



Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИВРАЕ-2012-01

Preprint IBRAE-2012-01

Р.В.Арутюнян, А.А.Боровой

МЕРЫ ПО ЛОКАЛИЗАЦИИ АВАРИИ НА ЧАЭС

Москва
2012

Moscow
2012

Арутюнян Р.В., Боровой А.А., и др. МЕРЫ ПО ЛОКАЛИЗАЦИИ АВАРИИ НА ЧАЭС. — Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № ИБРАЭ-2012-01. М. : ИБРАЭ РАН, 2012. — 54 с. — Библиогр.: 49 назв.

В предлагаемой работе авторы опирались на детальную модель протекания активной стадии аварии, которая была разработана совместно НИЦ «Курчатовский институт» и ИБРАЭ РАН в 2006 – 2008гг. Сначала описывается существовавшее на период сразу после аварии (апрель — май 1986г.) понимание ситуации и проведенные на его основе мероприятия, затем дается анализ их эффективности с точки зрения знаний сегодняшнего дня.

Важнейшей стабилизационной мерой, которая привела к эффективной защите окружающей среды от радиоактивных материалов, сосредоточенных в разрушенном 4-ом блоке, было строительство «Укрытия 4-го блока ЧАЭС». Некоторые вопросы, связанные с созданием этого объекта, также рассматриваются в настоящей работе.

В заключительной части работы приведены некоторые предварительные оценки и выводы по аварии, произошедшей 11 марта 2011г. на японской АЭС Фукусима Дайичи.

©ИБРАЭ РАН, 2012

Arutyunyan R.V., et al. LOCALIZATION OF THE CHERNOBYL ACCIDENT MEASURES. — Preprint / Nuclear Safety Institute RAS IBRAE-2012-01. — Moscow : NSI RAS, 2012. — 54 p. — Refs.: 49 items.

©Nuclear Safety Institute, 2012

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

АЗ	Активная зона реакторной установки
АСКРО	
АЭС	Атомная электростанция
ББ-1	Бассейн-барботер, первый этаж
ББ-2	Бассейн-барботер, второй этаж
ВНИПИЭТ	Всероссийский научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий (г. Санкт-Петербург)
«Е», Сх. «Е»	Верхняя плита биологической защиты
ЖМ	«Жертвенные материалы»
ИБРАЭ РАН	Институт проблем безопасного развития атомной энергии Российской Академии Наук
«КЖ»	Оболочка активной зоны реактора
НИЦ «Курчатовский институт»,	Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт»
КЭ	Комплексная экспедиция при институте атомной энергии им. А.В. Курчатова
K_{∞}	Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде
$K_{эфф}$	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
Минсредмаш	Министерство среднего машиностроения СССР
МЭД	Мощность экспозиционной дозы γ -излучения
НВК	Нижние водяные коммуникации
«ОР», Сх. «ОР»	Нижняя плита биологической защиты.
ОУ	Объект «Укрытие»
ПК	Правительственная комиссия
ПРК	Парораспределительный коридор
РАО	Радиоактивные отходы
РБМК, РБМК-1000	Реактор большой мощности канальный, электрической мощностью 1000 МВт
«С»	Схема крест
СУЗ	Система управления и защиты
СЦР	Самоподдерживающаяся цепная реакция
ТВЭЛ	Тепловыделяющий элемент
ТСМ	Топливосодержащие материалы
УЛР	Устройство локализации расплава
ЦЗ	Центральный зал
SIP	Shelter Implementation Plan (План осуществления мероприятий – ПОМ)
ТЕРСО	Токийская энергетическая компания
ТМІ-2	АЭС Три Майл Айленд (Трехмильный остров) 2 блок

ВВЕДЕНИЕ

С момента аварии на ЧАЭС прошло уже более 25 лет. Все эти годы сначала на 4-ом блоке, потом на закрывшем его объекте «Укрытие», велись работы по ликвидации последствий аварии и исследования, в обеспечение этих работ.

При этом, специалисты, по мере накопления информации, часто возвращались к оценке мероприятий, проведенных в первые дни после аварии, во время ее «активной стадии» (с 26 апреля по 6 мая 1986г.), стремясь понять правильность и своевременность предпринятых действий

Ведь именно на активной стадии из разрушенного реактора были выброшены десятки миллионов кюри радиоактивности, что и определило перерастание аварии в катастрофу, в результате которой были загрязнены территории Беларуси, Украины, России.

Авторы настоящей работы также периодически обращались к этой теме (см., например, [1 – 5]). Это было связано с несколькими причинами.

Во-первых, с принципиальной важностью принятых тогда решений и выбранных способов их реализации.

Во-вторых, как уже говорилось, с постоянно накапливающейся информацией, которая позволяла более обосновано провести анализ первых мероприятий.

Наконец, в-третьих, с желанием внести ясность в вопросы, относительно которых не перестают множиться откровенные спекуляции.

В дальнейшем мы будем рассматривать только те контрмеры, которые были непосредственно связаны с локализацией аварии на разрушенном реакторе¹.

Оценка правильности и своевременности этих контрмер требует понимания процессов, реально происходивших в это время в разрушенном блоке. Такое понимание пришло далеко не сразу.

В основу первой модели, точнее - первого описания протекания активной стадии аварии легло представление о том, что решающую роль в прекращении радиоактивного выброса и локализации аварии сыграли материалы, сброшенные с вертолетов в шахту реактора.

Именно эта модель была изложена в докладе советской делегации в МАГАТЭ.

«На первой стадии аварии произошел выброс диспергированного топлива из разрушенного реактора. Состав радионуклидов на этой стадии выброса примерно соответствует их составу в облученном топливе, но обогащен летучими нуклидами йода, теллура, цезия, благородных газов.

На второй стадии с 26 апреля по 2 мая 1986г. мощность выброса за пределы аварийного блока уменьшалась из-за предпринимаемых мер по прекращению горения графита и фильтрации выброса...

Третья стадия выброса характеризуется быстрым нарастанием мощности выхода продуктов деления за пределы реакторного блока. Это обусловлено нагревом топлива в активной зоне до температур выше 1700⁰С за счет остаточного тепловыделения.

Последняя, четвертая стадия, наступившая после 6 мая, характеризуется быстрым уменьшением выброса». [6].

В последующих публикациях эта модель излагалась подробнее.

¹ Мы также не включили в рассмотрение меры, принятые для борьбы со вспыхнувшими пожарами. Отметим только, что благодаря героическим действиям пожарных очаги возгорания, находящиеся вне разрушенного реактора, к утру 26 апреля были ликвидированы.

Основные процессы объяснялись воздействием сброшенных материалов. Сначала, по мнению авторов, произошло охлаждение - свинец принял на себя часть выделяющегося тепла. Затем, засыпка шахты реактора сыпучими материалами вызвала падение выброса и, одновременно, в результате уменьшения теплосъема воздушным потоком - подъем температуры. В конце активной стадии произошел как бы прорыв радиоактивности, увеличение выброса и после этого резкое его падение (6 мая). Казалось, что предложенная динамика выброса, полностью объясняет наблюдавшуюся картину (см. рис. 1).

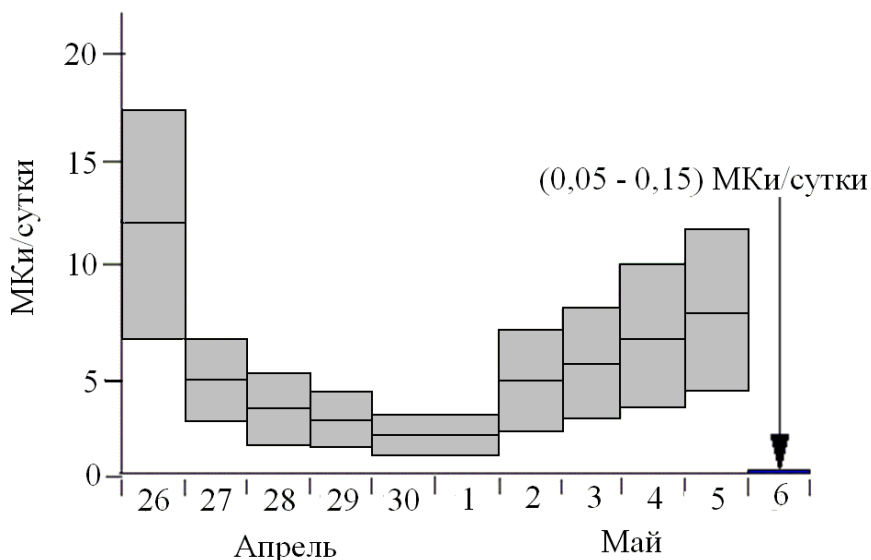


Рис.1. Интенсивность выброса радиоактивности из разрушенного блока в период активной стадии аварии. Погрешность оценки выброса $\pm 50\%$. Значения выброшенной активности пересчитаны на 06.05.86г. (конец активной стадии) с учетом радиоактивного распада

Однако то, что представлялось логичным в 1986г. было пересмотрено уже в первые годы систематических исследований внутри «Укрытия» - в 1988 – 1990гг. (см., например, [1, 3, 7]). Эти исследования показали, что основное предположение, на котором строилась первоначальная модель «четырех стадий» - определяющем влиянии сброшенных материалов, которые засыпали шахту реактора толстым слоем, не соответствовало действительности.

Ниже мы подробнее рассмотрим этот вопрос.

Модель, созданная Э.М. Пазухиным, использовала данные многолетних исследований (1986 – 93гг.) на объекте «Укрытие» [8]. В ней, в соответствии с данными наблюдений за скоплениями топлива, анализами большого количества проб топливосодержащих и конструкционных материалов, описаны основные химические и тепловые процессы, происходившие после аварии в разрушенном реакторе.

В этой модели для объяснения образования $\sim 1200\text{м}^3$ топливной лавы (ЛТСМ) с наблюдаемым химическим составом не понадобилось привлекать заметное количество сброшенных материалов.

Следует отметить, что и до, и после статей Э.М. Пазухина предлагались самые необычные сценарии протекания аварии, в которых авторы не особенно заботились о научном обосновании своих фантазий (см., например, [9 -10]). Мы их рассматривать не будем. В предлагаемой работе авторы опирались на более детальную модель протекания активной стадии аварии, которая была разработана совместно НИЦ «Курчатовский институт» и ИБРАЭ РАН в 2006 – 2008гг. [11].

При этом принят следующий порядок изложения материала. Сначала описывается существовавшее на тот момент (апрель – май 1986г.) понимание ситуации и проведенные на его основе мероприятия, затем дается анализ их эффективности с точки зрения знаний сегодняшнего дня.

Важнейшей стабилизационной мерой, которая привела к эффективной защите окружающей среды от радиоактивных материалов, сосредоточенных в разрушенном 4-ом блоке, было строительство «Укрытия 4-го блока ЧАЭС». Некоторые вопросы, связанные с созданием этого объекта, также рассматриваются в настоящей работе.

Мы не могли пройти мимо такого события, как авария 11 марта 2011г., произошедшая на японской АЭС Фукусима Дай-ичи. Хотя полный анализ ее причин и правильности принятых в первые дни решений может быть сделан только после публикации всей имеющейся информации, в «Заключении» приведены некоторые предварительные оценки и выводы.

1. ПЕРВЫЕ ЧАСЫ ПОСЛЕ АВАРИИ.

1.1. Общие замечания.

При крупнейших авариях на атомных станциях, таких, как Уиндскейл, Три Майл Айленд, Чернобыльская, а теперь и Фукусима Дай-ичи, ни исходные события, ни, тем более, ход аварии не были предусмотрены ни в каких документах и явились неожиданностью для эксплуатирующего персонала, проектировщиков и ученых.

В этом случае быстрота локализации аварийных процессов и тяжесть их последствий зависят уже не от правильности выполнения конкретных регламентов и инструкций - их просто нет.

Успех работы зависит от возможностей руководства и персонала правильно оценить сложившееся положение и принять необходимые контрмеры, от способности проектировщиков и ученых оперативно разработать локализационные и последующие мероприятия по ЛПА, от четкой работы местных и государственных органов в условиях аварии. И, прежде всего, необходима оперативная и возможно более полная информация о происходящем.

Именно недостаток такой информации стал причиной потери здоровья и гибели людей в первые часы после чернобыльской аварии, произошедшей 26 апреля 1986г. в 1 час 23 минуты 50секунд.

1.2. Отсутствие радиационного контроля в первые часы после аварии.

Первым указанием на то, что при аварии не только разрушена верхняя часть здания 4-го блока, но и поврежден сам реактор, должны были стать высокие значения мощности экспозиционной дозы гамма излучения в помещениях блока и вокруг него.

Однако, оказалось, что в распоряжении персонала нет дозиметрических приборов, способных регистрировать уровни МЭД большие 1000 микрорентген в секунду (3,6 Р/час)².

И хотя измерения, проведенные начальником штаба гражданской обороны С.С. Воробьевым, показывали, что МЭД в отдельных местах на площадке блока превышает 200 Р/час (предельное значение для используемого им прибора - ДП-5), руководство станции, поддавшись стремлению все толковать в оптимистическом ключе, не приняло эти данные во внимание [12].

² Приборы, имеющие более высокий верхний диапазон регистрации МЭД, оказались запертыми в помещении, которое не удалось вскрыть

Ночью 26 апреля директор ЧАЭС В.П. Брюханов передавал в вышестоящие инстанции, «Реактор цел, продолжаем подавать воду в аппарат, уровень радиации в пределах нормы. Погиб Валерий Ходемчук, а Владимир Шашенок получил стопроцентный ожог поверхности кожи и находится в тяжелом состоянии» [13].

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

И даже в 10 часов утра, когда заместитель главного инженера станции А. А. Ситников³, который по заданию руководства обследовал реакторное отделение 4-го блока и своими глазами видел состояние центрального зала и разрушенный реактор, доложил об этом главному инженеру и директору ЧАЭС ему не поверили.

Вместе с тем, в их руках был инструмент, позволявший оповестить сотрудников о грозящей им опасности.

«На ЧАЭС существовала система аварийного оповещения персонала, которая, в основном, отвечала требованиям и позволяла в короткие сроки довести сигнал радиационной опасности до работников станции и населения, а также выдать информацию о складывающейся обстановке.

Однако из-за нерешительности дирекции ЧАЭС и неспособности его в первые часы после аварии правильно и полно оценить обстановку, система эта не была задействована. В результате информация об обстановке в районе ЧАЭС поступила с большим опозданием» [14].

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

Практически весь персонал 4-го блока подвергся переоблучению.

Не сразу был остановлен 3-ий блок, находящийся в том же здании, что и аварийный 4-ый, продолжали работать 1-ый и 2-ой блоки. Их приточная вентиляция, всасывая загрязненный воздух, постепенно наполняла помещения радиоактивными аэрозолями. Все больше людей на станции попадали под действие радиоактивного излучения (всего в этот день в ночную смену на станции было ~ 400 человек).

Во многих случаях рядовые сотрудники ЧАЭС проявили в условиях аварии высокое человеческое мужество и хорошую профессиональную подготовку. Они понимали, что произошли события с чрезвычайно тяжелыми последствиями, но для оценки истинных масштабов аварии правдивой информации от руководства не имели.

В целом, АЭС оказалась полностью не подготовленной к радиационной аварии. Не были предусмотрены приборы дистанционного контроля, которые находясь в помещениях, расположенных недалеко от реактора, имели бы противоаварийное исполнение, поэтому не вышли бы из строя и могли снабдить персонал необходимой информацией. Не было и нормально работающей системы АСКРО, которая позволила бы оперативно оценить интенсивность, направление и характер выброса уже в первые часы после аварии.

Только к 14 час офицеры штаба ГО Украины доложили о том, что значения МЭД у стен блока превышают 700 Р/час [12].

³ Умер от острой лучевой болезни 5 мая 1986г.

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

На рис.2 представлена такая карта-схема, отражающая радиационную обстановку на территории вокруг аварийного блока, сложившуюся к вечеру 26 апреля. Она построена на основании обобщенных данных, переданных в «Курчатовский институт», Институт биофизики и др. (см., например, [15])¹.

Из-за неравномерности загрязнений наблюдаемые мощности доз колебались от десятков миллирентген в час до тысяч рентген в час. Такие большие значения наблюдались вблизи разрушенного блока и у фрагментов активной зоны.

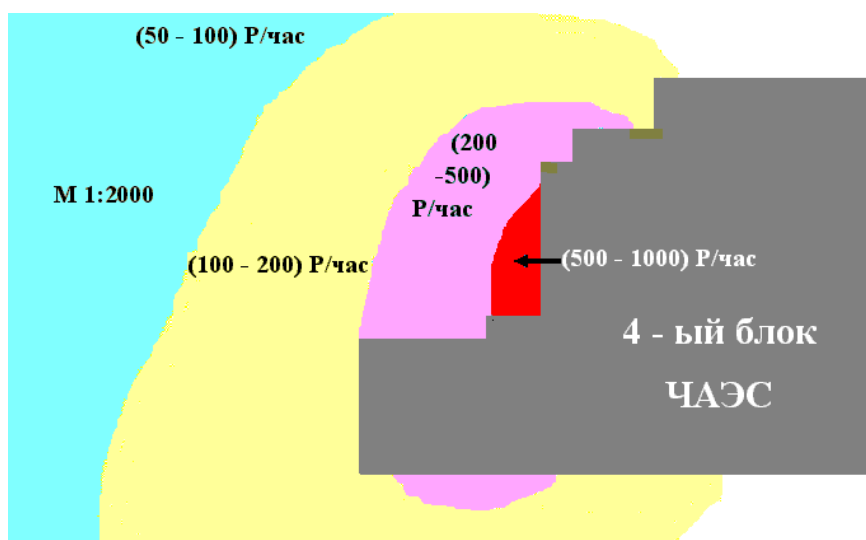


Рис. 2. Схема радиационных полей (величина МЭД) вокруг разрушенного 4-го блока ЧАЭС по состоянию на 26 апреля 1986 г.

Таким образом, только к вечеру 26 апреля, к приезду в Припять Правительственной комиссии, начала складываться истинная картина произошедшего.

1.3. Подача воды в разрушенный реактор.

Сразу же после начала аварии предпринимались меры для прекращения разогрева активной зоны и предотвращения горения графита. В реактор пытались подать максимальное количество воды с помощью аварийных и вспомогательных питательных насосов.

Из анализа многих литературных источников (например, [16 - 18]), несмотря на то, что в них содержится и противоречивая информация, общая картина представляется следующей.

Воду в реактор начали подавать вскоре после взрыва между двумя и тремя часами ночи. Задвижки, которые препятствовали ее нормальному течению, были открыты полностью (вручную) не ранее четырех часов утра.

Появившийся на станции главный инженер Н.М. Фомин постоянно настаивал на подаче воды, исходя из неверных представлений о том, что реактор цел.

Вскоре выяснилось, что эта мера приводит к возникновению новых видов опасности.

Высокорadioактивная вода «... заливала нижние отметки не только четвертого и третьего блоков имеющих много общих коммуникаций, но проникала и в кабельные каналы еще

работающих на полной мощности первого и второго блоков. Эту воду персонал АЭС под руководством Н.М. Фомина и его заместителя по науке М.А. Лютова откачивали в различные емкости, в том числе даже в системы аварийного слива трансформаторного масла, с использованием переносных насосов типа «Гном» [17].

(Ситуация, похожая на то, что происходило но в несравненно больших масштабах на АЭС Фукусима-1 в 2011г.).

В результате вода «проникла в помещение электротехнических сборок, от которых велось энергообеспечение систем расхолаживания, в том числе аварийных, предназначенных для охлаждения активных зон неповрежденных энергоблоков, т.е. возникла ситуация, при которой надо было заботиться о безопасности еще трех реакторов» [17].

К девяти утра вода в деаэраторах кончилась, и работающий питательный насос остановился⁴, прекратив заливать отрицательные отметки 4-го блока ЧАЭС⁵.

Приводимая в ряде источников оценка времени подачи воды - около 12 часов, по-видимому, завышена. Скорее всего, эта процедура продолжалась не более 9 часов.

Для борьбы с радиоактивной водой, залившей нижние отметки блоков, были привлечены пожарные.

«Им было поручено откачать загрязненную радиацией воду из подреакторных помещений. Как впоследствии оказалось – это 6 – 8 тыс. куб.м. Для проведения такой работы в радиоактивной зоне потребовалось проложить пожарные рукава длиной более километра, подвести их под реактор, где, по расчетам дозиметристов, можно было находиться всего 5 – 7 минут. Работа началась вечером. Насосную станцию установили в сроки в 3 раза меньше нормативных. Пожарные рукава протягивали 11 добровольцев ... Откачка загрязненной воды, в выделенные для этого емкости, продолжалась двое суток» [19].

Насколько эффективна была эта мера – подача воды в разрушенный реактор?

В результате взрывов активная зона была полностью разрушена и в шахте реактора образовалась «куча» из фрагментов топливных сборок, графита, обломков бетонных плит и т.п. (см. ниже). Трубопроводы, по которым подавалась вода, были повреждены еще на подходе к реактору. При таких условиях трудно предположить, что вода могла как-то охлаждать эту «кучу» и влиять на течение дальнейших процессов.

К тому же, свидетельства большинства очевидцев указывают на то, что основной ее поток устремился по периферийным помещениям.

Итак, с подавляющей вероятностью подача воды положительных результатов не принесла, а только привела к дополнительному облучению людей.

2. ПРАВИТЕЛЬСТВЕННАЯ КОМИССИЯ. ПЛАНЫ ПО ЛОКАЛИЗАЦИИ АВАРИИ.

2.1. Первые шаги.

26 апреля в 11 утра Председатель Совета Министров СССР Н.И.Рыжков подписал постановление о создании Правительственной комиссии для расследования причин и ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС⁶.

Председателем комиссии был назначен Б.Е. Щербина, заместитель Председателя СМ СССР. В ее состав вошли 12 человек. Среди них - А.И. Майорец (министр энергетики и электрификации СССР), А.Г. Мешков (первый заместитель министра среднего машиностроения), В. А. Сидоренко (первый заместитель Председателя Госатомнадзора

⁴ <http://www.bluesbag6.narod.ru/index.html>

⁵ В Москву продолжали уходить донесения о непрерывной подаче воды в реактор.

⁶ Распоряжение Совета Министров СССР от 26. 04. 86 г. № 830. В сентябре 1986 года было принято решение о переименовании ПК в Правительственную комиссию по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС

СССР) и В.А. Легасов (первый заместитель директора Института атомной энергии им. И.В. Курчатова).

Перед Правительственной комиссией были поставлены следующие задачи.

- Провести анализ причин аварии и разработка на их основе рекомендаций по недопущению подобных ошибок на АЭС страны, имеющих аналогичные реакторы;
- Разработать оперативные мероприятия по локализации катастрофы и ликвидации её последствий;
- Организовать защиту населения от воздействия радиоактивных веществ взорвавшегося реактора.

Комиссия прибыла в г. Припять 26 мая около 20 час. «Она обнаружила полностью деморализованное руководство станции и с этого часа все управление работами взяла на себя» [20]. Сначала были заслушаны доклады специалистов о состоянии 4-го блока, состоянии других блоков, о радиационной обстановке и др. После чего, был принят ряд решений, среди которых обычно выделяют следующие [21]:

- об остановке первого и второго блоков АЭС и переводе их (вместе с 3 блоком) в режим длительной консервации;
- об эвакуации населения города Припяти и поселка Янов (по готовности – 27 апреля);
- о начале работ по забрасыванию с вертолетов разрушенного реактора материалами, способствующими локализации аварии.

2.2. Три вида опасности.

Последнее решение было напрямую связано с тем, что оставшееся в реакторе ядерное топливо грозило сразу тремя видами опасности:

- ядерной,
- тепловой,
- радиационной.

Ядерная опасность.

Главное опасение вызывал тот факт, что в разрушенном 4-ом блоке мог остаться неповрежденным значительный кластер уран-графитовой кладки. Об этом заговорили сразу, а первые расчеты, были выполнены к началу мая 1986г. [22]. Они показали, что действительно, «при отсутствии воды и стержней СУЗ коэффициент размножения K_{∞} структуры РБМК-1000 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 $10.3 \text{ МВт}\times\text{сутки}/\text{кг} \text{ (U)}$.

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 [22]).

В то же время специалисты отмечали, что после взрывов сохранение такого большого кластера реактора маловероятно, а время его гипотетической, неуправляемой работы мало – кластер сильно нагреется и развалится.

Тепловая опасность.

На заседании Правительственной комиссии созданной для расследования причин и ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (вечером 26 апреля 1986г.) среди других вопросов обсуждался и вопрос о так называемой «тепловой опасности».

В разрушенном реакторе мог образоваться расплав из ядерного топлива и других материалов активной зоны, имеющий высокую температуру и обладающий огромной радиоактивностью. Такой расплав способен прожигать одно за другим перекрытия здания и, наконец, попасть в грунт и загрязнить грунтовые воды.

Процесс этот имел и неофициальное название - «китайский синдром», по имени художественного фильма, в котором обыгрывалась аналогичная ситуация.

Когда высказывались эти опасения перед глазами специалистов стоял пример крупнейшей (до Чернобыля) аварии, случившейся на АЭС Три Майл Айленд (Трехмильный остров) в штате Пенсильвания США. В результате этой аварии расплавилось около половины активной зоны, а образовавшийся кориум (расплав материалов АЗ) опустился на дно металлического бака ядерного реактора (см., например [23] и рис.3).

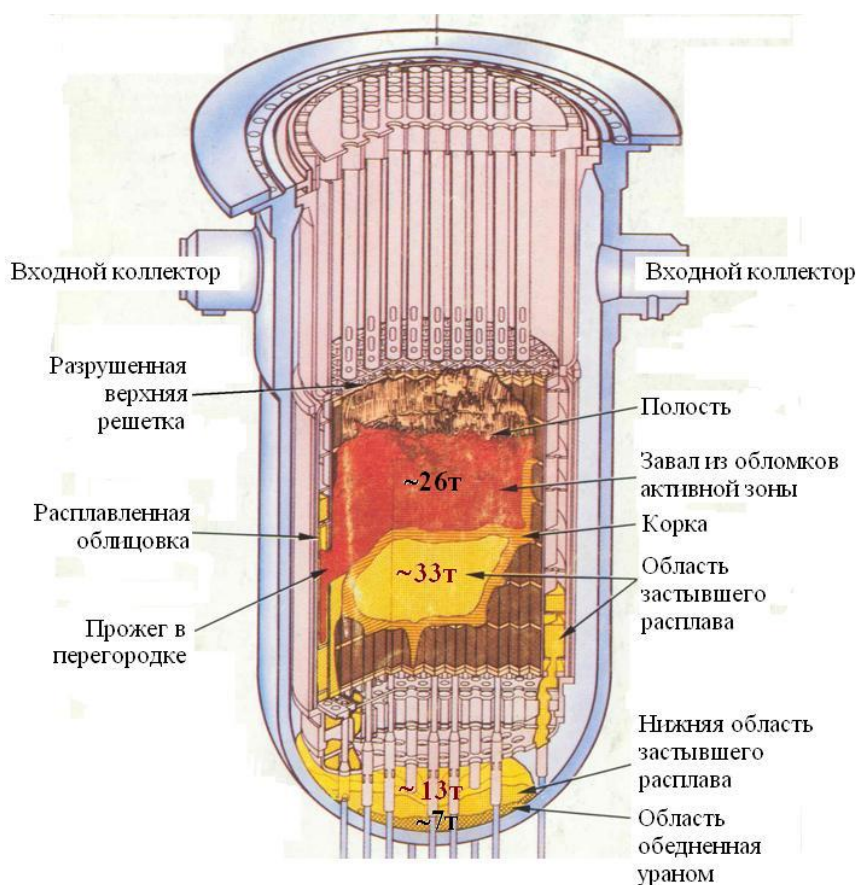


Рис.3. Разрез реактора 2-го блока АЭС Три Майл Айленд после аварии.

Область застывшего расплава образовалась из топлива (UO_2) и оболочек ТВЕЛ-ов (сплав Zr). Эта область содержит $(U, Zr)O_2$ и имеет в своем составе примеси Fe, Ni, Cr и других материалов, входивших в состав конструкций АЗ.

Радиационная опасность.

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

«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» [3].

3. СБРОС С ВЕРТОЛЕТОВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ АВАРИИ.

3.1. Назначение сброшенных материалов. Их количество и состав.

Нам не удалось выяснить, кто первый предложил это мероприятие, скорее всего, это было мнение нескольких членов ПК, поддержанное остальными. Вот, что пишет об этом В.А. Легасов в своих воспоминаниях [24].

«Поскольку радиационная обстановка позволяла эффективные действия только с воздуха и с высоты не менее 200 м над реактором, и соответствующей техники, которая могла бы традиционно, с помощью воды, пены и других средств прекратить горение графита, не было, надо было искать нетрадиционные решения. Мы начали об этом думать. Наши размышления сопровождалась постоянными консультациями с Москвой, где у аппарата ВЧ постоянно находился А.П. Александров, ряд сотрудников Института атомной энергии, сотрудники Министерства энергетики. И каждая служба держала соответствующую связь со своими московскими организациями. Уже на следующий день пошли различные телеграммы, предложения из-за рубежа, с разными вариантами воздействия на горящий графит с помощью различных смесей».

После проведенных консультаций, уточнилась номенклатура материалов, которыми с вертолетов забрасывалась шахта реактора.

Часть сбрасываемых материалов (соединения бора, в частности B_4C) являлась нейтронными поглотителями и должны были обеспечить ядерную безопасность. Часть (глина, песок, доломит) предназначалась для создания фильтрующего слоя и уменьшения радиационного выброса. Кроме того, доломит $(MgCa)(CO_3)_2$, попадая в область высоких температур, должен был разлагаться и образовывать двуокись углерода, которая могла обеспечить «газовое перекрытие» - лишить горящий графит кислорода. Наконец, последняя часть (свинец), должна была принять на себя выделяющееся тепло, расплавиться и предотвратить развитие «китайского синдрома».

Далее В.А. Легасов отмечает: «Ясно, конечно, что сбросы тяжестей в несколько сот килограммов с 200-метровой высоты создавали сложную ситуацию вокруг самого 4-го блока, потому что каждый сброс создавал облако пыли после удара, и эта пыль несла много радиоактивности. Но аэрозольные частицы, поднимающиеся в это время вверх, агломерировались, укрупнялись и попадали где-то в зону 4-го блока или на площадку станции. Даже само облако играло роль защиты для того, чтобы мелкие аэрозольные частицы не продвигались на существенно большие расстояния от зоны самой станции.

... Решение по этой схеме принималось 26-го апреля вечером, а реализовалось оно с 27 апреля по 2 мая включительно. Это основной период, когда осуществлялся очень интенсивный заброс всех материалов. После 2-го мая заброс был прекращен, несколько дней была пауза, затем после 9 мая, когда при облетах 4-го блока было обнаружено пламенеющее высокотемпературное пятно то ли графитовой клады, то ли металлической конструкции, туда было сброшено еще 80 т. свинца. Это был последний массивный оброс материала в зону 4-го реактора [24]» (см. рис. 4, 5) .

6 мая интенсивность выброса радиоактивности из разрушенного блока упала в сотни раз (см. рис. 1). Окончилась активная стадия аварии.

Однако сброс материалов с вертолетов еще некоторое время продолжался.



*Рис. 4. Загрузка материалов
(май 1986г.) .*



Рис. 5. Вертолет над ЧАЭС (май 1986г.).

«Кроме материалов, которые имели назначение стабилизировать температуру внутри 4-го блока или создать необходимый фильтрующий слой, в зону 4-го блока, по предложению члена-корреспондента АН СССР Б.В. Гидаспова, который прибыл на помощь работающей группе после 10 мая, осуществлялась операция пылеподавления. Применялись растворы, содержащие полимеробразующие материалы, которые заливались в пластиковые мешки, каждый массой в 1 т, и эти мешки сбрасывались в зоне реактора, где при падении они разрывались. Раствор покрывал поверхности разрушенного блока и, полимеризуясь, застывал, создавая фильтрующий дополнительный слой» [24].

По вопросу о сброшенных материалах в литературе имеется множество разночтений, связанных с тем, что они основывались на воспоминаниях отдельных участников событий.

Первая попытка вернуться к начальным документам была сделана в [1].

Позднее, была проведена специальная работа, в ходе которой были собраны и обобщены данные записей в журналах Оперативной группы военно-воздушных сил Минобороны [25]. Эти данные сведены в таблицу 1 и проиллюстрированы на рис. 6.

Итак, к 06.05.86г. было сброшено ~ 5000т различных материалов.

Сброс продолжался и после окончания активной стадии аварии.

Таблица 1. Активная стадия аварии (26 апреля - 6 мая 1986г).

Дата	Число вылетов	Масса сброшенных материалов, т.	Полное количество сброшенных на 4-ый блок материалов, т
26 апреля	-	-	-
27 апреля	44	150	150
28 апреля	93	300	450
29 апреля	186	750	1200
30 апреля	?	1500	2700
1 мая	?	1900	4600
2 мая	?	420 (?)*	5020 (?)*
3 – 6 мая	0	-	5020

* существуют разночтения

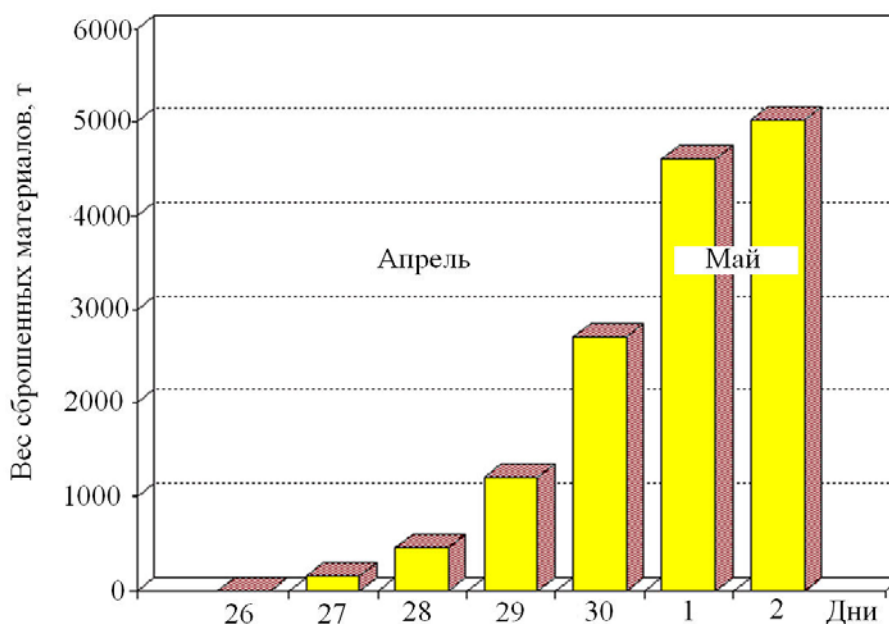


Рис.6. Количество материалов, сброшенных в развал реактора.

К 18.06.86г. по документам было сброшено всего ~ 11400т различных сухих материалов и ~ 5200т растворов (оцениваемая нами точность этих данных $\pm 20\%$) (см. таблицу 2)

Таблица 2. Характеристика сброшенных на 4-ый блок сухих и жидких материалов (к 18.06.86г.).

Название материала	Химическая формула	Масса (т)
Карбид бора	B_4C	~40
Доломит	$MgCa(CO_3)_2$	~1200*
Мраморная крошка, глина, песок и др.	-	~3500**
Свинец (дробь, «чушки» и др.)	Pb	~6700***
Тринарийфосфат (раствор)	Na_3PO_4	~2500
Другие пылеподавляющие композиции (растворы).	Латекс, барда, жидкое стекло, поливиниловый спирт, каучук и др.	~2700
Всего		~16600

* во время активной стадии сброшено ~ 600т

** во время активной стадии сброшено ~ 1800т глины и песка

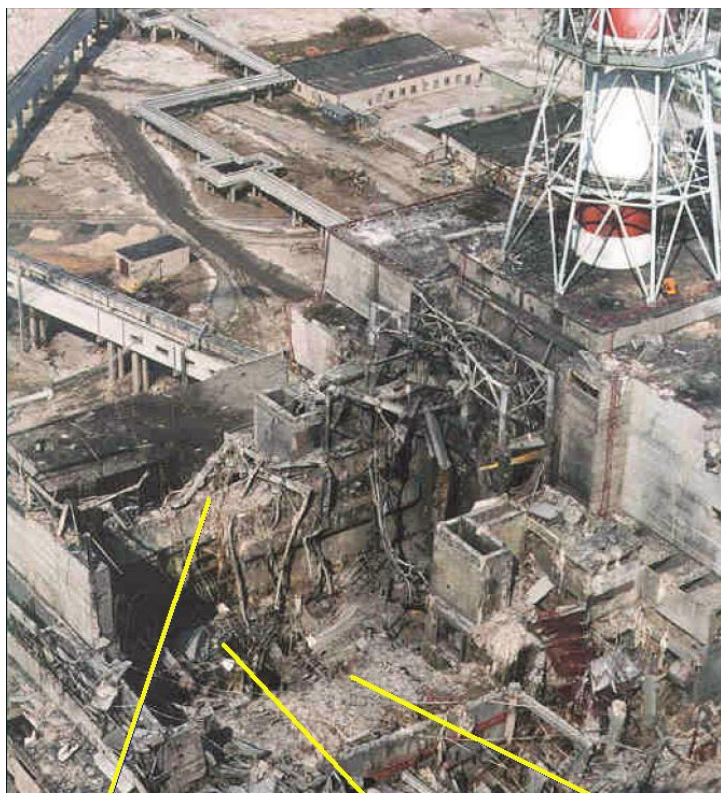
*** в первые 5 дней после аварии было сброшено 2400т свинца

К 29.06.86г. было дополнительно сброшено 1890т цеолита.

На рис. 7 и 8 приведены из фотографии разрушенного блока (вид сверху), сделанные уже после окончания активной стадии аварии и уменьшения выброса радиоактивности.



Рис.7. Верхние отметки блока после аварии. 1 и 3 завалы на потолках помещений северного и южного барабан сепараторов, 2 – центральный зал.



Завал на
потолочных
перекрытиях
северных
барабан-сепараторов

Сх. "Е"
Центральный зал

Завал на
потолочных
перекрытиях
южных
барабан-сепараторов

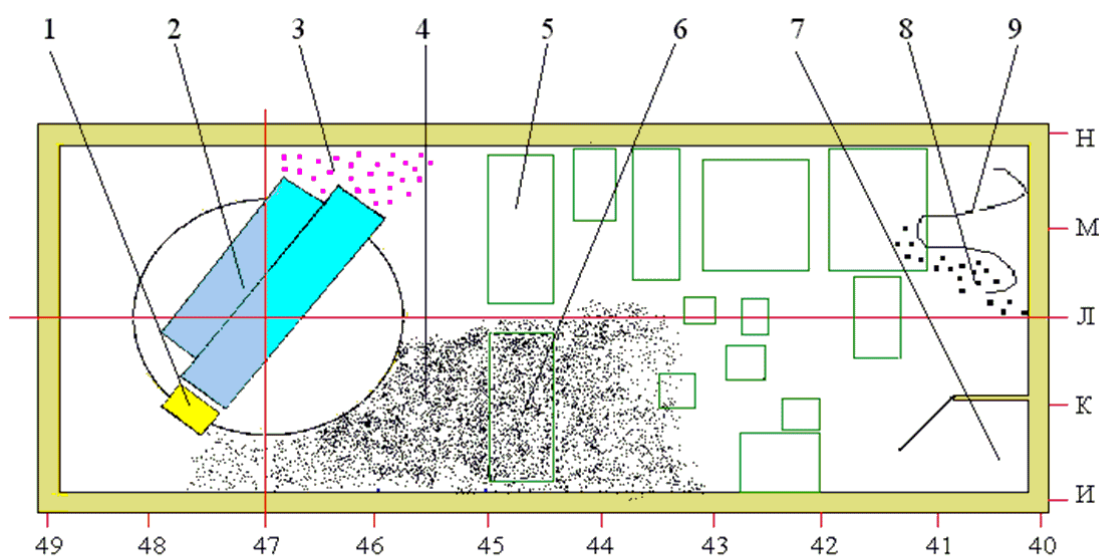
Рис.8. Разрушенные конструкции и завалы материалов (в том числе сброшенных с вертолетов), находящиеся на верхних отметках 4-го блока ЧАЭС после аварии.

3.2. Куда попали сброшенные материалы.

Как уже говорилось, исследования 1988-89гг., которые проводились внутри объекта «Укрытия» Комплексной экспедицией при ИАЭ им. И.В. Курчатова [26], показали, что основное предположение, на котором строилась модель 1986г. - предположение о том, что сброшенные материалы попали в шахту реактора и засыпали ее толстым слоем, не соответствовало действительности.

Указания на это имелись и в 1986г. Так из фотографий центрального зала, сделанных с вертолетов видно, что он засыпан мешками со сброшенными материалами, которые образовали в южной части зала многометровые холмы (см., например, рис. 6 и 7).

Позже это подтвердили разведывательные группы, проникшие в ЦЗ после периода длительной подготовки. Построенная на основании их данных схема ЦЗ выглядела так, как это показано на рис.9. Но это, правда, не исключало того, что часть материалов попала в шахту реактора.



Обозначения:

1 - железобетонная плита; 2 - металлоконструкция схемы "Е"; 3 - трубы нижних водяных коммуникаций; 4 - завал из материалов, сброшенных с вертолетов; 5 - северный бассейн выдержки; 6 - южный бассейн выдержки; 7 - пультовая; 8 - фрагменты активной зоны; 9 - часть металлоконструкции схемы "КЖ".

Рис.9. Центральный зал 4-го блока после аварии (схема).

В середине 1988г исследователям удалось с помощью специально пробуренных скважин, введя в них перископ и телекамеры, увидеть то, что находится внутри самой шахты [1, 5]. Сколько-нибудь заметного количества сброшенных материалов они там не обнаружили (рис.10).

Но и здесь можно возразить - эти материалы попадали в область высоких температур, расплавились и растекались по нижним помещениям реактора. Такой процесс вполне мог происходить. На нижних этажах, действительно, обнаружили большие массы застывшей, лавообразной массы, содержащей ядерное топливо.



Рис. 10. Один из снимков, сделанных с помощью перископа, внутри шахты реактора.

Хорошим индикатором того, что в состав лавы вошли не только материалы собственно реактора, бетон и т.п., но и материалы, сброшенные с вертолетов, мог бы стать свинец (его сбросили около 6700т!). Однако свинца в лаве практически нет, кроме того, свинец не был обнаружен и в скоплениях расплавленных металлических масс (исследования 1988 - 89гг.).

В таблице 3 [1] приводятся данные по содержанию свинца в различных типах лавообразных ТСМ.

Таблица 3. Содержание свинца в образцах лавообразных топливосодержащих масс (ЛТСМ).

Тип ЛТСМ	Угольно-черная керамика	Шоколадно-коричневая керамика	Шлак из куч лавы в ББ	Пемза из ББ
Pb (весовых %)	(6.5 - 110) $\times 10^{-3}$	(12-240) $\times 10^{-3}$	(1.1 \pm 0.1) $\times 10^{-2}$	(1.2 \pm 0.2) $\times 10^{-2}$

Предположение о том, что он испарился, попав в область высоких температур, также не подтвердилась – в помещениях блока свинца, осевшего на холодные поверхности, не наблюдается. Исследования, проводившиеся в 10 километровой зоне, значительных превышений его концентрации в почве над фоновыми значениями не выявили. Разработанная в «Журчатовском институте» и ИБРАЭ РАН модель образования и растекания ЛТСМ также указывает на то, что в состав лавы попала лишь незначительная часть сброшенных материалов. Мы обсудим ее выводы ниже.

3.3. Что могло помешать летчикам выполнить задание?

Здесь надо учитывать много факторов.

Во-первых, условия сброса грузов. Среди них в первую очередь - столб дыма и пара, содержащий огромную радиоактивность, и оказывающий не только моральное воздействие на пилотов, но и приведший к заметному ухудшению их физического состояния уже после первых полетов.

Риск столкнуться с 150 метровой вентиляционной трубой.

Во-вторых, причина могла заключаться и в том, что выброшенная взрывом и ставшая почти вертикально схема «Е» с путаницей труб, которые она вытянула за собой, создала как бы щит, отбрасывающий в центральный зал падающие материалы.

В-третьих, рядом с шахтой реактора в центральном зале светилось яркое пятно (раскаленный графит?). Это пятно вполне можно было принять за отверстие шахты и сбросить туда груз. В работе А. Сича [27] это подробно обсуждается.

Итак, цель забрасывания реактора, несмотря на несомненно героические усилия пилотов, оказалась не достигнутой.

3.4. Некоторые оценки.

Оказались ли проведенные мероприятия бесполезными?

Задним числом высказывались мнения, что они были даже вредны. Например, такое - при сбрасывании десятков тысяч тонн материалов на блок поврежденные конструкции дополнительно разрушались, а это потом должно было негативно сказаться на устойчивости объекта «Укрытия».

Нам хотелось бы указать на положительные моменты (напомним, что речь идет в основном о технической стороне проблемы).

Материалы, содержащие бор, попали в центральный зал, куда во время взрыва были выброшены многочисленные фрагменты активной зоны реактора и топливная пыль. Попав на топливо, они уменьшили его ядерную опасность (скорее всего, сделали его полностью ядерно-безопасным).

Песок, глина, доломит засыпали во многих местах толстым слоем радиоактивные обломки, стали барьером на пути проникающего излучения, и не просто облегчили впоследствии работу по созданию «Укрытия», а в ряде случаев (строительство трубного наката и легкой кровли над развалом) сделали ее вообще выполнимой в заданные сроки и при потраченных ресурсах.

Оперативный персонал и исследователи смогли проникнуть в ЦЗ и выполнить там ряд важных работ для обеспечения безопасности «Укрытия».

Наконец, небольшая часть материалов все же могла попасть в шахту и участвовать в образовании лавы.

4. ТОПЛИВО 4-го БЛОКА.

2.1. Радиоактивность, накопленная в топливе 4-го блока перед аварией.

Для правильного понимания обстановки, сложившейся после аварии, и планирования контрмер против ядерной, тепловой, радиационной опасности необходимо было иметь по возможности полную информацию о топливе 4-го блока. И в первую очередь то, сколько и каких радионуклидов накопилось в нем за время кампании.

Обычно соответствующие оценки делаются постоянно, по ходу работы реактора (в том числе на АЭС). Делались они и для реактора 4-го блока ЧАЭС. Однако скоро выяснилось, что результаты расчетов сильно отличаются от данных спектрометрических и радиохимических анализов образцов выброшенного топлива.

Такое же несовпадение (для трансурановых элементов – в несколько раз) наблюдалось при попытках использовать результаты, полученные для реакторов РБМК-1000 в работе [28].

Новые расчеты были выполнены в «Курчатовском институте» к началу мая 1986г. (впервые опубликованы в [29]). Впоследствии они уточнялись с учетом всех особенностей кампании 4-го блока ЧАЭС (см., например, [5]).

В таблицах 4 и 5 приведены последние, верифицированные данные [5].

Таблица 4. Характеристики основных β и γ - активных нуклидов в топливе 4-го блока перед аварией (инертные газы, а также ряд радионуклидов - с $T_{1/2}$ меньше 10 дней, с малой интенсивностью и энергией излучения в таблицу не включены).

	Радионуклид	Период полураспада	Активность общая, Бк	Активность на 1г урана, Бк
1	^{89}Sr	50,5 д	$4,0 \times 10^{18}$	$2,1 \times 10^{10}$
2	$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	28,6л	$2,3 \times 10^{17}$	$1,2 \times 10^9$
3	^{95}Zr	64д	$5,8 \times 10^{18}$	$3,05 \times 10^{10}$
4	^{95}Nb	35д	$5,7 \times 10^{18}$	$3,0 \times 10^{10}$
5	^{103}Ru	39д	$3,8 \times 10^{18}$	$2,0 \times 10^{10}$
6	$^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$	368д	$8,6 \times 10^{17}$	$4,5 \times 10^9$
7	^{125}Sb	2,77л	$1,5 \times 10^{16}$	$7,9 \times 10^7$
8	^{134}Cs	2,06л	$1,7 \times 10^{17}$	$8,9 \times 10^8$
9	$^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$	30л	$2,6 \times 10^{17}$	$1,37 \times 10^9$
10	$^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$	284д	$3,9 \times 10^{18}$	$2,1 \times 10^{10}$
11	^{154}Eu	8,8л	$1,4 \times 10^{16}$	$7,4 \times 10^7$

Таблица 5. Характеристики основных α - активных нуклидов в топливе 4-го блока перед аварией.

	Радионуклид	Период полураспада	Активность общая, Бк	Активность на 1г урана, Бк	Масса полная (кг)
1	^{238}Pu	87,7л	$1,3 \times 10^{15}$	$6,8 \times 10^6$	2
2	^{239}Pu	$2,4 \times 10^4$ л	$9,2 \times 10^{14}$	$4,8 \times 10^6$	412
3	^{240}Pu	$6,56 \times 10^3$ л	$1,5 \times 10^{15}$	$7,8 \times 10^6$	185
4	$^{241}\text{Pu}^1$	14,4л	$1,8 \times 10^{17}$	$9,4 \times 10^8$	48
5	^{242}Pu	$3,75 \times 10^5$ л	$2,9 \times 10^{12}$	$1,5 \times 10^4$	20
6	^{241}Am	433л	$1,6 \times 10^{14}$	$8,4 \times 10^5$	12
7	^{242}Cm	163д	$4,3 \times 10^{16}$	$2,3 \times 10^8$	0,35
8	^{244}Cm	18,1л	$4,0 \times 10^{14}$	$2,1 \times 10^6$	0.13

+

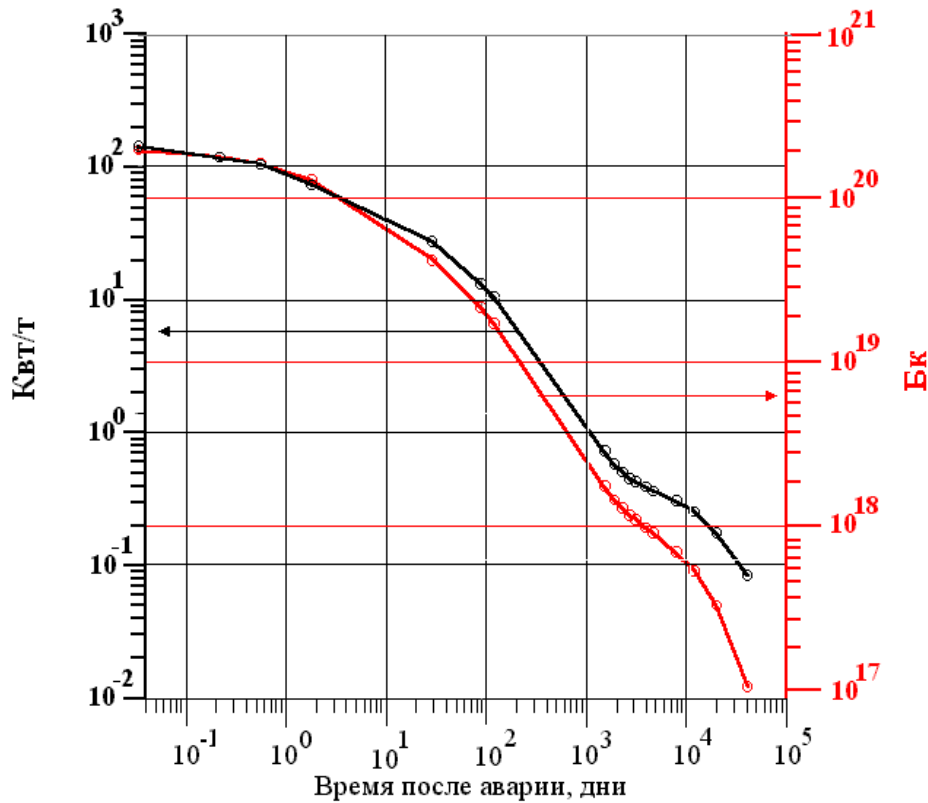


Рис. 11.
Зависимость изменения удельного тепловыделения топлива 4-го энергоблока (верхняя кривая) и его суммарной активности от времени, прошедшего после аварии

На рис. 11 показана зависимость изменения удельного тепловыделения топлива 4-го энергоблока и его суммарной активности от времени, прошедшего после аварии

2.1. Количество топлива, оставшееся в разрушенном блоке⁷

Вторым вопросом, на который надо было ответить как можно быстрее – сколько топлива осталось в блоке.

Над этой проблемой работали самые разные учреждения. Методика измерения выброса ядерного топлива была предложена коллективом специалистов «Курчатовского института» под руководством С.Т. Беляева (подробнее см. [5] и [26]). Она позволила достаточно точно оценить топливную составляющую выброса и тем самым определить, какая часть топлива разрушенного реактора осталась в 4-ом блоке (рис. 12).

⁷ Впоследствии в объекте «Укрытие»



Рис. 12. Оценки выброса топлива при аварии на ЧАЭС. «Курчатовский институт». Май 1986г.

Все эти данные были использованы при принятии дальнейших решений по локализации аварии и ликвидации ее последствий.

4. ТЕПЛОВАЯ ОПАСНОСТЬ. «КИТАЙСКИЙ СИНДРОМ».

4.1. Расчетные оценки и эксперименты (см. [5]).

Как уже говорилось (см. Раздел 2), уже на первом заседании Правительственной комиссии обсуждался вопрос о том, что существует опасность теплового разрушения или плавления строительных конструкций ядерным топливом, оставшимся в шахте реактора 4-го блока. Обсуждалась опасность «Китайского синдрома».

Перед коллективом специалистов филиала «Курчатовского института», возглавляемого Е.П. Велиховым, В.Д. Письменным, А.М. Дыхне и Л.А. Большовым, была поставлена задача: в кратчайшие сроки определить насколько реальна эта опасность. «Существует ли опасность теплового разрушения или плавления строительных конструкций ядерным топливом, оставшимся в шахте реактора 4-го блока ЧАЭС, и возможно ли, таким образом, проникновение больших массивов высокорadioактивного топлива в грунт и грунтовые воды? Если да, то какие меры необходимо принять, чтобы с гарантией предотвратить попадание топлива в грунт» [2].

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

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

Еще раз отметим, что в первых числах мая 1986 года практически отсутствовали какие-либо достоверные данные о состоянии реактора и ядерного топлива.

В частности, неизвестны были результаты сброса тысяч тонн песка, свинца и других материалов в шахту реактора.

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

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

Учитывая вышесказанное группа теоретиков (в нее входили Р.В. Арутюнян, Л.А. Большов, А.М. Дыхне) приступила к разработке сценариев и теоретических моделей поведения топлива и исходных постановок для расчетного моделирования.

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

В течение нескольких дней были разработаны базовые теоретические модели поведения плоских слоев, шаровых и цилиндрических фрагментов топливосодержащих масс. Были проведены оценки критических размеров скоплений топлива, способных 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.

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

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

Разработанные за короткое время физические модели и пакеты программ требовали объективной экспериментальной проверки хотя бы на качественном уровне. Поэтому одновременно с созданием программ и проведением расчетов началось экспериментальное моделирование движения источников тепла в различных средах. В экспериментах, проведенных под руководством В.Д. Письменного и Ф.К. Косырева, топливо имитировали полые металлические цилиндры, разогревавшиеся излучением технологического CO_2 -лазера и, начиная проплавливать песок или бетон, опускаться в их расплаве. Динамика их движения и измеренные термопарами значения температур сравнивались с результатами расчетов.

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

В последующем более детальные исследования взаимодействия двуокиси урана с расплавами, в том числе магнезитового бетона и песка были проведены в Институте металлофизики Украинской академии наук, под руководством академика В.Г. Барьяхтара. В частности, изучались процессы растворения таблеток двуокиси урана в расплавах

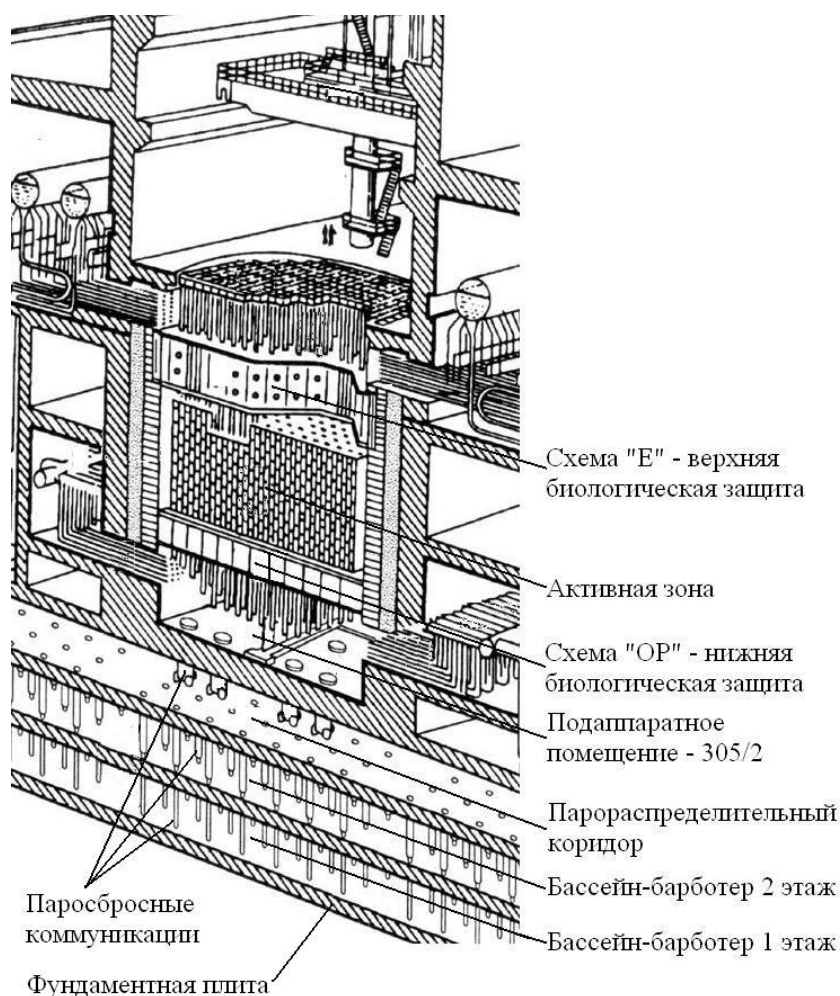
бетона и песка, важные для определения условий и температур растворения таблеток урана в расплавах различного состава. Эти процессы существенно влияли на возможные значения объемного тепловыделения за счет распада продуктов деления, оставшихся в топливе, и формирования тепловых характеристик, образующихся в результате взаимодействия двуокиси урана со строительными конструкциями топливосодержащих масс.

4.2. Выводы специалистов Филиала «Курчатовского института».

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

- Велика вероятность того, что в результате происходящих процессов будет проплавлена нижняя биологическая защита реактора (схема «ОР») (см. рис. 13).
- При выходе топливосодержащих масс в подреакторные помещения (пом. 305/2, ПРК, ББ рис.12) наиболее вероятен сценарий их останова и затвердения за счет растекания и охлаждения собственным тепловым излучением с поверхности.
- Предложенный ранее способ остановки расплава с помощью заливки помещений бассейна-барботера бетоном, может не помочь, а даже ухудшить ситуацию. Расчеты показывали, что в этом случае топливо, дойдя по паросбросным трубам (рис.12) до первого этажа бассейна-барботера и попав на фундаментную плиту, уже не будет эффективно охлаждаться сверху (путем излучения) и с большой вероятностью проплавит эту плиту.
- Наряду с процессами растекания и затвердевания топливосодержащих масс, фрагменты с характерными размерами 20-30 см и более, расположенные на расстояниях сравнимых с их размерами, в результате взаимного теплового влияния могут сливаться и двигаться вниз, проплавляя подстилающие конструкции. Повторное движение затвердевших в результате растекания топливных масс возможно в результате закрытия их свободной поверхности в случае обрушения поврежденных строительных конструкций, в том числе за счет прогрева остаточным тепловыделением топливосодержащих масс или их заливки свежим бетоном в процессе строительства саркофага.

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



*Рис. 13.
Схематический
Разрез
центральной
части 4-го
блока.*

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

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

В основном обсуждались три способа остановить раскаленное ядерное топливо:

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

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

4.3. Сооружение подфундаментной плиты.

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

Эти люди выполнили уникальные работы в чрезвычайно опасных условиях. Была пробита штольня под фундаментом 4-го энергоблока диаметром 1,8 метра. Был создан 136-метровый тоннель, по которому проведены коммуникации и железнодорожные рельсы [30

-31]. Конструкция плиты имела размеры в плане ~ 30x30 м и толщину ~ 2,5 м. В средней части плиты были расположены трубы водяного охлаждения диаметром 100 мм (см. рис. 14). Над трубами охлаждения предусмотрено защитное покрытие из графитовых плит. Кроме этого в теле плиты предусмотрены датчики для обеспечения контроля за температурным режимом системы охлаждения.

В дополнение к указанным элементам конструкций предусмотрена система трубопроводов для цементации контакта фундаментной и подфундаментной плит.

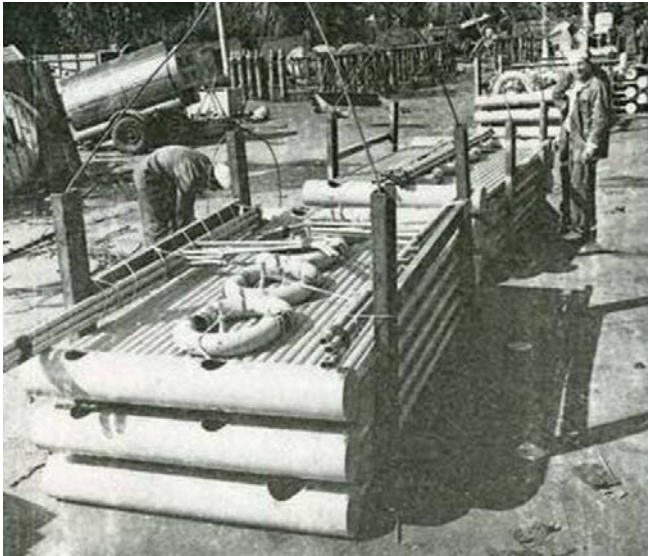


Рис. 14. Подготовка теплообменников для подфундаментной плиты.

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

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

Тем не менее, работа проходила в предельно тяжелых условиях, в том числе и радиационных. Шахтеры работали круглосуточно в восемь трехчасовых смен. Полностью сооружение подфундаментной плиты под реактором было, благодаря поистине героической работе шахтеров, инженеров, вспомогательного персонала, было завершено 28 июня. Но уже через несколько недель данные разведывательных групп показали, что проплавление подреакторных перекрытий либо развивается достаточно медленно, либо вообще приостановилось.

Что же происходило в первые дни после аварии в разрушенном реакторе?

5. МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ И РАСТЕКЕНИЯ ЛАВЫ.

5.1. Реконструкция состояния разрушенного блока сложившегося сразу после взрывов.

В 2005г. специалисты НИЦ «Курчатовский институт» и ИБРАЭ РАН начали работу над Проектом - «Разработка модели поведения ядерного топлива во время активной стадии черновильской аварии (CHESS)».

Первой задачей для создания модели «КИ» - ИБРАЭ стала реконструкция состояния разрушенного блока после взрывов (условно было выбрано время - полчаса после начала аварии).

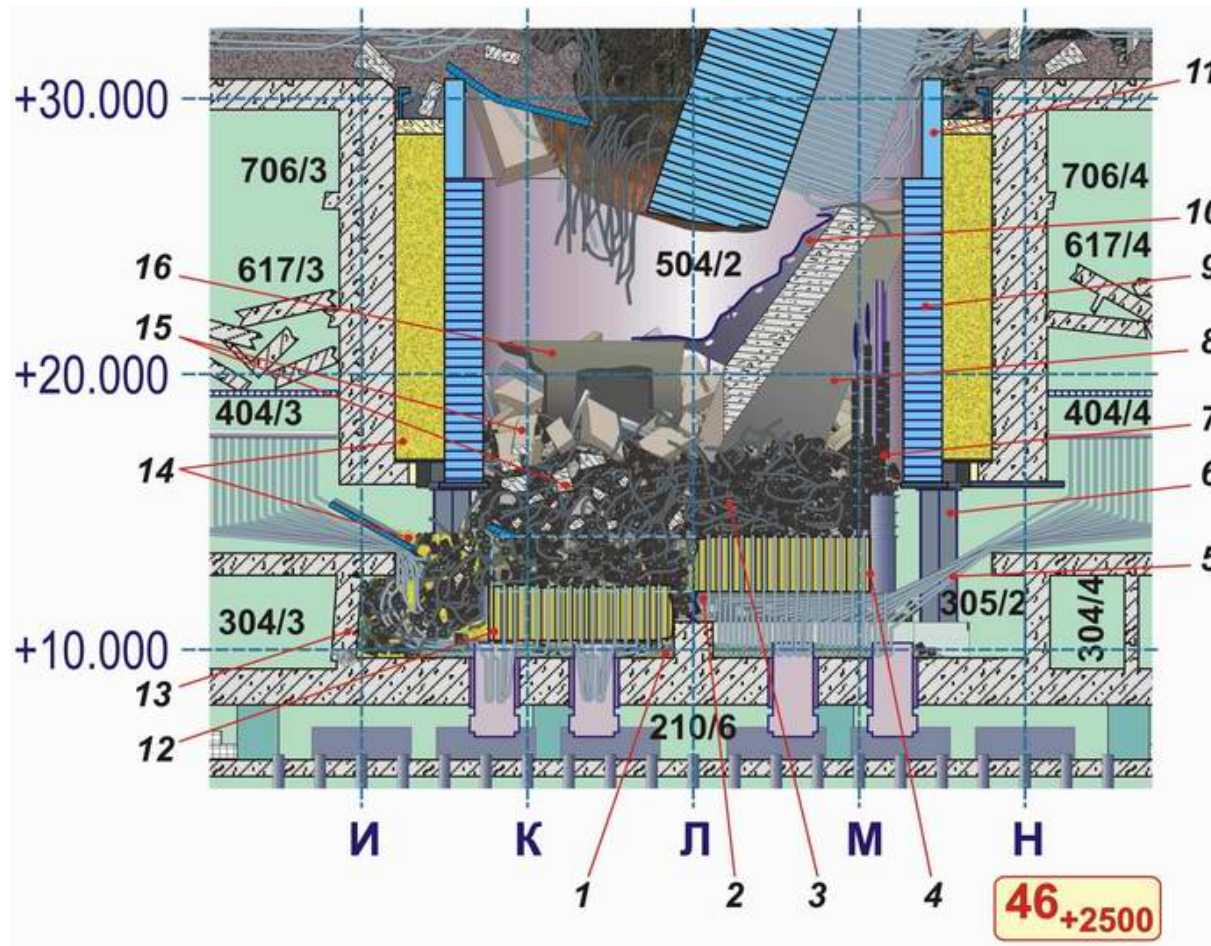


Рис. 15. Шахта реактора и пом. 305/2 через полчаса после взрыва.

1. Серпентинит схемы «ОР» и межкомпенсаторного зазора.
2. Смятая схема «С» («крест»).
3. Топливо, топливные сборки, ТВЭЛ-ы, ТК, графитовые блоки, раздробленный бетон.
4. $\frac{3}{4}$ «ОР».
5. Трубы НВК.
6. Дополнительная опора.
7. Отражатель (каналы и графитовые блоки).
8. Ж/б плита (фрагмент стены бокса сепараторов).
9. Бак «Л».
10. Облицовка теплозащиты стены бокса сепараторов.
11. Бак «Д».
12. $\frac{1}{4}$ «ОР».
13. Поврежденная стена.
14. Песок шахтной засыпки.
15. Обломки ж/б конструкций.
16. Фрагмент ж/б конструкции.

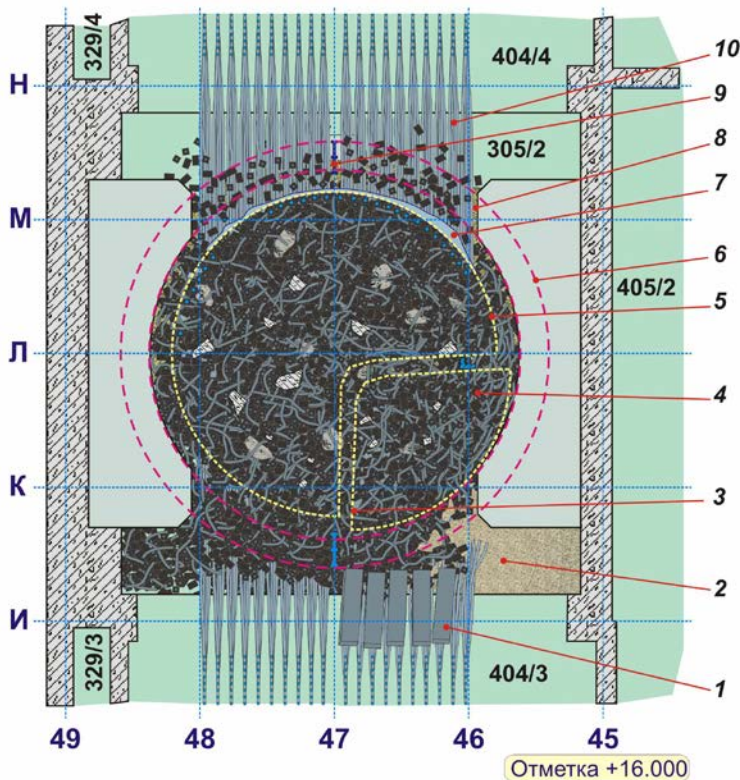


Рис. 16. Фрагмент плана 4-го блока ЧАЭС на отм. +16.000 (шахта реактора), через 30 минут после взрыва. (Разрез по нижней кромке бака «Л», отметка +15.950).
 1 - панели (узлы крепления НВК).
 2 - песчано-гравийная засыпка.
 3 - $\frac{1}{4}$ ОР.
 4 - топливо, топливные сборки, ТВЭЛы, графит, раздробленный бетон.
 5 - $\frac{3}{4}$ ОР.
 6 - проекция бака «Л».
 7 - оставшаяся на ОР часть схемы «КЖ».
 8 - серпентинит из межкомпенсаторного зазора.
 9 - дополнительная опора трубы НВК
 Теплозащита на рисунке не показана

Для этого были собраны и проанализированы данные, почерпнутые из статей, отчетов, актов обследований, строительных чертежей и т. п. Привлечены фото и видео материалы. Общее количество использованных информационных записей превысило 6000. [32].

В результате удалось восстановить геометрию помещений, в которых происходило образование лавы (это – шахта реактора и подаппаратное помещение 305/2, объединившиеся в результате взрыва и опускания схемы «ОР»), описать состояние топлива, материалов и конструкций реактора через полчаса после аварии (см. рис. 15, 16).

Выполнение этой работы подробно описано в [33].

Из рисунков 16 и 17 видно, что Схема «ОР» опустилась на ~ 3,8м. Ее юго-восточный квадрант - $\frac{1}{4}$ ОР (12 – рис.16и 3 – рис. 17) отколот и находится ниже остальной схемы - $\frac{3}{4}$ «ОР» (4 – рис.16 и 5 – рис. 17). Последнее предположение следует из того, что в дальнейшем именно он был полностью расплавлен, а материалы $\frac{1}{4}$ «ОР» вошли в состав лавы. В то же время конструкции $\frac{3}{4}$ «ОР» подверглись существенно меньшему разрушению, хотя по месту разрыва и наблюдаются заметные повреждения.

Конструкции схемы «С» (2– рис.16) смяты опустившейся схемой «ОР».

Смяты и прижаты к бетонной плите пола пом. 305/2 многочисленные трубы нижних водяных коммуникаций (5 – рис.16).

Основной объем серпентинита межкомпенсаторного зазора высыпался в кольцевой зазор между опустившейся схемой «ОР» и полукруглыми западной и восточной стенами пом. 305/2 или выброшен взрывом в северную и южную части этого помещения.

Песок из пространства между баком «Л» (14 – рис. 16 и 2 – рис. 17) и стенами шахты ректора высыпалась в южную часть пом. 305/2.

Пространство над схемой «ОР» заполнено до отметки примерно +17.000 - +18.000 графитовыми блоками, поврежденными сборками и ТВЭЛ-ами, фрагментами технологических каналов (3 – рис. 16 и 4- рис.17).

На «ОР» сверху на фрагментах активной зоны лежит множество обломков строительных конструкций.

В ходе исследований сотен образцов лавы, проведенных в 1986 – 2004гг., определялся их элементный состав из самых разных скоплений ЛТСМ в объекте «Укрытие» (см., например, рис 17 и 18). Это позволило определить наиболее вероятный состав материалов, которые присутствовали в пом. 305/2 и в шахте реактора в начальный момент образования лавы и вошли в ее состав (см. таблицу 6 и рис.20). Тем самым были получены необходимые исходные данные для описания процессов образования ЛТСМ.

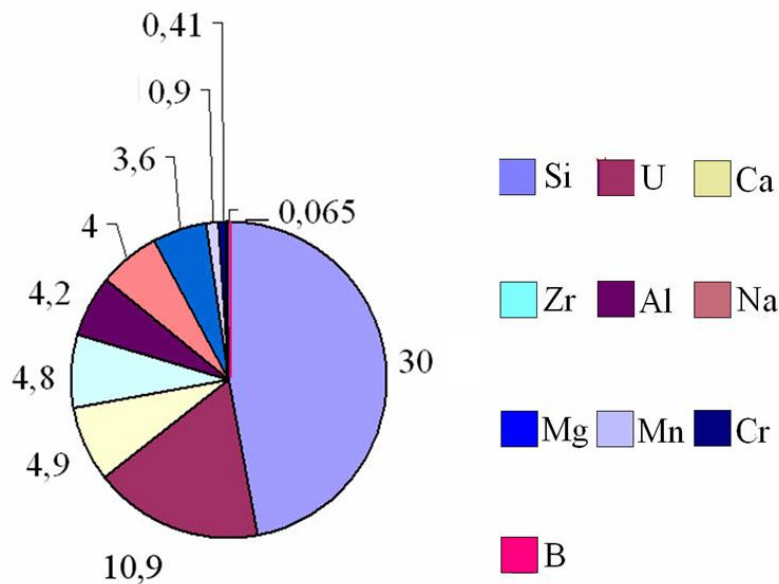


Рис. 17.
Элементный состав
коричневой керамики
из ПРК (18 образцов)

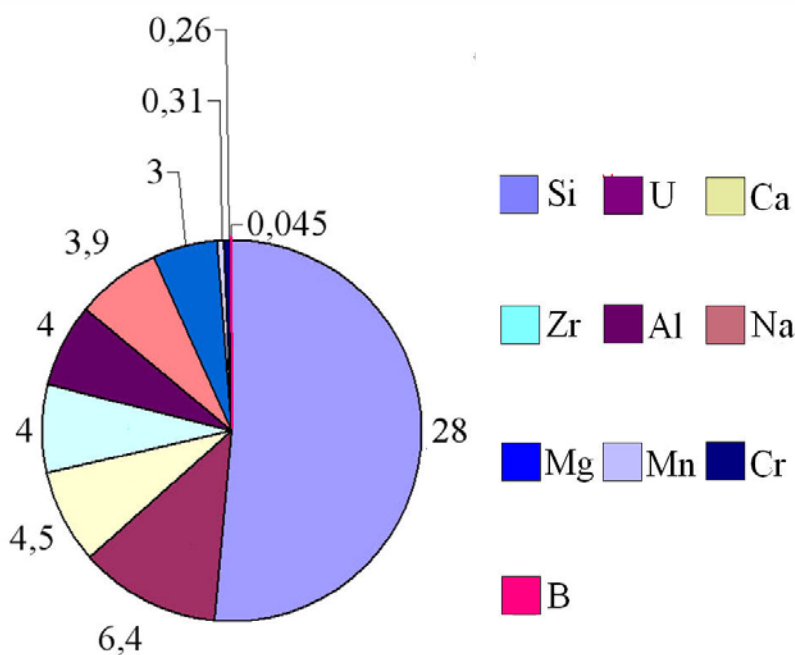


Рис. 18.
Элементный состав
черной керамики из
ПРК (16 образцов)

Таблица 6. Материалы, находившиеся в шахте реактора (пом. 504/2) и подапаратном помещении 305/2 в начале образования лавы.

Материал	Присутствовало в помещениях 504/2* и 305/2, т	Вошло в состав ЛТСМ, т
Топливо (U)	120	90
Сталь	1300**	< 20***
Серпентинитовая смесь	580	160
Бетон подреакторной плиты	-	130
Бетон строительных конструкций, попавший в шахту с верхних отметок	950	480
Песок шахтной засыпки	300	280
Цирконий	?	45
Графит	750	В ЛТСМ были обнаружены незначительные примеси.

* в границах реакторного пространства;

** не учтены материалы схемы «С» и не расплавившиеся коммуникации низа реактора;

*** 330 т расплавилось и растеклось по подреакторным помещениям.

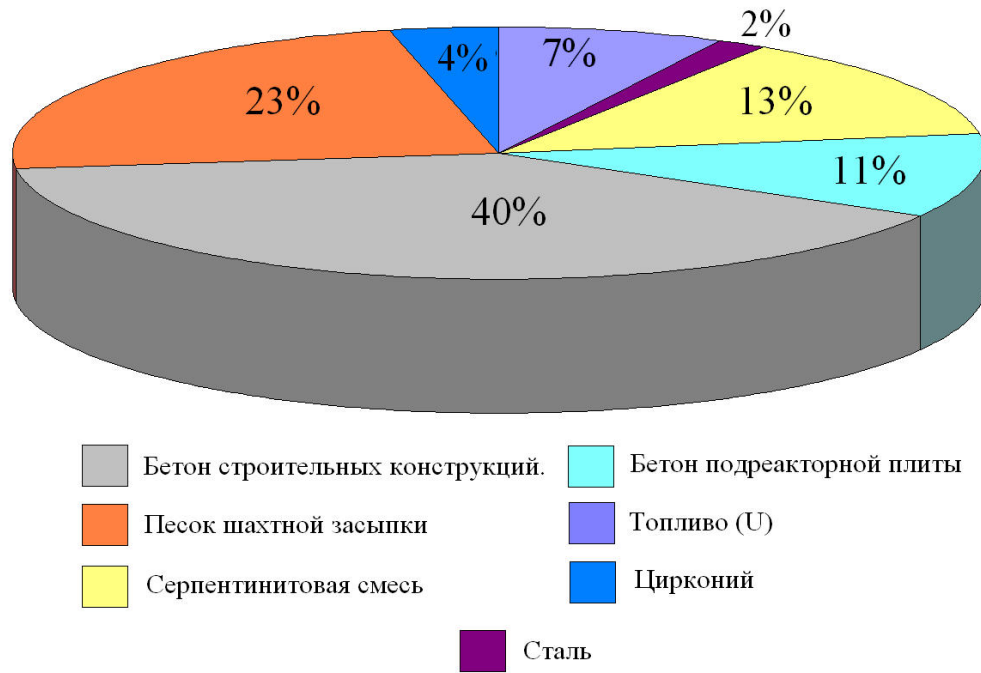


Рис.19. Материалы, вошедшие в состав ЛТСМ.

5.2. Источники тепла.

При моделировании процессов образования лавы учитывались три источника тепла:

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

Первый из них являлся основным.

Чтобы представить себе вклад от различных источников тепла, ниже (рис. 20) приводится график расчетов по модели для одного из сценариев образования лавы.

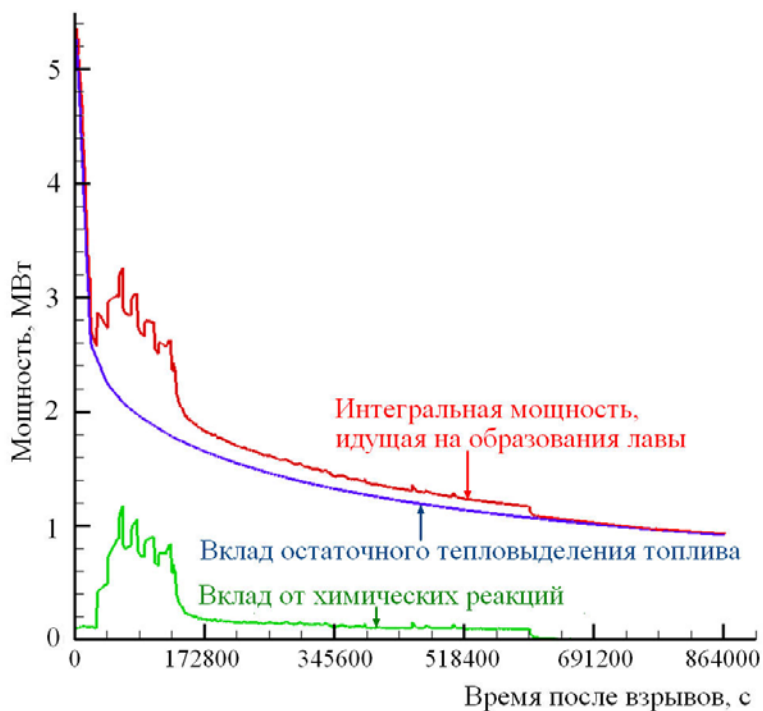


Рис. 20. Вклад в полную тепловую мощность, идущую на образование лавы, от различных источников тепла (для одного из сценариев образования лавы).

5.3. Образование и растекание лавы.

Центром этого процесса стала юго-восточная часть подапаратного помещения (305/2), а последовательность стадий образования и растекания лавы может быть кратко описана следующим образом [5].

I. При вводе положительной реактивности произошло разрушение топливных таблеток и ТВЭЛ-ов. В ряде мест ядерное топливо (UO_2) из-за интенсивного тепловыделения и малого теплосъема нагрелось до температуры плавления циркония ($t_{пл.} = 1852\text{ }^\circ\text{C}$). Циркониевая оболочка ТВЭЛ-ов расплавилась и начала растворять в себе топливные таблетки с образованием жидкой уран-циркониевой эвтектики.

II. Взрывы, разрушившие активную зону, позволили этой эвтектике и непосредственно топливу, имеющему высокую температуру, вступить во взаимодействие со строительными и конструкционными материалами, попавшими в шахту реактора. А главное – начать расплавлять часть опустившейся схемы «ОР» (юго-восточный квадрант), ее металлические конструкции, серпентинитовую засыпку и т.п.

На рис. 16 и 17 видно, как пространственно располагались материалы, многие из которых вошли в состав лавы.

III. При контакте уран-циркониевой эвтектики с диоксидом кремния (основная составляющая лав) образовалась тройная система $UO_2-SiO_2-ZrO_2$. Минимальная температура поверхности ликвидуса этой системы равна температуре плавления тройной эвтектики и ориентировочно составляет $1500\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 22) [34].

IV. Дальнейший процесс образования лавы шел при температурах ($1500 \div 2600$) $^\circ\text{C}$. Минимальное значение температуры может быть обосновано необходимостью расплавления большой массы металла (в схеме «ОР»), максимальное подтверждается присутствием в силикатной матрице глобул топлива с примесью циркония (система $ZrO_2 - UO_2$) [35].

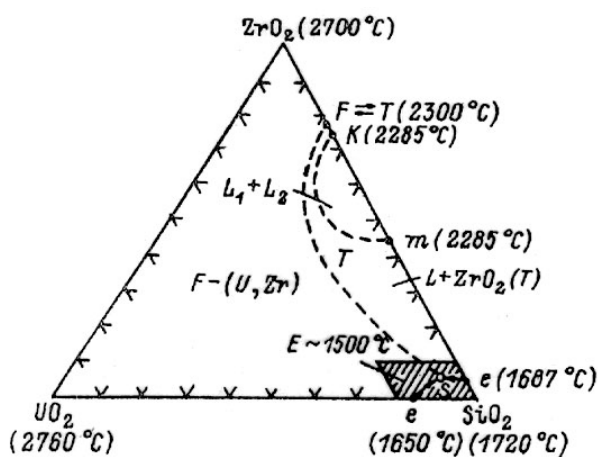


Рис. 21. Ориентировочная проекция поверхности ликвидуса тройной системы $UO_2-SiO_2-ZrO_2$
F - поле первичной кристаллизации твердых растворов на основе оксидов *U* и *Zr* со структурой типа флюорита;
T - поле первичной кристаллизации тетрагональной ZrO_2 ;
S - поле кристаллизации SiO_2 (кристобалит).
 Заштрихованная область соответствует наиболее часто наблюдаемому составу ТСМ.

В состав ЛТСМ в ходе взаимодействия облученного топлива с конструкционными материалами кроме урана и циркония, кремния и кислорода вошло значительное количество других элементов (в результате элементного анализа ЛТСМ их определено около двух десятков).

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

При этом естественно предположить существование нескольких очагов образования лав, каждый из которых имел свои характерные температуры и образовывал характерные для этого очага лавы с определенным составом.

Например, эвтектическая смесь (см. рис. 22, температура ~ 1500 °С) имеет приблизительный состав 80 % SiO_2 , 15 % UO_2 , 5 % ZrO_2 . Интересно отметить, что максимальная концентрация топлива в стеклообразных образцах ЛТСМ составляет ~ 15 %. При недостатке кремния и других материалов будет работать система $\text{ZrO}_2\text{--UO}_2$ с температурами 2500 – 2600 °С.

Сам UO_2 в SiO_2 растворяется крайне медленно [36] (эвтектика в бинарной системе $\text{UO}_2\text{--SiO}_2$ образуется при относительном содержании оксида урана 13 % и имеет температуру плавления 1650 °С). В то же время добавление 10 % Al_2O_3 в расплав приводит к быстрому растворению топлива [36]. К таким же результатам приводит и добавление ZrO_2 .

Если основная часть лавы образовывалась при температуре ~ 1600 °С, то в отдельных очагах лавообразования были возможны были и температуры, при которых просто происходило плавление таблеток UO_2 (2850 °С и выше).

А в отдельных участках при «удачном» наборе материалов и соответствующей «организации» теплового режима процесс лавообразования мог начаться и при температуре около 1000 °С [37].

V. Несмотря на множество потенциальных возможностей подавляющая часть ЛТСМ, которые обнаружили в помещениях блока, имеет близкий химический состав.

Это могло объясняться тем, что процесс образования металлокерамического расплава сопровождался перемешиванием за счёт газовой выделения и конвективных потоков и закончился раньше, чем началось растекание расплавленных ЛТСМ по подреакторным помещениям. Т.е., растекался уже сформировавшийся расплав.

VI. После того, как лава расплавила и «вобрала в себя» часть материалов, засыпавших пом. 305/2, для нее открылись два пути. На нижние отметки блока, через трубы и клапана паросбросной системы (рис. 22, 23) и в помещения, расположенные на отм. 9.000м, через пролом в стене между пом. 305/2 и 304/3 (рис. 24).

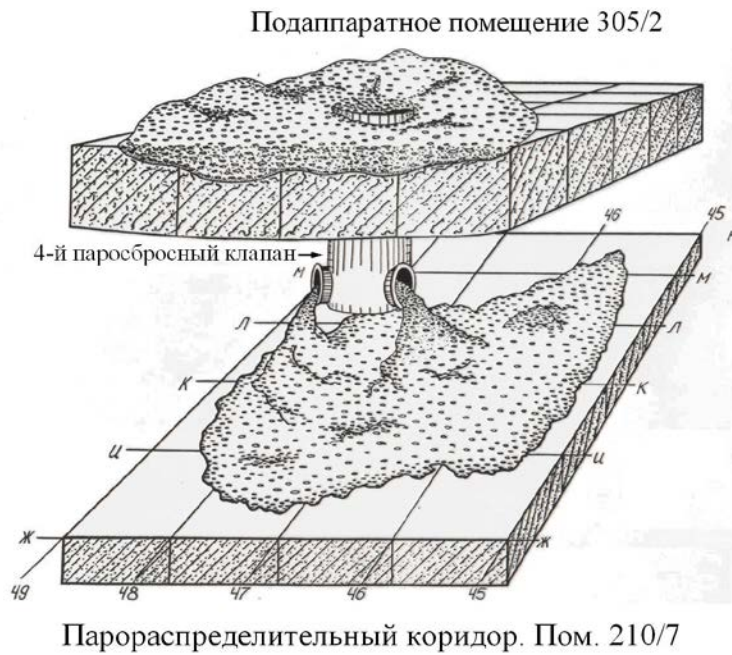


Рис.22. Лава распространялась по полу помещения 305/2, достигала паросбросных клапанов, переливалась внутрь и попадала в помещения парораспределительного коридора и далее, на нижние отметки блока (см. рис. 24).

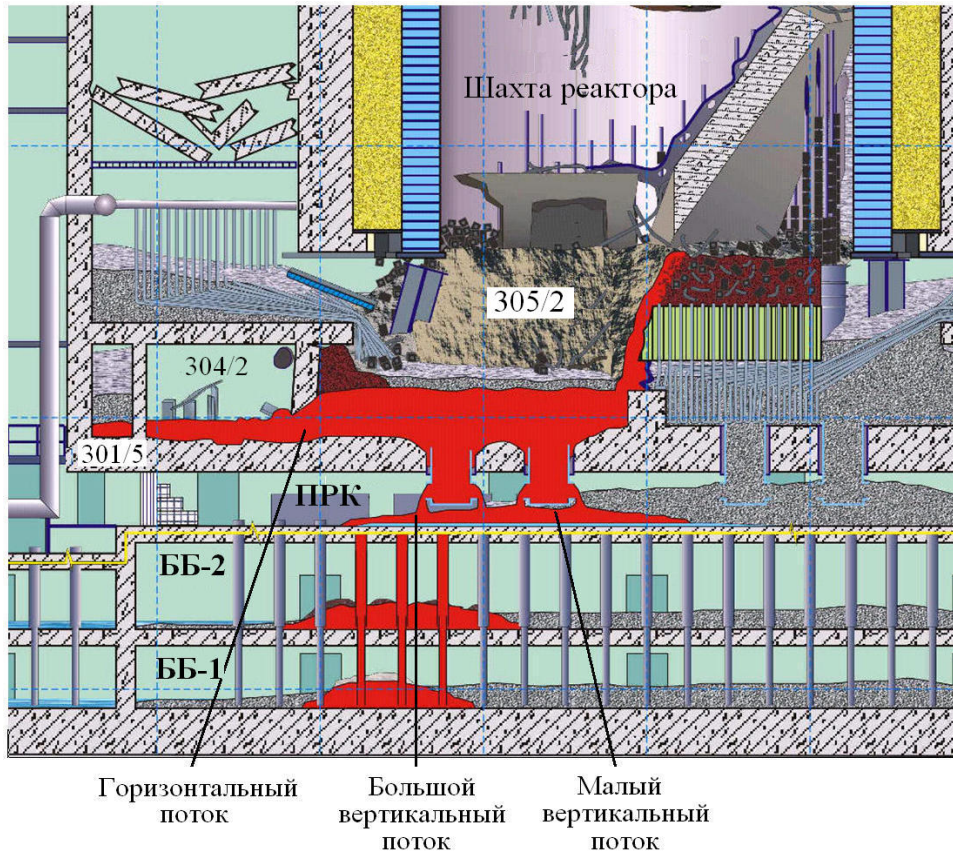


Рис.23. Вертикальное распространение лавы по паросбросным клапанам и трубам (фрагмент сечения объекта «Укрытие» по оси 46+2500).

Большой вертикальный поток: пом.305/2→пом.210/7→пом.012/15→пом.012/7.

Малый вертикальный поток: пом.305/2→пом.210/6

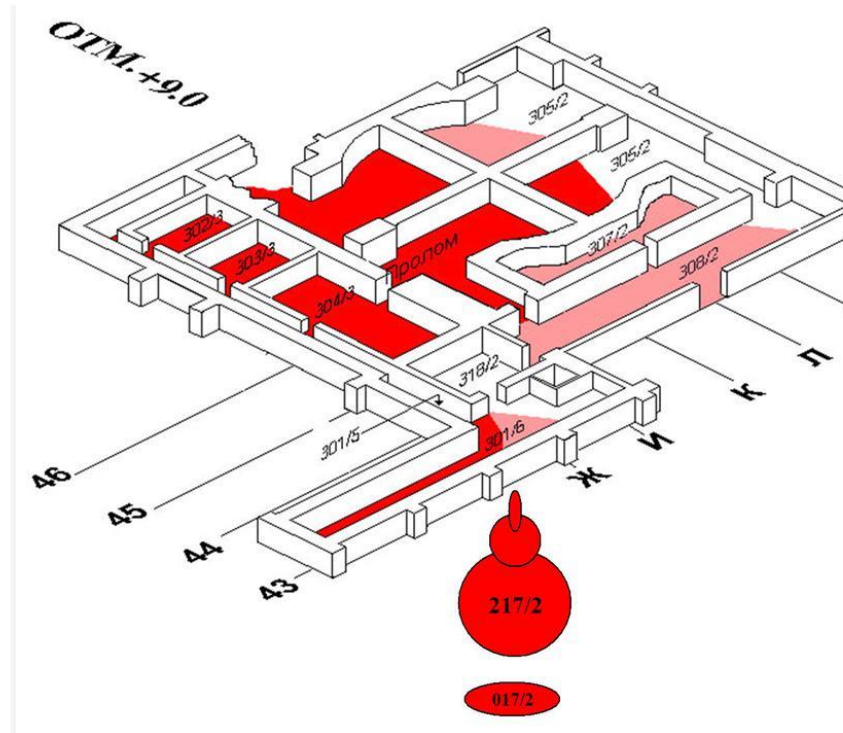


Рис. 24. Распространение горизонтального потока лавы: пом.305/2 → через пролом → пом.304/3 → пом.301/5(коридор)

Пом. 303/3 и 302/3

Пом. 301/6(коридор) → на отметку +6.000 → пом.217/2 → на отметку + 3.000 → пом. 017/2

5.4. Что предотвратило развитие «Китайского синдрома».

Модель «КИ» - ИБРАЭ позволяет проследить процесс расплавления и постепенного опускания нагретых до высокой температуры материалов и прожигание ими бетонных перекрытий, т.е. процесс развития «китайского синдрома».

Согласно ей, если учитывать все основные условия образования и растекания лавы, после того, как основная часть тепловой энергии пошла на расплавление материалов схемы «ОР», опасность прожога существовала только для бетонной плиты перекрытия между пом.305/2 и ПРК.

Наблюдения подтверждали, что эта опасность частично реализовалась.

Вот, что отмечается при обследовании потолка ПРК в пом. 210/6 (см. [32]).

В районе ряда «И», над средним конденсатором металлическая облицовка стального потолка имеет разрыв по сварному шву, из которого вытекала стеклообразная масса (в сторону оси 47), длина разрыва (1 -1,5) м, облицовка в этом месте провисла на 20 - 30 см. Металлическая облицовка потолка над 3-м и 4-м клапанами провисла, кремнийорганическая краска плакировки стены, расположенной напротив 2-го патрубка обгорела. Сами клапаны опустились примерно на 20 см ниже штатного положения. Более полные данные по распространению лавы в пом.305/2 и прожиганию опорной плиты см. в [32].

На рис.25 приведен фрагмент разреза блока по ряду «К».

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

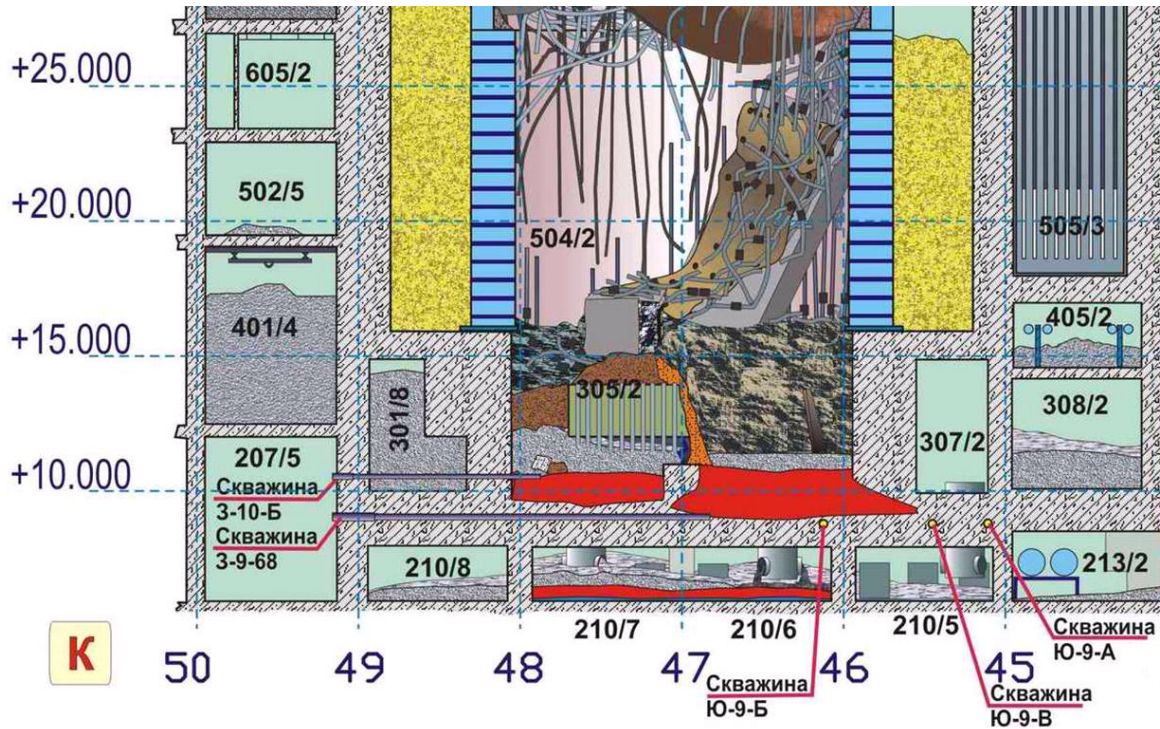


Рис. 25. Фрагмент разреза 4-го блока по ряду «К».

Иллюстрацией начавшегося, но не разившегося, процесса прожигания (проплавления) может служить и частичный прожег клапана в ПРК (рис.26).



Рис. 26.
Проплавление лавой металла клапана ПРК.

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

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

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

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

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

На рис. 27 приведена схема одного из предлагавшихся УЛР, заполняемого так называемыми «жертвенными материалами» (ЖМ) и устанавливаемого в шахте водо-водяного реактора непосредственно под дном его корпуса.

ЖМ размещаются в форме блоков—ячеек. Такая ячеистая структура значительно увеличивает поверхность их контакта с расплавом, в связи с чем происходит интенсивное разбавление расплава компонентами ЖМ.

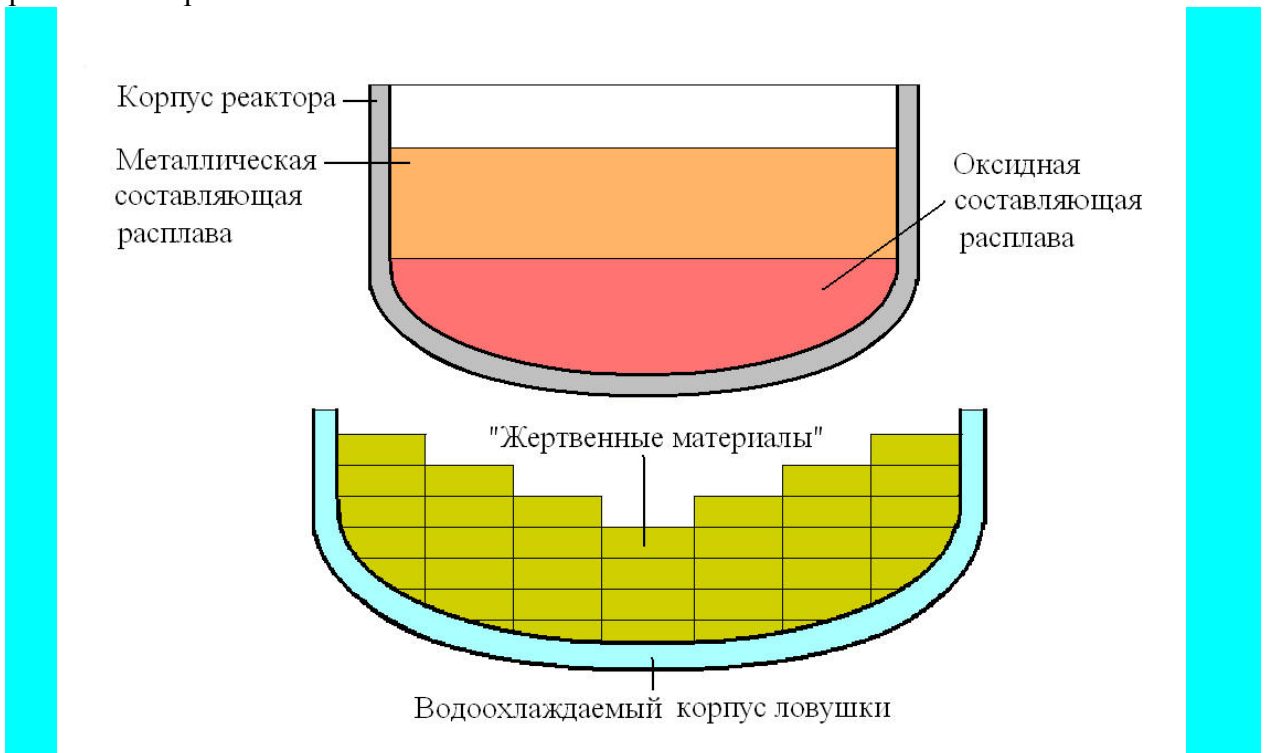


Рис. 28. Схема одного из предложенных УЛР для водо-водяного реактора.

При аварии на ЧАЭС роль ЖМ с успехом выполнили конструкционные материалы блока находившиеся в шахте реактора и в подаппаратном помещении после взрывов.

Они увеличили объем расплава и площадь его охлаждения, понизили удельное выделение тепла, вызвали инверсию слоев расплава.

Отметим, что присутствие в лаве этих материалов значительно повысили ее ядерную безопасность.

Это иллюстрирует рис.28, на котором представлена зависимость K_{∞} системы ($UO_2 + SiO_2 + H_2O$ ⁸) от двух важнейших параметров - количества топлива в лаве и его выгорания.

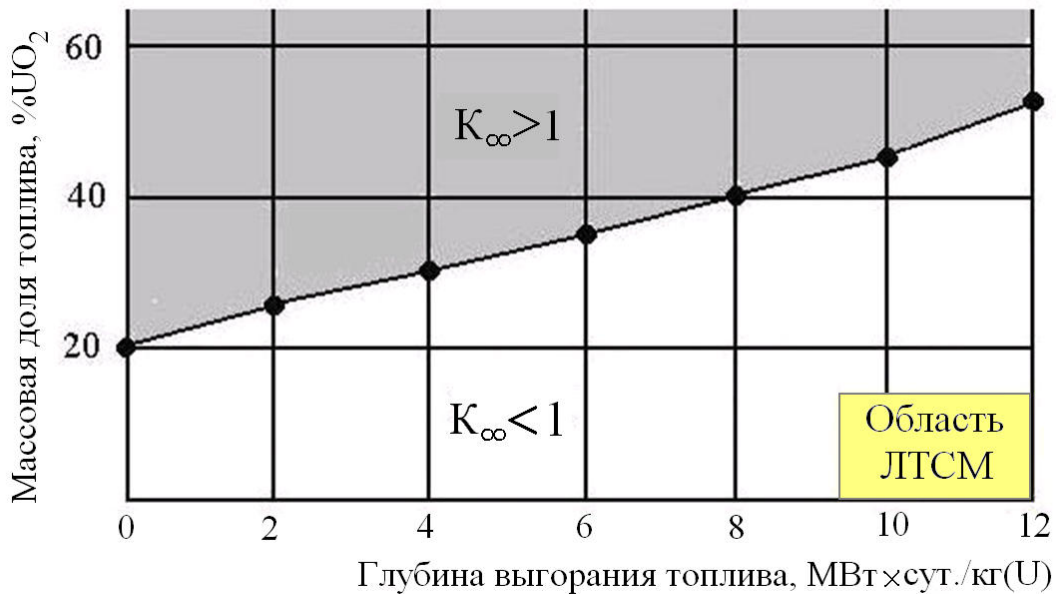


Рис. 28. Зависимость K_{∞} системы ($UO_2 + SiO_2 + H_2O$) от количества топлива в лаве и его выгорания.

Темная область - область, в которой возможна самоподдерживающаяся цепная реакция.

Прямоугольник внизу - область параметров «чистой лавы».

Очевидно, что «чистая» лава в любой смеси с водой не способна к СЦР⁹. Учет любых других параметров, например наличия других химических элементов в составе лавы, присутствие поглотителей, конечные геометрические размеры и т.п. только усиливает это утверждение.

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

В дальнейшем создание УЛР предусматривалось на других строящихся блоках. На рис. 29 показан один из моментов монтажа устройства локализации расплава на Ленинградской АЭС-2. В ловушке для ЛАЭС-2 предусмотрен двойной корпус, защищающий ее от перегрева, а также обеспечивающий охлаждение полностью пассивным способом.

⁸ Вода служит замедлителем, без нее возникновение критичности в ЛТСМ вообще невозможно. Поэтому считается, что содержание воды в каждой точке таково, что K_{∞} - максимально (наиболее консервативный подход).

⁹ Пробы, взятые в подаппаратном помещении 305/2 объекта «Укрытие», показали, что кроме «чистой» лавы в нем находится и смесь лавы с непереплавленными фрагментами активной зоны. Среднее содержание урана в этих пробах достигает десятков процентов.



Рис. 29. На Ленинградской АЭС-2 начался монтаж устройства локализации расплава. В подготовленную шахту был установлен 160-тонный корпус ловушки (2009г.).

6. СВОДКА ОСНОВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ВО ВРЕМЯ АКТИВНОЙ СТАДИИ АВАРИИ НА РАЗРУШЕННОМ БЛОКЕ.

Наиболее важные из мероприятий, выполненных на разрушенном блоке, приведены в таблице 7.

Таблица 7. Основные мероприятия, принятые на активной стадии аварии.

Дата	Часы	Описание мероприятий
Суббота, 26 апреля	01.23.50	Авария. Разрушение реактора.
"	01:30 - -06:30	Тушение пожаров (в результате взрывов в реакторе и выброса разогретых фрагментов активной зоны 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).
"	Вечер	Впервые стали осознаться размеры аварии.
"	Ночь	На заседании Правительственной комиссии решено начать заброску в разрушенный реактор материалов для локализации аварии.
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	Открыты задвижки, чтобы спустить радиоактивную воду из ББ 4-го блока. Правительственная комиссия приняла решение о сооружении подфундаментной плиты под реакторным отделением 4-го блока
Понедельник 5 мая		Смонтирована система подачи азота в ББ. Начата доставка строительной техники и необходимых материалов для сооружения подфундаментной плиты
Вторник 6 мая	~01:00	Прибытие машин с жидким азотом. Вскоре газообразный азот стал поступать на второй этаж ББ. Попытки охлаждения успеха не принесли.
Вторник 6 мая		Интенсивность выброса (Ки/день) снизилась на три порядка. Конец активной стадии.

Из приведенной таблицы следует, что кроме рассмотренных выше, к основным мероприятиям относилось и такое, как организация охлаждения реактора жидким азотом для предотвращения «китайского синдрома». С самого начала было видно, что этот путь связан с большими техническими трудностями, опасен для персонала и малоэффективен. После первых попыток организовать такое охлаждение от идеи отказались.

7. СОЗДАНИЕ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ».

7.1. Первые предложения.

Во Введении уже говорилось о том, что важнейшей стабилизационной мерой, которая привела к эффективной защите окружающей среды от радиоактивных материалов, сосредоточенных в разрушенном 4-ом блоке, было создание объекта «Укрытие».

Кардинальные меры, которые необходимо было предпринять (в дополнение к забрасыванию различными материалами шахты реактора), чтобы надежно закрыть источник, содержащий миллионы кюри радиоактивных материалов, начали обсуждаться с первых дней после аварии.

Инициатором одного из проектов, который стал воплощаться в жизнь, был Е.П. Славский – министр Минсредмаша СССР. Сам проект получил среди специалистов, работающих на ЧАЭС, название «тюбетейка Славского».

Вот что вспоминает Л.А. Большов: «на заседании Правительственной комиссии в Чернобыле я узнал, что из Киева из КБ Антонова привезли легкую алюминиевую конструкцию 16 метров в диаметре, похожую на тюбетейку, чтобы закрыть ею четвертый блок. Ее притащили на вертолете. Я тут же побежал в здание своей группы, прикинул на листочке бумаги и сделал справку для Правительственной комиссии о нецелесообразности такого «Укрытия». Наши экспресс-расчеты показали, что ставить эту тюбетейку совсем не надо, так как нет уверенности, что данная конструкция встанет точно в нужное место, остановив поток выбрасываемых веществ в воздух. А если все-таки поставить ее удастся, то блок будет похож на кипящую кастрюлю, которую плотно закрыли крышкой. Расчеты показали, что вскоре после установки эта крышка может взлететь с большим шумом. Если все-таки она и будет держаться, то мы ускорим проплавление активной зоны вниз, поскольку поток тепла вверх будет приостановлен» [38].

В результате Е.П. Славский каким-то образом узнал о реакции физиков на его предложение и «приказал, прежде чем тюбетейку устанавливать, сделать в ней дырки, чтобы не подавить отток тепла. И устанавливать ее не как укрытие, а как измерительно - диагностический комплекс с разнообразными датчиками... Но поскольку в тюбетейке прорезали дырки, аэродинамика конструкции изменилась, и когда ее подняли в воздух, ее начало сильно болтать из стороны в сторону. Вертолетчик, чтобы не потерять машину и не умереть самому, сбросил ее вниз... И вопрос с тюбетейкой отпал сам собой» [38].

После окончания активной стадии аварии и падения выброса радиоактивности на много порядков (см. рис. 1) вновь встал вопрос о необходимости надежно закрыть разрушенный блок.

Было ли это так уж необходимо в новых условиях?

Чем больше времени проходит, тем чаще слышатся голоса, что строительство огромного сооружения было вообще бесполезным, а с учетом больших дозовых и финансовых

затрат, вредным мероприятием. Не надо было ничего делать, просто ждать 10 - 20 лет, разрабатывать технологии и потом разобрать 4-ый блок, а топливо захоронить.

Насколько обоснованы эти высказывания?

Мы уже обсуждали эту проблему в работе [5], но здесь хотели бы повторить свои доводы.

После аварии 4-ый блок представлял собой открытый источник огромной активности. На поверхности развала реактора, на разрушенных и сохранившихся конструкциях и кровлях, на внешних поверхностях зданий и площадке вокруг блока было сосредоточено множество выброшенных фрагментов активной зоны и топливной пыли. Согласно более поздним оценкам только на поверхности развала внутри блока находилось (5 - 10) т такой пыли. Через десять дней после аварии активность ее составляла ~50 миллионов Кюри. Ветровой перенос из открытого источника такой мощности привел бы к быстрому расплзанию высокоактивного пятна и даже раздвижению границ зон отчуждения и отселения.

Ни о каком пуске 1, 2 и, тем более, 3-го блока не могло быть и речи.

Ежегодно на территорию ЧАЭС выпадает около 600 мм осадков. Эта вода, пройдя через материалы открытого источника и сделавшись радиоактивной, рано или поздно должна была попасть в грунт. До 10 тысяч кубометров воды в год.

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.

Можно приводить еще и еще аргументы, доказывающие необходимость максимально быстрого возведения «Укрытия».

В середине мая 1986г. 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.

Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР 634-188 от 29.05.86 г. Министерству среднего машиностроения СССР были поручены работы по захоронению 4-го энергоблока ЧАЭС и относящихся к нему сооружений. Объект получил название «Укрытие реактора N4 Чернобыльской АЭС»

Но еще за две недели до этого постановления в Минсредмаше шло очередное обсуждение возможности захоронения аварийного реактора. В этот раз Министр выступил с предложением забетонировать аварийный реактор и превратить весь четвертый блок в бетонный куб.

Однако с этим не согласился Директор «Курчатовского института» академик А.П. Александров, сказавший, что продолжающееся тепловыделение топлива приведет к вскипанию находящейся в бетоне воды и разрушению конструкции.

Неудачный опыт такого бетонирования уже был.

Вот что вспоминает Е.П. Велихов: «... мы отвал блока залили бетоном, настояли тогда Легасов и Анатолий Петрович, что необходимо залить. Приехали на следующий день, а там фонтанчики – бетон кипит» [39].

Тем не менее, идея Е. П. Славского о заливе 4-го блока бетоном позднее возродилась (см. ниже).

7.2. Выбор варианта «Укрытия».

О том, что первоначально рассматривалось 18 возможных вариантов создания «Укрытия», писалось достаточно много (см., например, [5], [40 - 41] и др.).

Эти варианты можно разбить на две группы.

К первой из них относились проекты, в которых предполагалось соорудить вокруг блока независимое герметичное здание огромных размеров. Либо арку, пролетом 230м, либо купол пролетом до 120м. В какой-то мере эти проекты предвосхищали варианты «Укрытия-2», которые через 7 лет обсуждались на Международном конкурсе в Киеве, а сейчас проект «Арка» реализуется на площадке ЧАЭС. Стоили такие сооружения очень дорого, а время их сооружения, по самым оптимистическим оценкам, превышало 1,5 года.

Ко второй группе проектов относились те, в которых максимально использовались конструкции разрушенного блока. На эти конструкции должны были опираться вновь возводимые стены и кровля сооружаемого «Укрытия».

В этом случае здание должно было быть на много меньше, стоять дешевле, а строительство можно было осуществить за более короткое время.

Поэтому был выбран второй подход.

Сооружение «Укрытия» потребовало поистине героической работы десятков тысяч людей – проектировщиков, строителей, монтажников, гражданских и военных специалистов. Научное руководство работами осуществлял «Курчатовский институт», при поддержке многих научных организаций Советского Союза.

Строительство продолжалось 206 дней и ночей с июня по ноябрь 1986 года (см. рис. 30).



Рис. 30. Строительные работы на площадке ЧАЭС или круглосуточно.

30 ноября 1986г. Государственная Комиссия подписала «Акт о приемке на техническое обслуживание законсервированного 4 –го блока Чернобыльской АЭС» (см. рис.31а и 31б).

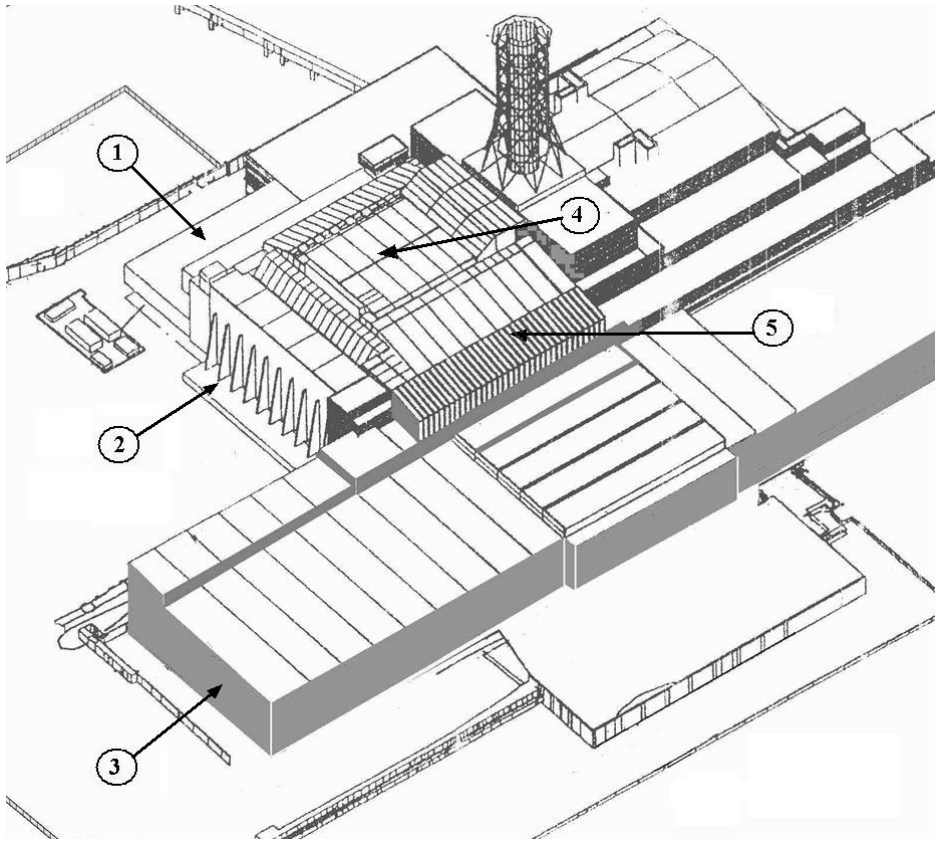


Рис.31а.
«Укрытие» 4-го
блока ЧАЭС.
1 – каскадная
стена;
2 –
контрфорсная
стена;
3 – машинный
зал;
4 – кровля
«Укрытия»;
5 – деаэрационная
этажерка.



Рис.31б. «Укрытие» 4-го блока ЧАЭС.

«К сожалению, платой за выигрыш стала не только огромная коллективная доза, полученная строителями и монтажниками, но и принципиальные недостатки самого объекта.

Так необходимость возводить новые конструкции в непосредственной близости от разрушенного блока в огромных радиационных полях заставляли применять дистанционную технику.

Для соединения многих ответственных конструкций невозможно было использовать сварку, а дистанционный монтаж не позволял подгонять точно друг к другу большие металлические щиты.

Все это явилось причиной первого из крупных недостатков «Укрытия» - негерметичности, большого количества щелей (их общая площадь, по последующим подсчетам, оценивалась в $\sim 1000 \text{ м}^2$).

Через эти щели внутрь объекта проникала вода (рис.32), а наружу, в случае внутренних обрушений, могла выйти радиоактивная пыль.



*Рис. 32.
Вода, проникшая на
нижние отметки
объекта «Укрытие»*

Радиационные поля и завалы не дали возможности по всем правилам оценить прочность многих из опор - старых конструкций, подвергшихся действию взрыва и пожара. А на эти конструкции опирались главные несущие балки возводимого сооружения.

Второй недостаток - *неопределенная прочность опор, поддерживающих основные, несущие балки Укрытия*. Разрушение старых опорных конструкций в случае, например, сильного землетрясения могло привести к разрушению всего объекта.

Что касается вновь возводимых конструкций - несущих балок, трубного наката над центральным залом, стальных щитов покрытия и др., то они были запроектированы и выполнены в соответствии со строительными нормами и правилами, поэтому прочность самих этих конструкций сомнений не вызывала» [5].

В результате исследований Комплексной Экспедиции «Курчатовского института» в 1987 – 89гг. было признано, что «Укрытие» - потенциально опасный объект и его опасность возрастает со временем, по мере разрушения конструкций, пострадавших после аварии (см., например, [5], [26], [41] и др.).

Поэтому 25 прошедших лет российские и украинские специалисты постоянно наблюдали за ним и предпринимали все возможные меры по снижению рисков. Их работу следует признать успешной - за это время значения параметров, характеризующих влияние «Укрытия» на окружающую среду, не выходили за контрольные уровни.

В то же время, необходимо отметить, что все эти годы «Укрытие» не подвергалось воздействию экстремальных внешних условий, например, 5 (и более) бальному землетрясению¹⁰,

8. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» В ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНУЮ СИСТЕМУ (см. [5], [26], [41] и др.)¹¹.

8.1. Первое предложение и различные варианты преобразования.

Первое предложение по преобразованию объекта «Укрытие» в безопасное состояние относится к 1989г.

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

В середине 1989г. сотрудники «Курчатовского института» С.Т. Беляев и А.А. Боровой выдвинули свою концепцию особо долговременного и экологически безопасного захоронения топлива [42]. 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 1991г.

Рассматривалось несколько вариантов (см. рис. 33):

- «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);

¹⁰ Вероятность такого землетрясения для района Чернобыля оценивается, как 1×10^{-2} 1/год.

¹¹ В настоящем разделе мы следуем изложению работы [26],

- «Промежуточное омоноличивание» (последовательная заливка бетоном помещений объекта, а в далеком будущем его разборка).



Рис. 33. Варианты преобразования «Укрытия», рассмотренные в работе ВНИПИЭТ.

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

Хотя выполненная работа называлась «Технико-экономическое обоснование», но, по сути дела, 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 обоснования высказывались в пользу варианта омоноличивания, переключаясь с высказанной в мае 1986г. идеей «превратить аварийный реактор в бетонный куб». В этот момент остаточное тепловыделение топлива значительно снизилось и возражения о том, что произойдет разрушение этого куба испаряющейся водой отпало.

15 марта 1991г. 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».

8.2. Недостатки «промежуточного омоноличивания».

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., Готовчиц Г.А. и др.).

Поскольку их возражения против «Промежуточного омоноличивания...» 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 объекте, 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 1986г. 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, монтажу оборудования и т.п. Можно предположить, что материальные и, особенно дозовые, затраты могут стать сопоставимыми с затратами на создание «Арки».

До последнего времени (2010г.) 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.

8.3. Что сделано за прошедшие годы для преобразования объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему?

После многолетней подготовительной работы в июне 1997 г. на заседании Большой семерки был принят «План осуществления мероприятий на объекте «Укрытие» - *Shelter Implementation Plan*¹². 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, т.е. их окончание планировалось в 2005 – 2007гг.

Стоимость всех работ, запланированных в SIP (они заканчивались сооружением нового, безопасного конфаймента – НБК и разборкой под его наиболее опасных конструкций) в начале, как 758 млн. долл. США.

За прошедшие годы выполнить этот план не удалось.

Окончены два больших этапа – подготовительная стадия и стабилизация строительных конструкций.

Окончена основная часть проектных работ по созданию НБК - «Арки».

При этом оценочная стоимости НБК возросла с 250 миллионов долларов (первые оценки) до 500 миллионов к 2004г. и до 870 миллионов в настоящее время.

В качестве срока окончания работ осторожно называется 2015г.

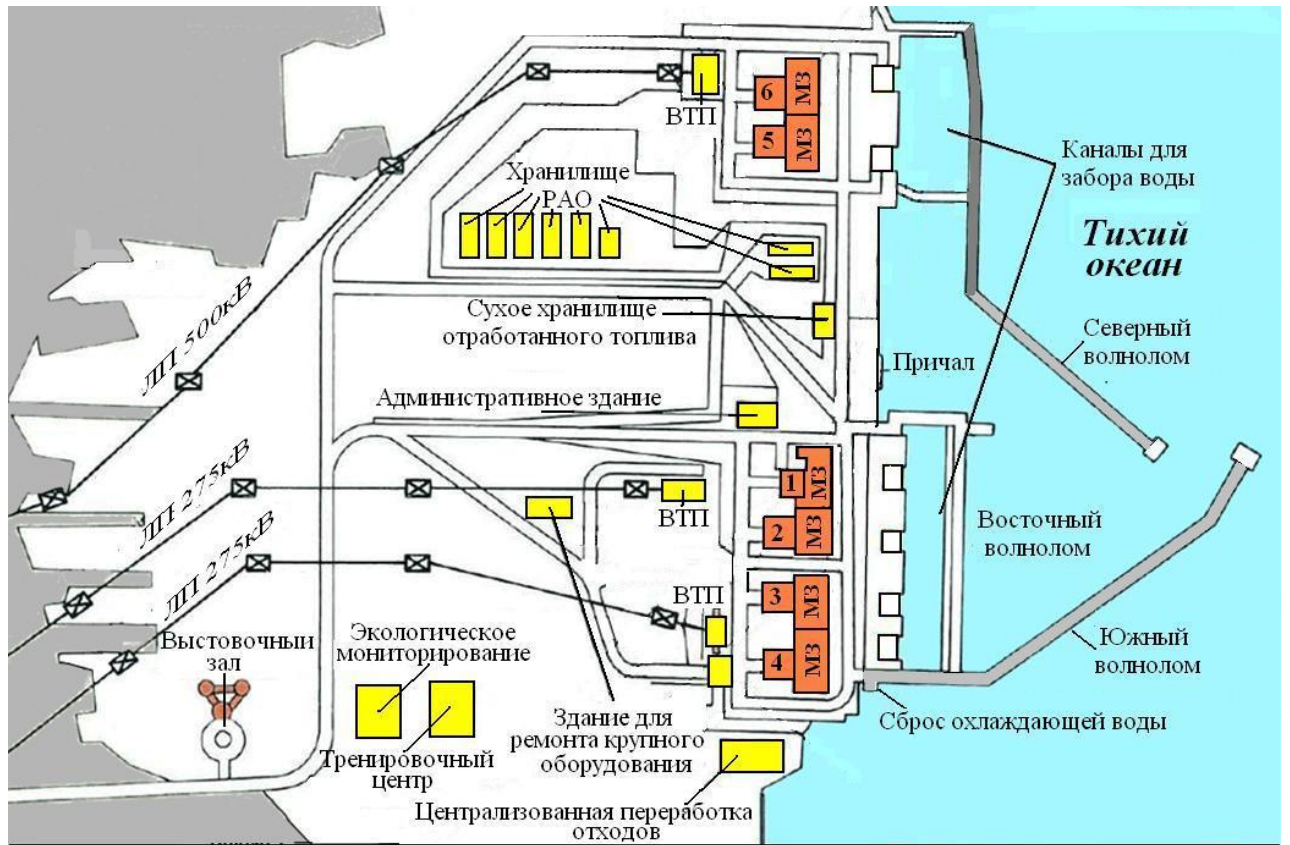
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

11 марта 2011г. в результате землетрясения на японской АЭС Фукусима Дай-ичи (см. рис. 34) произошла авария, характер и последствия которой позволил сравнивать ее масштабы с чернобыльской и даже присвоить ей 7-ой уровень по шкале INES¹³.

Землетрясение (его магнитуда по существующим оценкам составляла от 9,0 до 9,1) и удар цунами (высота волн в районе АЭС Ф1 достигала ~13м. См. рис. 35 и 36) вывели из строя внешние средства электроснабжения и резервные дизельные электрогенераторы, что явилось причиной неработоспособности всех систем нормального и аварийного охлаждения и привело в первые дни развития аварии к расплавлению активной зоны ряда реакторов, взрывам водорода и разрушению 1 - 4 блоков (см., например, [43 - 46] и рис. 37).

¹² в английской аббревиатуре – SIP, в русской – ПОМ (план осуществления мероприятий).

¹³ Шкала INES (International Nuclear Event Scale) разработана Международным агентством по атомной энергии в 1988 году и с 1990 года используется в целях единообразия оценки чрезвычайных случаев, связанных с аварийными радиационными выбросами в окружающую среду на атомных станциях. Авария 7-го уровня характеризуется большим выбросом радиоактивности в окружающую среду (радиологический эквивалент более нескольких десятков тысяч ТБк I-131): тяжёлые последствия для здоровья населения и для окружающей среды.



Обозначения: 1, 2, 3, 4, 5, 6 - здания (1 - 6) реакторов АЭС; МЗ - машинный зал; ВТП - высоковольтная трансформаторная подстанция; волнолом Н=5,5м; волнолом Н=10м.

Рис. 34. Схема АЭС Фукусима Дай-ичи.



Рис. 35. Цунами преодолевает защитную дамбу (волнолом).



Рис. 36. Вода заливает АЭС Ф1.

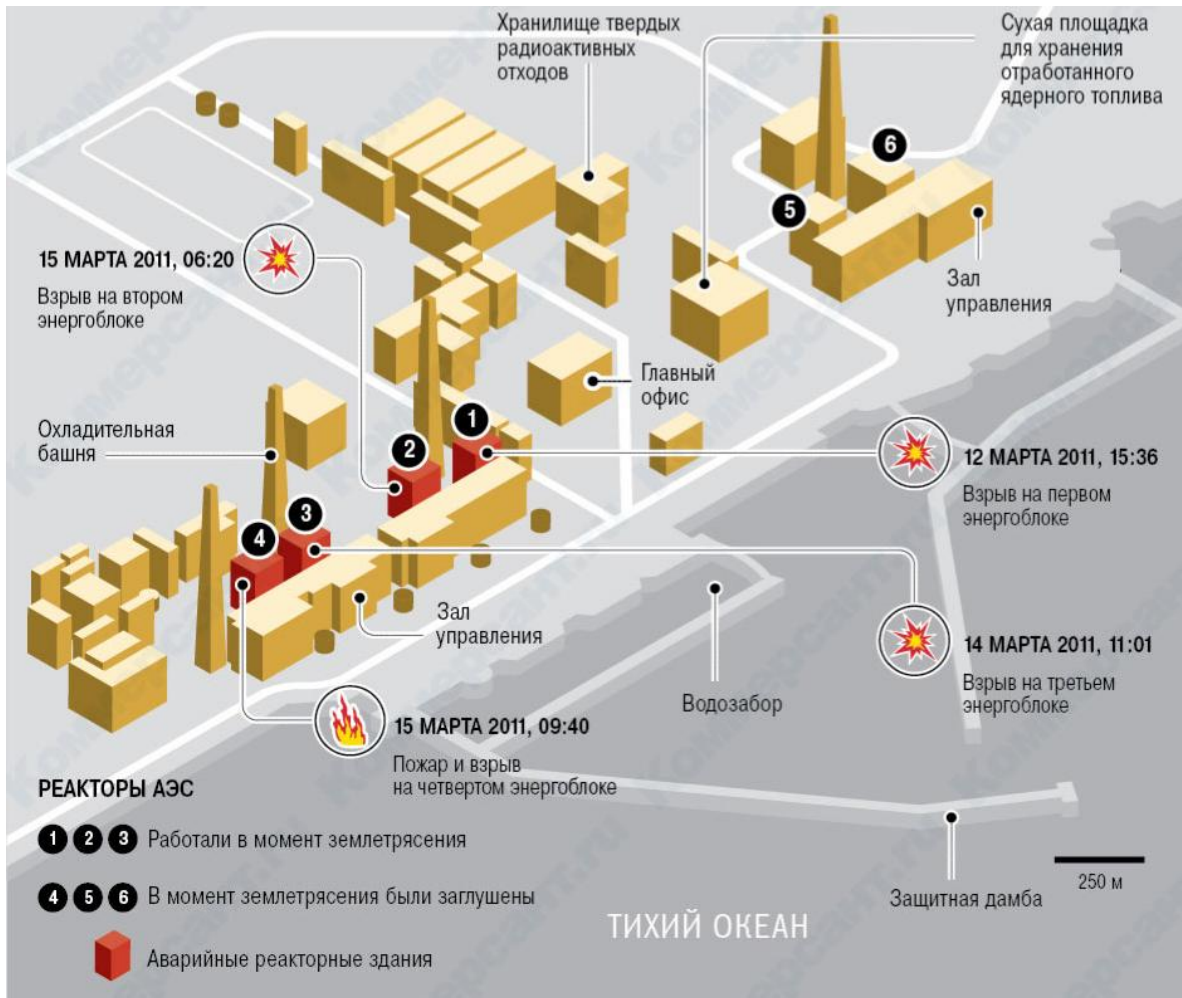


Рис. 37. Состояние энергоблоков АЭС Ф1 после аварии.

Прошло еще слишком мало времени после аварии и, к тому же, имеющаяся информация о принятых для ее локализации контрмерах недостаточно полна и порой противоречива, чтобы окончательно судить об их эффективности. Тем не менее, ряд оценок и соображений уже было высказано, в том числе и японскими специалистами.

Мы, со своей стороны, хотели бы отметить следующее.

Часто встречающееся утверждение, что чернобыльская авария была чисто «рукотворной», а авария на АЭС Ф1 вызвана исключительно катастрофическими природными явлениями, которые невозможно было предвидеть и предотвратить, по меньшей мере не корректно. С течением времени становится все более очевидным, что тяжесть аварии на Ф1, ее перерастание в катастрофу, определялась, прежде всего, недостаточным вниманием к вопросам безопасности, проявлявшемся все предыдущие годы.

В 2009г. известный японский сейсмолог Юкинобу Окамура (Yukinobu Okamura) предупреждал оператора АЭС Ф1 - компанию ТЕРСО - о неготовности прибрежной атомной станции к сильному цунами и землетрясению.

Ученый подробно изучил следы землетрясения и цунами Дзеган Санрику, обрушившегося на прибрежные районы северо-востока острова Хонсю в 869 году нашей эры. По оценкам сейсмологов магнитуда подземных толчков древнего землетрясения составляла около 8,3. В своем докладе Окамура настаивал на том, что в скором времени район, где расположена АЭС Ф1 подвергнется аналогичному удару природной стихии (см. [47])

В то же время было известно, что в 1967 году работники ТЕРСО при строительстве АЭС понизили береговую площадку, срыв 25 из 35 метров грунта, по высоте. Это было сделано для того, чтобы защитить станцию от землетрясений (поставить блоки на скальное основание), облегчить доставку оборудования и упростить схему подачи на станцию морской воды. Тем самым, была существенно ослаблена защита от цунами (см., например, [48]).

В ответ на обращение Окамура ТЕРСО не приняло никаких мер¹⁴.

В докладе президента японского агентства по атомной энергии (JAEA) Ацуюки Судзуки (Atsuyuki Suzuki), сделанном на заседании группы INSAG в ходе 55 генеральной конференции МАГАТЭ, состоявшейся 19-23 сентября 2011г. в Вене (см. [49]), отмечались крупные недостатки проектной документации на АЭС Ф1.

Были отмечены пробелы в аварийном планировании, присущие атомным станциям компании ТЕРСО, поскольку в их аварийных планах рассматривалась только кратковременная полная потеря электропитания для собственных нужд (на период несколько часов) т.е. на период работы резервных аккумуляторов.

В японском атомном сообществе есть также мнение, что рисками взрыва водорода в аварийной документации ТЕРСО «пренебрегали», что и привело к известному развитию событий на Ф1.

Президент JAEA сказал, что в отличие от других государств, Япония не отнеслась с нужной серьезностью к изучению аварий на ТМ1-2 и Чернобыльской АЭС. В частности, японские специалисты не осознали того факта, что запроектная авария может произойти в реальности.

¹⁴ Отметим еще, что на АЭС Ф1 не была внедрена система TИPEEZ раннего оповещения о цунами, распространяющаяся через МАГАТЭ. В результате персонал станции не имел информации о приближающемся цунами.

В докладе Ацуюки Судзуки отмечалась сложившаяся в Японии практику минимизации численности персонала для эксплуатации и обслуживания реакторов. Это хорошо работает для нормальной эксплуатации, но оказывается недостаточным для тяжёлых аварий.

Доклад приводит следующие оценки по количеству людей, задействованных на первом этапе аварии - 130 человек из состава оперативного персонала и 270 ремонтников. Это количество было «совершенно недостаточным» для эффективных восстановительных работ.

Кроме этого, действия персонала в первые дни осложняла нехватка инструментов и иного оборудования. Часть из них находилась на складах фирм-субподрядчиков, и доступ к ним был невозможен.

Специалисты из Агентства по ядерной и промышленной безопасности при министерстве экономики, торговли и промышленности Японии, проанализировав предоставленную им полную версию технического руководства для сотрудников АЭС Ф1, отметили, что всё обучение и рекомендации по действиям в условиях чрезвычайной ситуации на АЭС, строились на полной уверенности ТЕРСО в том, что два запасных генератора на первом реакторе «Фукусима-1» будут функционировать, несмотря ни на что. Однако, как известно, именно эти генераторы практически сразу вышли из строя после удара разрушительного цунами по электростанции. Также в техническом руководстве полностью отсутствовала информация о том, как вручную открыть клапаны для снижения давления в реакторах. Обычно открытие этих клапанов для сброса пара происходит в автоматическом режиме. В итоге, специалистам ТЕРСО понадобилось несколько часов для того, чтобы открыть клапаны в ручном режиме, что, по мнению ряда специалистов, и могло стать основной причиной полного расплавления ядерного топлива на первом реакторе АЭС.

Есть еще целый ряд «рукотворных» причин, которые привели к аварии такого масштаба.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Borovoi A.A.* Analytical Report (Post - Accident Management of Destroyed Fuel from Chernobyl) IAEA, Work Material, 1990, p. 1 - 99.
2. *Арутюнян Р.В.* «Китайский синдром». Природа №11, 1990 г.
3. *Боровой А.А.* Мой Чернобыль. Новый Мир, март 1996г., стр. 132-180.
4. *Боровой А.А., Пазухин Э.М., Стрижов В.Ф.* Эффективность мер по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС (активная стадия аварии). Препринт РНЦ «Курчатовский институт» ИАЭ-6471/11, Москва, 2007г., 38 с.
5. *Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. А. Боровой, Е. П. Велихов, А. А. Ключников.* Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС Москва, Наука, 2010, 240 с.
6. 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.
7. *Боровой А.А.* Отчет о работе Научно-исследовательского отдела и отдела Сбора и обработки информации КЭ при ИАЭ им. И.В.Курчатова за 1988г. N50.05/124 от 13.12.88г., Чернобыль, 49с.
8. *Пазухин Э.М.* Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования. Радиохимия т. 36, вып. 2, 1994, с. 97-142.
9. *Э.Пурвис III.* Сценарий чернобыльской аварии: по состоянию на апрель 1995г., Отчет МНТЦ, Чернобыль, 1995г., 146 стр.
10. *Киселев А.Н., Чечеров К.П.* Модель процесса разрушения 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС. АЭ т.91, вып.6, с.425-433, 2001г.
11. *С. А. Богатов, А. А. Боровой, А. С. Лагуненко* и др. Образование и растекание чернобыльских лав. Радиохимия т. 50, вып. 6, 2008, с. 565 – 568.
12. *Возняк В.Я., Троицкий С.Н.* Непредвиденный удар. В сборнике «Чернобыль: катастрофа, подвиг, уроки и выводы». Интер-Весы, Москва, 1996г., с.76-94.
13. Чернобыль. События и уроки. Сразу же после аварии. <http://bluesbag6.narod.ru/index25.html>
14. Чернобыль. Пять трудных лет. Москва, Издат, 1992, 384с.
15. Ретроспективная дозиметрия участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Седа-Стиль, Киев 1996г.
16. Воспоминания В.Г. Смагина, начальника смены блока № 4, опубликованные в книге Г. Медведева «Чернобыльская тетрадь». Новый мир, июнь 1989, с. 3-108.
17. *Игнатенко Е.И.* Самые трудные дни. В сборнике «Чернобыль: катастрофа, подвиг, уроки и выводы». Интер-Весы, Москва, 1996г., с. 95-130.
18. *Н.Н. Попов,* «Страницы Чернобыльской трагедии». Киев, 2003 г.
19. Куда делась радиоактивная вода, которая в первые часы после аварии затопила подреакторные помещения 4-го энергоблока Чернобыльской атомной электростанции?
<http://www.bluesbag6.narod.ru/index45.html>
20. *Н.И.Рыжков.* «Перестройка история предательств». - М.1992
21. *А. А. Дьяченко.* Опыт ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы. Часть 1. Институт стратегической стабильности Росатома. Москва 2004г.
<http://www.iss-atom.ru/book-7/index.htm>

22. 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, 07.05.86г., 5стр.,
23. Richard K. McCardella, Malcolm L. Russella, Douglas W. Akersa and Charles S. Olsena. Summary of TMI-2 core sample examinations. Nuclear Engineering and Design. Volume 118, Issue 3, April 1990, p. 441- 449.
24. В.А. Легасов «Мой долг рассказать об этом». «Энергия» №9,1996. 41-49с.
25. Проведение работ по засыпке реактора и пылеподавлению на бывшем 4-ом энергоблоке ЧАЭС и прилегающей к нему территории. Акт 09/05-93 от 16.09 96г. Отв. исполнитель Симаповская И.Я.
26. А.А. Боровой, Е.П. Велихов. К 25-летию аварии на Чернобыльской АЭС. Работы «Курчатовского института» по ликвидации последствий аварии. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2011г., 129с.
27. A. R. Sich. Chernobyl Accident Management Actions. Nuclear Safety, Vol.35, N1, January-June 1994, p.1-22.
28. В.М. Колобашкин, П.М. Рубцов, П.А. Ружанский, В.Д. Сидоренко. Радиационные характеристики облучённого ядерного топлива: Справочник. Москва, Энергоатомиздат, 1983.
29. 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.
30. «Китайский синдром» <http://www.ibrae.ac.ru/content/view/201/251/>.
31. Устройство плиты под разрушенным реактором. <http://chornobyl.in.ua/licvidacia-avarii.html>
32. Богатов С.А., Боровой А.А., Гаврилов С.Л. и др. База данных по местонахождению и состоянию ядерного топлива 4-го блока ЧАЭС до и после аварии. Препринт РНЦ «Курчатовский институт», №130-11/2 от 01.02.2007г., 146 с.
33. S. Bogatov, A. Borovoi, S. Gavrilov et. all. Half an hour after the beginning of the accident. ОКPRINT, Москва, 2005. 22 с.
34. Обобщение результатов материаловедческих исследований ТСМ за 1991г. Отчет КЭ при ИАЭ, №11.07/304 от 16.12.91г. Отв. Исполнитель Денисенко Э. Т., Чернобыль, 23с.
35. Пазухин Э.М., Краснов В.А. По поводу «грубого инженерного просчета», допущенного при проектировании реактора РБМК-1000, а также необходимости «существенной корректировки сценария протекания активной фазы аварии 1986 г. Проблемы Чернобыля, 2004, Вып. 15, с. 93 - 102.
36. Арутюнян Р.В., Большой Л.А., Васильев А.В., Стрижев В.Ф. Физические модели тяжелых аварий на АЭС. Под ред. Н.Н. Пономарева-Степного. М.: Наука, 1992, 232 с.
37. Гончар В.В., Жидков А.В. Динамика высокотемпературного взаимодействия аварийного ядерного топлива с конструкционными материалами РБМК. Проблемы Чернобыля, 2001, Вып. 9, с. 25 - 33.
38. Большой Л.А.: главное - быть полностью готовыми к тяжелым авариям на АЭС. <http://www.seclife.ru/news/bolshov-glavnoe-byt-polnostyu-gotovymi-k-tyazhelym-avariyam-na-aes>
39. Евгений Велихов и Вячеслав Письменный, О Чернобыле, 20 лет спустя. <http://trv.trovant.ru/arhiv/707/trv-707.pdf>
40. «Чернобыль. Пять трудных лет». Москва, Издат, 1992, 384с.
41. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отв. Исполнитель Боровой А.А. Отчет МНТЦ «Укрытие», арх. № 3836, 2001г. Чернобыль, 337 с.
42. Беляев С.Т., Боровой А.А. О преобразовании объекта «Укрытие». Отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова № 57-05/110 от 29.09.89 г., 5с.

43. Авария на атомных электростанциях Фукусима, эксплуатируемых компанией ТЕРСО. Доклад японского правительства. Конференция по ядерной безопасности МАГАТЭ на уровне министерств и ведомств. Июнь 2011

44. *Р.В.Арутюнян, В.Ф. Стрижов, А.Е.Киселев* и др. Технический экспресс отчет: предварительные оценки протекания аварии с полным обесточиванием на энергоблоках №1-3 и потери охлаждения бассейна выдержки на энергоблоке №4 АЭС Фукусима Дай-ичи. ИБРАЭ РАН. Госкорпорация «Росатом». Москва, 2011г., 64 стр.

45. *Richard L. Garwin*. Learning More from Fukushima Dai-ichi. International Seminars on Planetary Emergencies and Associated Meetings – 44th Session «The Role of Science in the Third Millenium» August 20, 2011 <http://www.fas.org/rlg/2011%20Erice%20Fukushima1a.pdf>

46. Материалы на сайтах.

Токуо Electric Power Co <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/>

Japan Atomic Industrial Forum <http://www.jaif.or.jp/english/>

Фукусима – Новости <http://fukushima-news.ru/news/>

Fukushima Nuclear Accident <http://www.iaea.org/newscenter/news/> и др.

47. <http://tengrinenews.kz/asia/182380/>

48. <http://www.atomic-energy.ru/news/2011/07/15/24375>

49. http://fukushima-news.ru/publ/nauchnoe/o_iadernyh_vzrivah/japonskie_uroki/6-1-0-164
