытие». Препринт РНЦ «Курчатовский институт» № 130-11/3 от 06.04.2007, 16 с.
- 3.48. Кухаркин Н.Е., Журбенко А.В., Шикалов В.Ф. Оказание экстренной помощи атомным станциям в случае радиационно-опасных ситуаций. <http://www.securpress.ru/issue/Ss/2005/Jurbin.htm>
- 3.49. Шикалов В.Ф., Усатый А.Ф., Сивинцев Ю.В. и др. Анализ медикобиологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС для участников ЛПА сотрудников Российского научного центра «Курчатовский институт» Мед. радиология и радиационная безопасность. 2002, Т. 47, № 3, с. 23–33.

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

АЗ	Активная зона реакторной установки
АЗФ	Фрагменты активной зоны
«Анализ...»	«Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации».
АУ	Аспирационная установка
АЭС	Атомная электростанция
ББ-1	Бассейн-барботер, первый этаж
ББ-2	Бассейн-барботер, второй этаж
БВ	Бассейн выдержки отработавших тепловыделяющих сборок
БД	База данных
ВНИПИЭТ	Всероссийский научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий (г. Санкт-Петербург)
ВСРО	Вспомогательные системы реакторного отделения
ВТ-2	Вентиляционная труба 2 очереди ЧАЭС
ЧАЭС	Государственное специализированное предприятие ЧАЭС
ГЦН	Главный циркуляционный насос
«Д»	Боковая биологическая (водяная) защита
ДТП	Датчик плотности теплового потока
ДУС	Дистанционно-управляемая система
«Е»	Верхняя плита биологической защиты
ЖРО	Жидкие радиоактивные отходы
ИАЭ	Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, с 1991 г. – РНЦ «Курчатовский институт»
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
ИПЭ АН УССР	Институт проблем энергетики АН УССР
ИЯИ АН УССР	Институт ядерных исследований АН УССР
«КЖ»	Оболочка активной зоны реактора
Курчатовский институт	Федеральное государственное учреждение Российский научный центр «Курчатовский институт», с 2011 г. – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
КЭ	Комплексная экспедиция при институте атомной энергии им. И.В. Курчатова
K_{∞}	Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде
K_{eff}	Эффективный коэффициент размножения нейтронов
«Л»	Боковая биологическая (водяная) защита

ЛПА	Ликвидация последствий аварии на 4 энергоблоке ЧАЭС
ЛПЧ	Лаборатория проблем Чернобыля
ЛТСМ	Лавообразные топливосодержащие материалы
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии
МЗ	Машинный зал
Минсредмаш	Министерство среднего машиностроения СССР
МК	Метод корреляции
МНТЦ, МНТЦ «Укрытие»	Межотраслевой научно-технический центр «Укрытие» при Национальной академии наук Украины (в настоящее время ИПБ АЭС НАНУ)
МСПП	Модернизированная система пылеподавления
МЭД	Мощность экспозиционной дозы γ -излучения
НАНУ	Национальная академия наук Украины
НБК	Новый безопасный конфейнмент
НИИСК	Научно-исследовательский институт строительных конструкций
НИКИМТ	Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажных технологий
НИКИЭТ	Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники
НИО «КЭ»	Научно-исследовательский отдел «КЭ»
ОГ	Оперативная группа Курчатовского институт
ОДКТ	Отдел дистанционных комплексов и технологий
ОМТРИ	Отдел методов и технологий радиационных исследований
«ОР»	Нижняя плита биологической защиты
ОУ	Объект «Укрытие»
ОЯРБ	Отделение ядерной и радиационной безопасности МНТЦ «Укрытие»
ПВК	Пароводяные коммуникации
ПДД	Предельно допустимая доза
ПК	Правительственная Комиссия
ПРК	Парораспределительный коридор
«Радиевый институт», НПО РИ	Научно-производственное объединение «Радиевый институт» им. В.Г. Хлопина (г. Санкт-Петербург)
РАО	Радиоактивные отходы
РАУ	Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»
РБМК-1000	Реактор большой мощности канальный, электрической мощностью 1000 МВт
СПП	Система пылеподавления
СУЗ	Система управления и защиты
СЦР	Самоподдерживающаяся цепная реакция
ТВС	Тепловыделяющие сборки
ТВЭЛ	Тепловыделяющий элемент
ТК	Технологический канал
ТОЯБ	Техническое обоснование ядерной безопасности

ТП	Топливная пыль
TSM	Топливосодержащие материалы
УГВ	Уровень грунтовых вод
ЦЗ	Центральный зал
ЧАЭС	Чернобыльская атомная электростанция
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Общество Технической и Ядерной Безопасности (Германия)
IPSN	Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire Институт Защиты и Ядерной Безопасности (Франция)
SIP	Shelter Implementation Plan (План осуществления мероприятий – ПОМ)

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Работы оперативной группы Курчатовского института (1986–1987 гг.)	7
2. Комплексная экспедиция (1987–1992 гг.)	39
3. Работы Отделения ядерной и радиационной безопасности МНТЦ «Укрытие» и Лаборатории проблем Чернобыля Курчатовского института (1992–2010 гг.)	81
Сокращения и обозначения	127

*Нашим товарищам, украинским и российским
специалистам, которые продолжают в Чернобыле
25-летнюю вахту курчатовцев, мы желаем успехов
и скорейшего завершения работ
по преобразованию объекта «Укрытие»*

А.А. Боровой, Е.П. Велихов. К 25-летию аварии на Чернобыльской АЭС.

Работы «Курчатовского института» по ликвидации последствий аварии. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2011, 132 с.

Специалисты Курчатовского института с первого дня после аварии на ЧАЭС приняли участие в работах по ликвидации ее последствий.

В 1986–1991 гг. более 700 курчатовцев работали на ЧАЭС.

Все дальнейшие годы сотрудники Курчатовского института постоянно занимались проблемами ЛПА как в Чернобыле на разрушенном блоке, так и на московской площадке.

В 1987 г. была создана «Комплексная экспедиция» при Курчатовском институте, главной целью которой стало проведение исследований на объекте «Укрытие».

Затем (с 1992 г.) Курчатовский институт осуществлял научное руководство Отделением ядерной и радиационной безопасности в МНТЦ «Укрытие» НАН Украины.

В настоящей работе рассматриваются важнейшие результаты выполненных Курчатовским институтом работ.

Среди них:

научное руководство созданием объекта «Укрытие»;

определение количества ядерного топлива, оставшегося в пределах объекта «Укрытие» (>95%);

создание систем контроля разрушенного топлива в «Укрытии»;

создание систем контроля на площадке объекта;

создание базы данных по топливу;

разработка документа «Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации»;

Курчатовский институт предложил и обосновал стратегию работ по преобразованию «Укрытия» в экологически безопасную систему.

Ключевые слова: Курчатовский институт, авария на ЧАЭС, объект «Укрытие», ядерное топливо.

Подписано в печать 10.04.2011

Печать цифровая

Тираж 250 экз. Заказ 31

Отпечатано в НИЦ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

