

А. А. Боровой **Внутри и вне
Саркофага**

ОДНА из важнейших задач, которые возникли при ликвидации последствий чернобыльской аварии, — безопасное и долговременное захоронение ядерного топлива, оставшегося в развалинах 4-го блока. Чтобы локализовать это топливо и защитить окружающую территорию от проникающей радиации, построено сооружение, которое в технической литературе называют «Укрытием 4-го блока ЧАЭС», а в прессе — «Саркофагом». Его строительство завершено в ноябре 1986 г. Этим был сделан принципиальный, но, к сожалению, не окончательный шаг на пути к решению проблемы захоронения топлива.

По расчетам проектировщиков, Саркофаг должен простоять 20—30 лет, выдержать 6-балльное землетрясение и ураганные ветры. Однако гарантировать, что разрушенные взрывом и пожаром сотни помещений бывшего 4-го блока останутся под этим сооружением в прежнем состоянии, было нельзя. С уверенностью следовало предположить как раз обратное: разрушения с годами бу-

дут возрастать и, таким образом, расположение ядерного топлива в помещениях блока должно меняться.

Такое предсказание означало, что со временем может возрасти опасность трех видов: ядерная, радиационная и тепловая.

Обсудим это подробнее.

Перемещение масс топлива могло придать им такую конфигурацию, при которой самоподдерживающаяся цепная реакция стала бы более вероятной или даже началась, что неизбежно сопровождалось бы новым выбросом радиоактивности в окружающую среду (ядерная опасность).

При больших обрушениях не исключалась и возможность выброса радиоактивной пыли через щели за пределы Саркофага (радиационная опасность).

Эти же обрушения, перекрыв пути естественного охлаждения топлива, могли вызвать его повторный разогрев и, в итоге, опять-таки попадание радионуклидов в окружающую среду — скажем, по сценарию «китайского синдрома» (тепловая опасность).

Не следует думать, что все эти опасные явления могли бы привести к последствиям, хотя бы в отдаленной степени напо-

© Боровой А. А. Внутри и вне Саркофага.

Журнал "Природа" № 11. 1990



Александр Александрович Боровой, доктор физико-математических наук, заместитель по науке начальника Комплексной экспедиции при Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова в г. Чернобыле. Научные интересы связаны с физикой нейтрино и слабыми взаимодействиями, а также методами регистрации ядерных излучений.

минающим последствия самой аварии. Но они потребовали бы новых сил и средств для дезактивации, увеличили бы коллективную дозу облучения работающих на площадке и принесли бы огромный моральный и материальный ущерб. Нельзя было допустить, чтобы 4-й блок вновь «задышал». Поэтому сразу же после создания Саркофага начались интенсивные работы по предотвращению этих опасностей. Они ведутся и в настоящее время.

КОЛИЧЕСТВО ТОПЛИВА В САРКОФАГЕ

Чтобы дальнейшее изложение было понятно, необходимо остановиться на двух вопросах: что представляло собой топливо к моменту аварии и сколько его осталось внутри Саркофага.

Блок был пущен в декабре 1983 г. и к 26 апреля 1986 г. проработал 865 дней. Топливо — двуокись урана — размещалось в

нем в 1659 кассетах. Полная загрузка собственно урана составляла 190,2 т. Три четверти кассет проработали всю кампанию, именно они определили содержание в активной зоне долгоживущих биологически значимых радионуклидов (таблица).

После аварии α-активность топлива определялась относительно короткоживущим (период полураспада $T_{1/2} \approx 160$ дней) ^{242}Cm . Сегодня первенство перешло к изотопам плутония, однако ненадолго: из-за β-распада ^{241}Pu накапливается ^{241}Am ($T_{1/2} = 430$ лет), и через 10 лет его активность уже составит около 50 % суммарной α-активности топлива.

Основная β- и γ-активность связана, помимо ^{241}Pu , со стронцием и цезием ($T_{1/2} \approx 30$ лет), чье радиационное воздействие уменьшится на порядок только через 10 лет.

Активная стадия аварии продолжалась 10 сут (с 26 апреля по 6 мая 1986 г.). Все это время шел интенсивный выброс радиоактивности. В первые дни горячая струя поднималась на высоту более 1 км, позднее — на сотни метров.

Количество и состав выбрасываемой радиоактивности (а следовательно, и оставшейся в разрушенном блоке) определяли, используя все доступные методы, но сложные условия работы не позволили сделать это с погрешностью менее 50 %.

Параллельно с оценками выброса велись измерения зараженности почвы, воды и воздуха. Такие измерения на тысячах квадратных километров, в сотнях населенных пунктов весьма трудоемки. В общем случае трудно даже представить пути решения этой задачи за сроки порядка месяцев. Но исследователям помогла специфика аварии: радионуклиды (за исключением инертных газов и летучих веществ типа иода, цезия, теллура) были выброшены в составе мелкодиспергированного топлива. Поэтому кропотливые радиохимические анализы могли быть заменены более простыми измерениями γ-активности (в частности, активности ^{134}Ce).

Содержание биологически значимых радионуклидов в реакторе к моменту аварии

Радионуклид	Вид активности	$T_{1/2}$, год	Масса, кг	Активность, Ки
^{238}Pu	α	86	1,5	$2,5 \cdot 10^4$
^{239}Pu	α	$2,4 \cdot 10^4$	420	$2,6 \cdot 10^4$
^{240}Pu	α	$6,5 \cdot 10^3$	175	$4 \cdot 10^4$
^{241}Pu	β	14	50	$5 \cdot 10^5$
^{137}Cs	β, γ	30	81	$7 \cdot 10^5$
^{90}Sr	β	29	43	$6 \cdot 10^5$

К середине июля 1986 г. институты Минсредмаша, Госкомгидромета, АН СССР, Министерства обороны независимо выполнили измерения и расчеты, показавшие, что за пределы 4-го блока выброшено от 2 до 6 % первоначальной загрузки (от 4 до 12 т топлива).

К тому времени уже действовала система определения загрязнений, включавшая измерение γ -полей над поверхностью Земли с помощью аэрогаммаразведки (первое приближение), оперативное исследование почвенных проб (уточнение по корреляции с активностью ^{137}Cs), тщательные радиохимические анализы (проверка коэффициента корреляции для данной местности). На совещании МАГАТЭ в Вене (август 1986 г.) советские специалисты сообщили о результатах расчетов: радиоактивные инертные газы выброшены почти полностью; выброшено значительное количество иода, $(13 \pm 7) \%$ цезия, $(3 \pm 1,5) \%$ топлива, содержащего продукты деления и трансурановые элементы.

Завершая разговор о выбросе, скажем, что за прошедшие годы его оценка уточнилась. Сейчас на основании банка данных, содержащего полные сведения о десятках тысяч почвенных проб, можно утверждать, что из 4-го блока выброшено $3,5 \pm 0,5 \%$ топлива.

Что касается летучего ^{137}Cs , то первоначальная оценка его выброса, с нашей точки зрения, оказалась заниженной. По сегодняшним представлениям, его выброшено 1,5—2 МКи (25—30 % содержания в активной зоне).

СОЗДАНИЕ НОВЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ

При аварии все барьеры безопасности, предусмотренные создателями реактора, были сразу же разрушены взрывом, поэтому требовалось в кратчайший срок возвести новые преграды для ядерной, радиационной и тепловой опасности. Как это делалось, хорошо известно: в шахту реактора сбрасывали различные материалы. Часть из них (поглощающие нейтроны соединения бора) должна была обеспечить ядерную безопасность, другая (доломит, песок, глина) — создать фильтрующий слой и уменьшить выброс активности, третья — (свинец) — поглотить выделяющееся тепло. Всего было сброшено почти 5 тыс. т материалов.

Жаркие споры о необходимости такого мероприятия и о его последствиях шли и до, и после его осуществления. Особенно острой критике подвергалось решение об использовании свинца, который, плавясь и

испаряясь, мог дополнительно загрязнить окружающую среду. И только три года спустя, после большого комплекса разведывательных работ, стало ясно, что спорить не о чем: в саму шахту реактора если и попала, то лишь малая доля сброшенных материалов, основная их часть образовала холмы высотой до 15 м в центральном зале. Не удалось также перекрыть все пути выхода воздуха из шахты, т. е. создать полноценный фильтрующий слой. Причина — неблагоприятная геометрия разрушений.

В первые недели проводились и другие защитные мероприятия, например, под шахту реактора для охлаждения активной зоны и снижения концентрации кислорода подавался жидкий азот.

Весьма опасным представлялся «китайский синдром», для предотвращения которого под фундаментом здания соорудили теплообменник. И хотя летом 1988 г. при бурении скважин обнаружили, что «синдром» не смог развиваться до опасных пределов, можно утверждать, что при том объеме данных о состоянии блока, который мы имели в мае 1986 г., было принято верное решение.

Готовы ли мы вообще ответить на вопросы об эффективности мероприятий, проводившихся в то время? В частности, соизмеримы ли были результаты с затратами? (Я имею в виду не только материальные затраты, но и увеличение коллективной дозы, полученной работавшими.) Думаю, еще не готовы. Однозначного сценария хода аварии пока нет, поэтому откладывается и полный анализ эффективности принятых мер. Тем более нельзя было требовать такого анализа в апреле и мае 1986 г.

КАК СОЗДАВАЛИ САРКОФАГ

Наступление на разрушенный блок началось сразу же после аварии. Во-первых, велась дезактивация прилегающей территории, разбросанные взрывом радиоактивные обломки и грунт из наиболее загрязненных мест собирались в контейнеры. Использовалась самая разная строительно-дорожная техника, в том числе изготовленная в Польше, Финляндии, ФРГ, Японии. Место водителя защищалось свинцом, а воздух поступал через фильтры. Некоторые машины были оборудованы аппаратурой теленаблюдения. Контейнеры позднее помещали в разрушенный блок или вывозили в места захоронения — «могильники». Во-вторых, после предварительной очистки территорию вокруг блока покрыли слоем щебня, песка и бетона толщиной до 1,5 м.

Пока делались эти первые шаги,

конструкторы разрабатывали варианты Саркофага. Никто еще не решал задачи такой сложности и масштабов, к тому же без достоверной информации о состоянии топлива внутри блока и степени разрушения строительных конструкций — проектирование и строительство пришлось вести одновременно с получением такой информации. Понадобилось проработать 18 вариантов проекта, чтобы выбрать из них окончательный. И все же Саркофаг спроектировали за месяц.

Строительство начали с создания стен, отделяющих 4-й блок от 3-го. Чтобы закрыть радиоактивные обломки с северной стороны блока, возвели стену, поднимающуюся гигантскими 12-метровыми уступами. Каждый следующий уступ строили под прикрытием предыдущего. Западная сторона Саркофага (контрфорсная) собрана из металлических секций общей массой почти в 1000 т. Для перекрытия на высоте 60 м установили 165-тонную стальную раму, на которую уложили 27 труб большого диаметра. Боковые скаты собрали из огромных стальных конструкций — «клюшек». Наконец, все это накрыли металлической кровлей. Строительство завершилось в ноябре 1986 г.

При строительстве немало бетона протекло в разрушенное здание, затруднив или сделав невозможным проход во многие помещения. С другой стороны, то, что большую часть топлива покрыл слой «свежего» бетона, значительно улучшило радиационную обстановку и облегчило разведку других помещений.

РАЗВЕДКА ПРИ СООРУЖЕНИИ САРКОФАГА

Пока строился Саркофаг, внутри и вне аварийного блока велись разведывательные и диагностические работы. Для визуальных наблюдений, фото- и телесъемок, измерения радиационных полей, отбора проб аэрозолей использовались вертолеты. Они же доставляли в развал диагностические приборы. Такие работы требовали большой изобретательности, хорошей подготовки и мужества. Но не менее нужными были эти качества для разведки внутри блока. Вопреки оптимистическим замечкам журналистов, не нашлось ни отечественных, ни зарубежных роботов, способных вести разведку среди развалин, в огромных радиационных полях. Если роботы не ломались на старте, они застревали в самых неподходящих местах или вообще отказывались «повиноваться» в мощных полях излучения. Поэтому разведку

вели люди, чаще всего с помощью здесь же усовершенствованных серийных дозиметров, лабораторных приборов, клинических дозиметров, различных накопителей дозы, теплотрических устройств.

Разведчикам удалось пройти, проползти, а чаще всего пробежать по многим помещениям блока и установить там постоянные контрольные приборы. Они, в частности, не увидели проплавлений и разрушений перекрытий на самых нижних этажах, а это означало, что «китайский синдром» там пока не проявился.

К июлю были измерены радиационные поля возле масс топлива, попавших через паровые коммуникации на нижние отметки здания. Вблизи них мощность дозы имела порядок 10^3 — 10^4 Р/ч.

В этой статье нет возможности рассказать о всех методах диагностических исследований, в том числе родившихся во время «мозговых штурмов» — чаепитий, в которых участвовали самые разные специалисты. Упомянем лишь о программе «Буй».

Собственно, сам «буй» — это диагностическое устройство в форме усеченного конуса, начиненное гамма-камерами, измерителями скорости и направления воздушного потока, датчиками температур и тепловых потоков. Каждый буй имел кабель длиной 250 м, свободный конец которого крепился к вертолету или крану «Демаг», доставлявших его в заданную точку. Аппаратура, обрабатывавшая сигналы от буюв, размещалась в сохранившихся и относительно защищенных от радиации помещениях 4-го блока. Подготовка программы заняла около двух месяцев, размещение детекторов — 10 дней.

Установленные 15 буюв (около 160 различных детекторов) давали ценнейшую информацию о состоянии разрушенного реактора. Они действовали до конца сентября 1986 г., когда при строительных работах пришлось вывести из строя кабели связи с центральным пультом.

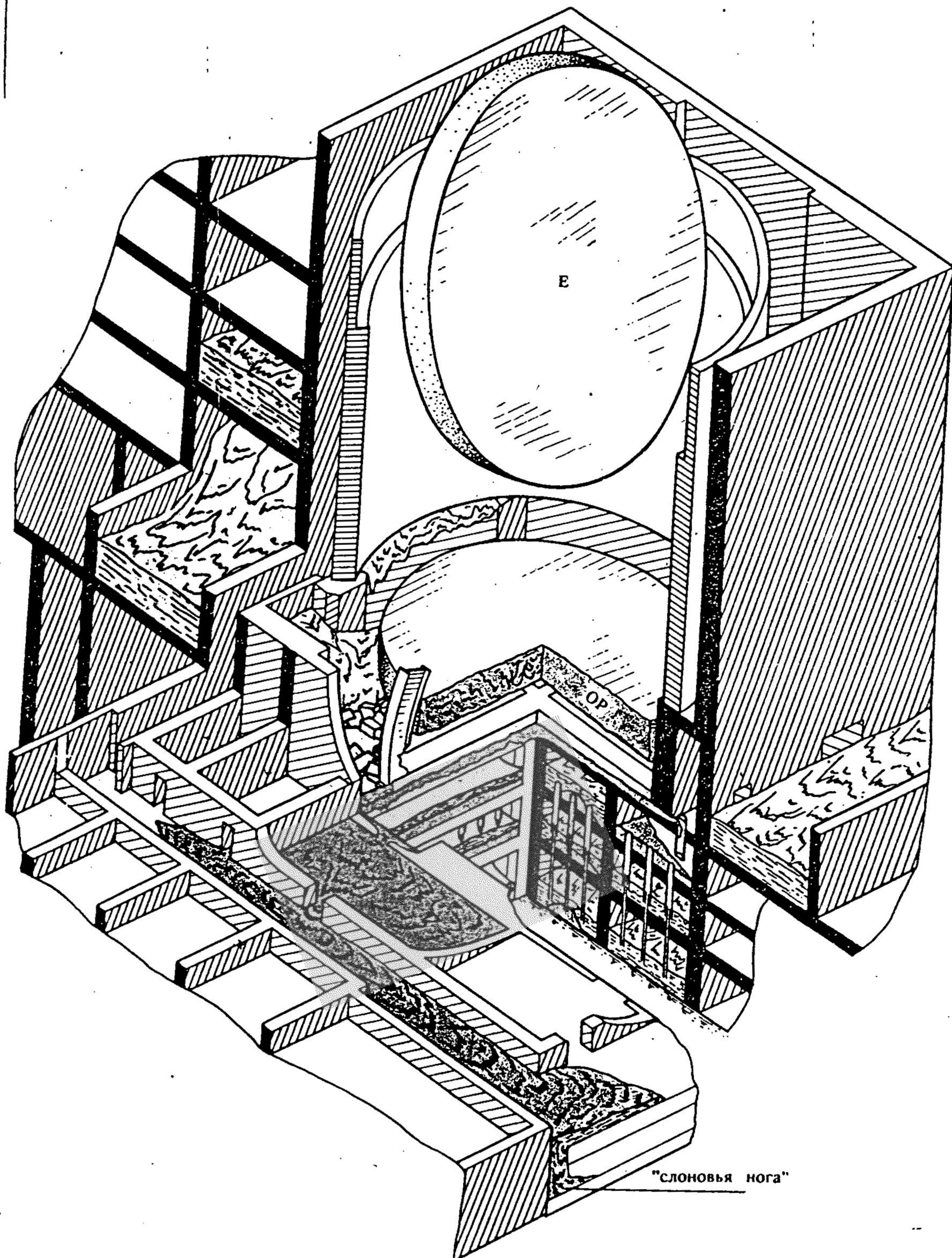
Результаты этих измерений, в частности, показали, что радиационные поля и тепловые параметры разрушенного блока монотонно уменьшаются в соответствии с расчетами, т. е. опасные тенденции в поведении топлива отсутствуют.

ПЛАН РЕШИТЕЛЬНОГО НАСТУПЛЕНИЯ

К концу 1987 г. уже снова работали два блока ЧАЭС и оставались считанные дни до пуска третьего. Требовалось определить степень ядерной опасности топлива в Саркофаге. По нашим сведениям, топливо

Разрез разрушенного блока, построенный по результатам последних исследований. Бетон, попавший в блок при строительстве Саркофага, обозначен не-насыщенным цветом, содержащая топливо ла-

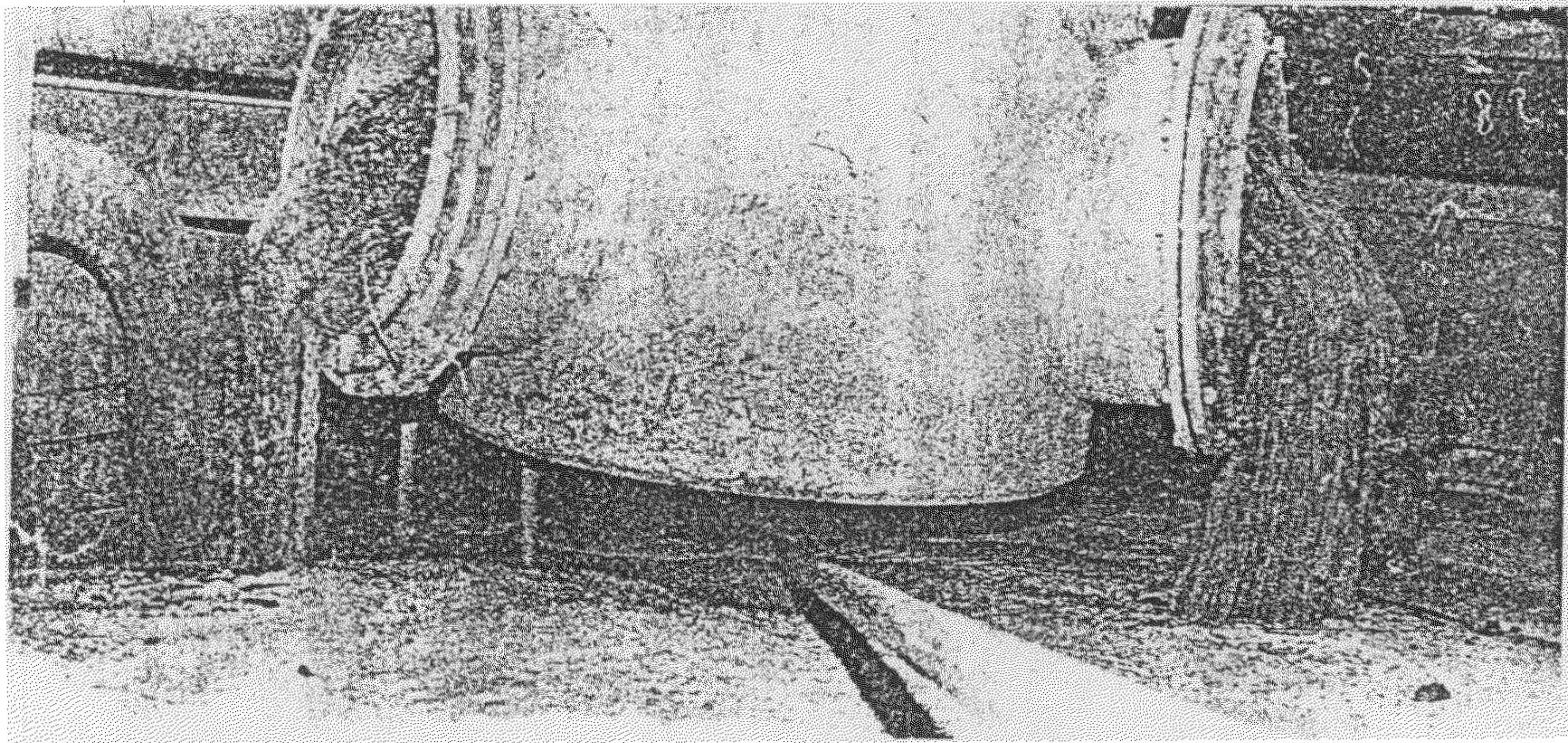
ва — насыщенным. Не показаны остатки каналов и графитовой кладки, лежащие слоем на плите «Основание реактора» (ОР), а также трубы, свисающие с верхней крышки реактора (Е).





Снимок, сделанный через перископ, который сквозь пробуренную скважину выдвинут в шахту реактора. Вместо регулярной кладки графита и каналов в активной зоне — пустое пространство и остатки труб, свисающих со вставшей почти вертикально верхней крышки реактора.

Застывшие потоки лавы из смеси топлива с песком или бетоном, которые вытекли из клапана в парораспределительном коридоре под реактором.



в Саркофаге находилось в разрушенном центральном зале и под каскадной стеной (часть выброшенной при взрыве), в специальном бассейне, где до аварии хранились отработанные твэлы, в шахте реактора (остатки активной зоны), в нижних помещениях блока, куда расплавленное топливо протекло в результате аварии.

Наибольшую ядерную опасность представляли остатки активной зоны в шахте реактора и скопления топлива в нижних этажах. Нужно было максимально прибли-

зить к ним диагностические приборы, а при необходимости — ввести в топливо поглотители нейтронов.

Поэтому решено было очистить и дезактивировать помещения с западной стороны Саркофага, установить в них бурильные станки и через бетонные стены, песчано-гравийную смесь и бак водяной защиты пробурить скважины как в шахту реактора, так и в подреакторные помещения.

Это позволило бы с помощью перископов и телекамер осмотреть недоступные

ранее помещения, определить степень их разрушения и места скопления топлива, а затем подвести к ним детекторы нейтронов, γ -излучения или приборы теплового контроля.

В САРКОФАГЕ

По мере проникновения к эпицентру аварии прояснялось истинное состояние разрушенного реактора. Модельные представления, использовавшиеся в 1986—1987 гг., во многом не подтвердились.

Оказалось, что в шахте реактора сохранилась лишь малая часть фрагментов активной зоны, а верхняя крышка реактора весом более 2000 т наклонена под углом 15° к вертикали и опирается с одной стороны на край металлического бака, с другой — на лежащую на нем железобетонную плиту. С крышки свисает множество оторванных технологических труб. Нижняя крышка после взрыва опустилась на 4 м, смяв массивную крестообразную металлоконструкцию в подреакторном помещении, а примерно четверть ее полностью разрушена.

В основании реактора обнаружен завал из графитовых блоков, конструктивных элементов и «свежего» бетона, залившего и подреакторное помещение, куда попала значительная часть топлива. Расплавив песок, серпентинит, бетон и другие материалы, топливо образовало потоки, напоминающие лавовые, которые через паросбросные клапаны и трубы, кабельные каналы и иные отверстия проникли в парораспределительный коридор, бассейн-барботер, другие коридоры и помещения в нижней части блока. «Лава» застыла в виде множества сталагмитов и наплывов (наплывы с наибольшей активностью получили название «слоновья нога»). Химический состав лавы сильно варьируется, но в ней неизменно присутствует до 20 % UO_2 в виде частиц размером от единиц до сотен микрон.

В 1987 г. лава отличалась высокой прочностью, и, чтобы отколоть куски «слоновьей ноги», применяли стрелковое оружие. Теперь же она утратила твердость, стеклянный блеск и постепенно разрушается, превращаясь в топливную пыль — модификацию топлива, представляющую наибольшую радиационную опасность.

ТОПЛИВНАЯ ПЫЛЬ

Если количество мелкодиспергированного топлива в выбросе оценивается в 6—8 т, то масса топливной пыли внутри Саркофага гораздо больше. Во многих помещениях она

внедрилась в стены и потолок, покрывает пол, висит в воздухе. Когда начали бурить скважины, стремясь проникнуть в 4-й блок, она стала одной из основных помех. Физико-химические свойства топливной пыли («горячих топливных частиц») уже достаточно изучены. В Саркофаге и ближней зоне ЧАЭС наблюдаются в основном два их типа: крупные (десятки микрон), состоящие из одного или нескольких зерен UO_2 , по границам которых разрушались топливные таблетки при взрыве, и мелкие (несколько микрон), образовавшиеся при горении графита, окислении топлива и взаимодействии его с окружающими материалами.

Среднее содержание топлива в мелких частицах — несколько процентов (остальное — неактивный носитель), а уран в них присутствует в форме оксидов со средним составом $\text{UO}_{2,9}$. Именно эти частицы определяют радиоактивность аэрозолей внутри Саркофага.

В связи с этим медикам и биологам предстояло ответить на ряд вопросов: что опаснее — активность, равномерно распределенная в легких, или присутствующая там в виде нескольких частиц?

как быстро выводятся из легких топливные частицы?

применимы ли нормы предельно допустимой концентрации радионуклидов в воздухе к топливной пыли?

В 50—60-х годах уже изучали горячие частицы, образующиеся при ядерных взрывах, и пришли к заключению, что они во всяком случае не опаснее, чем распределенная активность. Однако те частицы содержали только α -активные радионуклиды, а чернобыльские — целый «букет», в том числе излучатели β -частиц с гораздо большим, чем у α -частиц, пробегом. Поэтому прежний опыт здесь применим не в полной мере. Биологические и медицинские исследования роли горячих частиц начаты с большим запозданием, и на поставленные вопросы еще нет ответов. А пока для предохранения работающих в Саркофаге людей от аэрозолей используются средства индивидуальной защиты и дезактивация помещений, опробуются специальные системы очистки воздуха.

СУЩЕСТВУЕТ ЛИ ЯДЕРНАЯ ОПАСНОСТЬ?

Проникнув внутрь Саркофага, удалось приступить к определению ядерной опасности топлива. Для трех обнаруженных модификаций (остатки активной зоны, застывшая

лава и мелкодиспергированная пыль) были установлены критические (с точки зрения ядерной опасности) геометрия и физико-химический состав.

Затем по визуальным и теленаблюдениям, результатам тепловой и радиационной разведки выявили потенциально опасные места и оценили общую массу топлива в них, его химический и изотопный состав. Затем по этим уточненным данным вновь рассчитывалась степень ядерной опасности. Окончательную проверку давали нейтронные исследования — пассивные и активные. В первых использовались источники нейтронов, имеющиеся в облученном топливе — трансурановые элементы (^{240}Pu , ^{242}Cm и ^{244}Cm), испускающие нейтроны при спонтанном делении. Если отношение измеренного потока Φ_z к расчетному Φ_p больше 1, то это означает, что в скоплении топлива нейтроны могут размножаться.

Во втором методе нейтроны от импульсного нейтронного генератора инжестировались в топливную массу и измерялось время спада их потока после инъекции.

Результаты позволяют однозначно заключить, что массы топлива в Саркофаге подкритичны и самоподдерживающаяся реакция невозможна даже при постепенном разрушении здания и перемещении топлива.

БУДУЩЕЕ САРКОФАГА

На первое место теперь выдвинулась радиационная опасность. При обрушении строительных конструкций внутри Саркофага радиоактивная пыль через щели в кровле и стенах (а суммарная площадь таких щелей оценивается в 1000 м^2) может выйти наружу. Наибольшие опасения вызывают неустойчивые железобетонные конструкции верхней части разрушенного блока, висят над шахтой реактора верхняя крышка, частично сожженный и испытывающий значительные механические и тепловые нагрузки пол под реакторного помещения и т. п. Поэтому при любом варианте долговременного захоронения топлива сначала необходимо укрепить эти конструкции.

Что же дальше?

На многочисленных обсуждениях высказываются самые разные предложения (в частности, о полной разборке Саркофага, перезахоронении радиоактивности и разбивке на месте 4-го блока зеленой лужайки). Но внешняя эффективность проекта еще не свидетельствует о его экономической и экологической эффективности. Поэтому попробуем рассуждать последовательно. Прежде всего следует оценить, насколько возмож-

но и целесообразно поддерживать безопасное состояние Саркофага в течение, скажем 10—15 лет. Конечно, полная оценка требует много времени и еще не готова. Однако ясно, что со временем коррозия металлических конструкций, разрушение отдельных бетонных блоков и плит заставят почти непрерывно вести работы по укреплению отдельных конструкций, расположенных внутри объекта. А это потребует больших материальных затрат, связано с облучением людей и к тому же имеет смысл лишь в том случае, если после станет возможна полная или частичная разборка объекта.

Пока даже для частичной разборки Саркофага, содержащего десятки тонн радиоактивной пыли, сотни тонн высокоактивной лавы, тысячи тонн сильно загрязненного бетона, нет пригодных технических средств и решений. Только очистка и укрепление конструкций в машинном зале аварийного блока, проведенные в 1988 г., потребовала материальных затрат в десятки миллионов рублей и напряженной работы тысяч людей в условиях повышенных радиационных полей в течение года. А, по оценкам, в машинном зале находилось почти в сто раз меньше топлива, чем в Саркофаге, причем там оно было в открытом, относительно удобном для удаления виде. Так что вариант «зеленой лужайки» в ближайшие десятилетия представляется весьма проблематичным.

Думается, более приемлем другой вариант. В ближайшие годы внешнюю часть Саркофага нужно будет перестроить. Созданный при этом объект «Укрытие-2» должен быть настолько прочным и герметичным, чтобы любые внутренние обрушения не отражались на его прочности и не ухудшали радиационную обстановку на площадке. При этом отпадут надобность в сложных операциях по поддержанию безопасного состояния конструкций Саркофага и все трудности, связанные с его разборкой. Дистанционные методы строительства позволят минимизировать дозы облучения людей.

Объект «Укрытие-2», созданный на сотни лет, резко упростит долговременное хранение топлива в разрушенном блоке и высвободит значительные средства для других работ по ликвидации последствий аварии. В то же время он позволит потомкам при желании и умении осуществить проект «зеленой лужайки».

Конечно, эти предложения не исключают подробную проработку других вариантов долговременного захоронения топлива, которая должна быть закончена в ближайшем будущем.