

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРИЧИНЫ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС И ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ РЕАКТОРА И ПОМЕЩЕНИЙ IV ЭНЕРГООБЛОКА

А.Г. Тарапон

Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАНУ

(Украина, Киев)

E-mail: svetlana@ipme.kiev.ua

Abstract

Tarapon A.G. Reconstruction of the reason of failure on the Chernobyl atomic power station and processes of destruction of a reactor and rooms of IV power unit. Results of three-dimensional mathematical modelling of processes in a reactor in various modes of its work are described and analyzed.

С момента аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) прошло уже более 17 лет, но до сих пор остается нерешенной проблема обеспечения безопасности объекта «Укрытие». Существует неопределенность в оценках количества и состояния аварийного топлива, так как высокие радиационные поля не дают возможности обследовать многие участки внутри объекта.

В Институте проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины разработаны трехмерные математические модели для исследования процессов тепломассопереноса в реакторе при различных режимах его работы и во время аварии, а также модели процессов теплопередачи в объекте «Укрытие». Для численной реализации разработанных математических моделей были созданы расчетные программы КАНАЛ, СЕКТОР ХУ и СЕКТОР ХУЗ [1, 2].

Моделированием процессов тепломассопереноса в каналах реактора РБМК-1000 доказано, что за указанное во многих работах [3-6] время начальной стадии разрушения реактора (7 секунд) всплеск интегральной мощности за счет положительного парового эффекта, ввиду возникновения кризиса теплообмена первого рода, при достижении плотности теплового потока значения $q_{кр}$ невозможен [1, 2, 7]. Поэтому официальная версия причины аварии – эффект положительного выбега реактивности от вытеснителей стержней системы аварийной защиты – по существу не состоятельна.

Предлагаемое в работе восстановление процессов протекания аварии на ЧАЭС проведено на основе:

- данных математического моделирования процессов тепломассопереноса, происходивших во время аварии в реакторе и после аварии в объекте «Укрытие»;
- записей в оперативном журнале четвертого энергоблока;
- имеющихся объективных данных разрушения помещения четвертого энергоблока;
- свидетельств очевидцев аварии;
- анализа расположения топливосодержащих масс (ТСМ);
- анализа химического состава ТСМ;
- анализа образования и микроструктуры аэрозолей.

Первый скрытый этап разрушения реактора

В работах [1, 2] в 1998 г. автором было выдвинуто предположение о начале аварии в результате кризиса теплообмена второго рода, который произошел за 15 мин до нажатия кнопки аварийной защиты АЗ-5. Такое время было получено в результате моделирования кризиса теплообмена в реакторе РБМК-1000 при мощности 200 МВт.

Анализ хронологической последовательности событий аварии на четвертом блоке ЧАЭС [3, 4, 6], проведенный в 1999 г., подтвердил это предположение. Из записей в оперативном журнале 4-го энергоблока:

00 час. 28 мин. Допущено непредусмотренное программой снижение мощности до 30 МВт (нейтронной мощности - до нуля). Начат подъем мощности.

00 час. 41 мин. Отключение от сети ТГ-8.

01 час. 03 мин. Тепловая мощность реактора поднята до 200 МВт.

01 час. 06 мин. Для восстановления парового уровня в барабан-сепараторах поступление питательной воды превышает 1200-1400 тонн/час.

Действительно, после отключения от сети ТГ-8 вся энергия, выделяемая в активной зоне реактора, расходовалась на нагрев питательной воды, поступающей в барабан-сепараторы (БС) с температурой 170°C. Если указанный расход питательной воды (1200-1400 тонн/час) умножить на среднюю объемную теплоемкость воды и на разность температур воды в БС и питательной воды (113°C), получим мощность ≈ 200 МВт.

01 час. 07 мин. Включен в работу восьмой ГЦН (главный циркуляционный насос).

01 час. 09 мин. Резко снижен расход питательной воды до 90 т/ч по правой стороне и до 180 т/ч по левой стороне при общем расходе по контуру 5600-5800 т/ч. В результате температура на всосе ГЦН составила 280.8°C (левая сторона) и 283°C (правая сторона).

Этой записью было зафиксировано начало кризиса теплообмена второго рода. Резкое снижение расхода питательной воды (по левой стороне до 180 тонн/час – мощность 27 МВт, по правой – до 90 тонн/час – мощность 13.5 МВт), при этом интегральная мощность реактора осталась на уровне 200 МВт, что позволяет сделать два вывода: мощность была поднята только в одном (юго-восточном) квадранте, а в других осталась на уровне 13.5 МВт (остаточное тепловыделение); в указанном квадранте полностью прекратился теплообмен.

До нажатия кнопки АЗ-5 осталось 14 минут и 43 секунды. Прогнозное время, полученное в результате моделирования, - 15 минут.

За это время температура оболочек твэлов (тепловыделяющих элементов) достигла температуры разрушения циркониевого сплава, что привело к закупорке каналов, испарению воды и всплеску реактивности.

На этом заканчивается первый скрытый этап разрушения реактора.

Анализ аварий на АЭС с реакторами РМБК-1000 показывает, что еще в двух случаях разрушение каналов было обусловлено возникновением кризисов теплообмена второго рода. Сведения об этих авариях приведены в работе [3].

В частности, 9 сентября 1982 г. произошла серьезная авария с выбросом радиоактивности в окружающую среду на 1-м блоке Чернобыльской АЭС. Первопричина аварии – ошибочное действие оператора, выполнявшего поканальное регулирование расхода запорно-регулирующими клапанами (ошибочное прикрытие клапана вместо его открытия). В результате – образование кризиса теплообмена второго рода. Как показали результаты моделирования, при номинальной мощности реактора он приводит к разрушению канала через 45-50 с. При этом образование кризиса в одном канале ничем не фиксируется, аварийной защиты нет.

Уже после Чернобыльской катастрофы в апреле 1993 г. на 3-м блоке Ленинградской АЭС произошла подобная авария с разрушением технологического канала. В данном случае причиной снижения расхода через канал стал отказ запорно-регулирующего клапана технологического канала, обусловленный его конструктивной недоработкой. Эта авария инициировала замену запорно-регулирующих клапанов на всех блоках АЭС с реакторами РМБК, в том числе и на энергоблоках ЧАЭС.

Второй скрытый этап разрушения реактора

Второй скрытый этап разрушения реактора длился примерно 45 с. Процессы разрушения реактора были исследованы нами на моделях нагрева твэлов реактора, нагрева несущего центрального стержня тепловыделяющих сборок, разрушения каналов реактора, а также моделях плавления, испарения и сублимации материалов.

Данные о распределении теплового потока по высоте канала перед аварией взяты из [5]. Максимальное энерговыделение наблюдалось на высоте $\sim 4,5$ м от нижней границы активной зоны. На этом уровне после закупорки каналов в разрушенной части реактора канал полностью заполняется таблетками топлива за счет собственной массы и выталкивания последних пружиной сжатия. В месте разрушения оболочек твэлов количество топлива в каналах увеличивается приблизительно в 1,4 раза [8]. Происходит увеличение энерговыделения, нагрев и разрыв центральных несущих стержней ТВС. Модели теплопроводности показали, что процесс нагрева до разрыва длится $10\div 30$ с и зависит от мощности энерговыделения.

Разрыв центральных несущих стержней приводит к опусканию нижних и части верхних кассет ТВС в нижний отражатель нейтронов. Из оставшихся в верхней части активной зоны твэлов таблетки диоксида урана высыпаются в освободившееся пространство труб каналов.

Введение в активную зону реактора дополнительного количества ядерного топлива создало условия для развития ядерной цепной реакции на быстрых нейтронах в локальной зоне реактора.

В так называемых импульсных реакторах самогасящего действия гашение импульса происходит за счет уменьшения коэффициента размножения нейтронов, вследствие разогрева активной зоны во время импульса, и импульс может быть повторен после охлаждения реактора (несколько часов).

В случае аварии на ЧАЭС поступление холодного топлива с верхней части активной зоны превратило эту локальную зону в реактор-размножитель (бридер), в котором число образовавшихся делящихся ядер больше числа уничтоженных, т. е. осуществлялось расширенное воспроизводство делящихся ядер.

Плавился и кипел диоксид урана (температура плавления $\sim 2647^\circ\text{C}$, кипения $\sim 3727^\circ\text{C}$) (время начала кипения при номинальной мощности – 23,4 с, при десятикратной мощности - 1,8 с). Плавился и кипел циркониевый сплав труб каналов (температура плавления $\sim 1850^\circ\text{C}$, кипения $\sim 4327^\circ\text{C}$) (рис. 1),

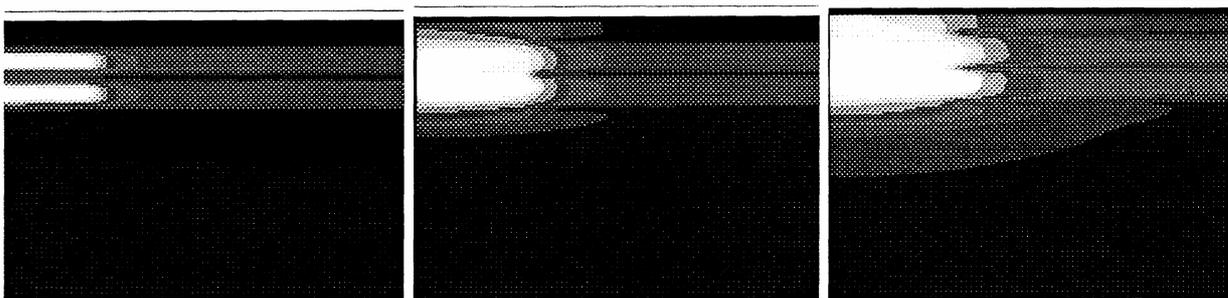


Рис. 1 - Разрез технологического канала. Изменение температуры при локальном разгоне мощности.

Температура достигла $4500\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего начал сублимироваться графит (время разрушения канала при номинальной мощности - примерно 43 с, при десятикратной - 10 с).

В освобождаемый от графита объем продолжают высыпаться таблетки диоксида урана. Растут температура и давление, которое удерживает в верхнем положении графитовую кладку, оставшуюся над пространством, где графит испарился. Процесс разрушения реактора внутри был подобен горению свечи. Когда давление внутри реактора превысило усилие штанг, удерживающих графитовую кладку от радиальных перемещений, произошло разрушение графитовой кладки бокового отражателя реактора.

При этом первыми вырвались штанги, где толщина бокового отражателя нейтронов составляла 0,75 м.

В юго-восточном квадранте реактора на высоте 4,5 м от низа активной зоны, где толщина отражателя нейтронов составляла 0,75 м, в восточном направлении была прожжена стена в бассейн выдержки (БВ). Плазма образовала топливосодержащие массы с максимальными плотностью нейтронного потока и радиоактивностью (рис. 2) [9] на расстоянии ~ 7 м от реактора, создавая при этом низкочастотный шум.

Разрушение реактора продолжалось в южном направлении. В результате вырвались штанги в тех местах, где толщина отражателя была равна 1 м. Восточная стена реакторного помещения прожглась еще в одном месте, и в южном БВ, на расстоянии 11 м от реактора, образовались топливосодержащие массы с меньшим количеством активного топлива в них (рис. 2).

Все процессы произошли на восточной периферии активной зоны юго-восточного квадранта реактора, где энерговыделение было максимальным. Мы установили [10], что поток плазмы в течение 1 мин расплавил ~ 600 т песка из засыпки, бетонных стен реакторного помещения, образуя черные лавообразные топливосодержащие массы

(ЛТСМ). При образовании черных ЛТСМ топливо в них попало за счет конденсации паров двуокиси урана.

Все описанные процессы происходили до нажатия кнопки АЗ-5. Старший инженер группы управления реактором 4-го энергоблока ЧАЭС, услышав усиливающийся низкочастотный шум, увидел, что установленная мощность увеличивается. Об этом он сообщил руководителю 4-го энергоблока, приказавшему остановить реактор.

На этом заканчивается второй скрытый этап разрушения реактора.

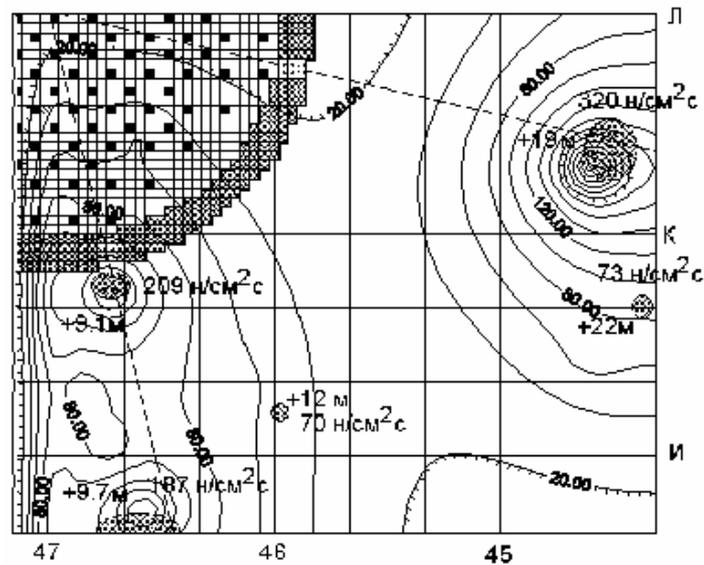


Рис. 2 - Нейтронные потоки в объекте «Укрытие» (юго-восточный сектор реактора).

Третий этап: взрывы

Взрыв – очень быстрое выделение энергии в ограниченном объеме, связанное с внезапным изменением состояния вещества, при котором внутренняя энергия (химическая, ядерная или изменения состояния вещества) превращается в тепловую энергию. Химические взрывчатые вещества обладают небольшим тепловыделением ($\sim 4 \cdot 10^3$ кДж/кг), но из-за малого времени химического превращения ($\sim 10^{-5}$ с) вещество не успевает разлететься в процессе взрыва и образует газ с высокой температурой ($2 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$ К) и давлением до 10 ГПа (10^5 атм). Расширение газа приводит в движение окружающую среду – возникает взрывная волна, скорость распространения которой вблизи очага взрыва достигает нескольких км/с. Взрывная волна оказывает механическое воздействие на окружающие объекты.

Тепловой взрыв осуществляется в условиях, когда оказывается невозможным тепловое равновесие между реагирующим веществом и окружающей средой.

В процессе сублимации графита, происходящей при температуре $\sim 4.5 \cdot 10^3$ К, поглощается энергия $L=60 \cdot 10^3$ кДж/кг, которая при снижении давления и расширении паров графита передается в окружающую среду (в 15 раз больше, чем при взрыве химического взрывчатого вещества). В результате температура резко повышается и происходит взрыв.

В 1995 г. группа сотрудников МНТЦ «Укрытие», руководимая профессором Верюжским, выполнила работы по численному моделированию взрыва, во время которого схема «Е» была подброшена в пространство центрального зала. Физическая и математическая модели начального взрывного воздействия учитывали фактическую картину разрушений, а именно: наблюдаемое положение схемы «Е» и состояние схемы «Л».

Анализ энергетики точечного взрыва внутри корпуса реактора показал, что для выброса массы 3000-4000 т необходим тротильный заряд 1700-2600 кг.

Во время аварии металлоконструкции схемы «Л» остались практически целыми. А это значит, что при аварии пороговое значение давления в реакторном пространстве, разрушающее схему «Л», достигнуто не было. Численным моделированием показано, что давление во время взрыва не могло превышать 70 атм, поэтому взрыв с тротильным точечным зарядом в данном случае маловероятен, т. к. максимальные давления достигали бы при этом 300 атм.

В связи с этим были рассмотрены возможности метания крышки реактора силами сжатого пара. Полученные значения предельно набираемой в процессе разгона крышковой высоты и скорости в этом случае, полученные численным моделированием, представлены в следующей таблице:

P, атм	20	30	40	50	60	70
V, м/с	10.2	13.7	16.8	19.6	22.2	24.7
H, м	5.3	9.5	14.2	19.4	24.9	30.7

Во время первого большого верхнего разгона на мгновенных нейтронах, схема «ОР» с графитовой кладкой опустилась вниз и произошло первое импульсное поднятие («подпрыгивание») схемы «Е».

Схема «ОР» опустилась вниз на 3.85 метра в подапаратное помещение, смяв опору - схему «С» и приблизительно метр двух тысяч стальных труб нижних трактов наращивания схемы «ОР». В этот момент объем реакторного пространства увеличился во много раз, открылось восемь предохранительных клапанов, и к объему подапаратного

помещения подключились помещения парораспределительного коридора на отметке 6 м и бассейна-барботера на отметках 2.2 и 0.65 м.

В результате разрушения нижних компенсаторов с серпентинитовой засыпкой пары графита попали в подреакторное помещение, расширились, и произошел взрыв, который привел к разрушению железобетонной стены между подреакторным помещением и помещением 304/3 толщиной в 1 метр и выбросу откатных ворот в помещение 308/2. Все перечисленное выше персоналом ЧАЭС, находящимся в этот момент на 2-ой очереди, воспринималось как первый резкий удар по строительным конструкциям.

«Подпрыгивание» схемы «Е» происходило следующим образом технологические каналы в юго-восточном квадранте, как уже сказано, были разрушены в процессе локальной цепной реакции. Поэтому усилие для разрыва технологических каналов с северной стороны было необходимо в два раза большее, что привело к поднятию схемы «Е» с северной стороны на большую высоту. В результате этого тепловыделяющие сборки (ТВС) с северной стороны были полностью извлечены из технологических каналов, и открытие реакторного помещения произошло с этой стороны. Пары графита, расширяясь, выделяли энергию, которая расплавляла ТВС и металлические блоки верхней, тепловой защиты схемы «Е» и вынесли диспергированное топливо в центральный зал.

Это подтверждается визуальным обследованием нижней решетки схемы «Е», которым установлено, что металлические блоки верхней, тепловой защиты схемы «Е», принадлежащие технологическим каналам (ТК) только северной петли контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ), сплавилась, и почти из каждого ТК выходят одинаково изогнутые, длиной около 0,5 м, сходящиеся к концу на конус, оставшиеся части стержней подвесок ТВС.

На южной половине нижней решетки схемы «Е» сохранилось несколько десятков практически целых ТВС (без реализации локального разгона реактора в юго-восточном секторе целых ТВС обнаружить не смогли бы), оставшиеся части стержней подвесок ТВС, остатки графитовых колонн с каналами, разрушенными ТВС и прочими конструктивными элементами АЗ.

Попадание паров графита в центральный зал (ЦЗ) и смешивание их с кислородом воздуха привело к взрыву, началу разрушения ЦЗ и образованию пламени. Именно этот (первый) факел, который достигал высоты обреза вентиляционной трубы 2-ой очереди, наблюдал очевидец Романцов.

В результате опускания схемы «ОР» в подреакторное помещение разгон на быстрых нейтронах прекратился, но цепная реакция продолжалась, причем с нарастающей мощностью, что подтверждается наличием образовавшихся в это время черных ТСМ, которые в помещении

304/3 имеют значительное уменьшение плотности по толщине (плотность на поверхности значительно меньше, чем у пола). В это время образуется грот в стене помещения 305/2 в восточном направлении (к комнате 307/2) и пары графита, которые из подреакторного помещения через пролом в стене попадали в помещение 304/3 и через него - в ряд помещений четвертого блока, вызвали в них взрывы и пожары. Разработанная модель плавления бетона показала, что при температуре плазмы равной 10000°С скорость плавления бетона равна 0.2 м/с, что хорошо согласуется со скоростью разрушения восточной стены подреакторного помещения (почти 2 м за 10-15 с). Все перечисленное выше персоналом ЧАЭС, находящимся в этот момент на 2-ой очереди, воспринималось как первый резкий удар по строительным конструкциям.

«Подпрыгивание» схемы «Е» происходило следующим образом: технологические каналы в юго-восточном квадранте, как уже сказано, были разрушены в процессе локальной цепной реакции. Поэтому усилие для разрыва технологических каналов с северной стороны было необходимо в два раза большее, что привело к поднятию схемы «Е» с северной стороны на большую высоту. В результате чего ТВС с северной стороны были полностью вытаснены из технологических каналов, и открытие реакторного помещения произошло с этой стороны. Пары графита, расширяясь, выделяли энергию, которая расплавила ТВС и металлические блоки верхней, тепловой защиты схемы «Е» и вынесли диспергированное топливо в центральный зал.

Это подтверждается визуальным обследованием нижней решетки схемы «Е», которым установлено, что металлические блоки верхней, тепловой защиты схемы «Е», принадлежащие ТК только северной петли КМПЦ, сплывались, и почти из каждого ТК выходят одинаково изогнутые, длиной около 0,5 м, сходящиеся к концу на конус, оставшиеся части стержней подвесок ТВС.

На южной половине нижней решетки схемы «Е» сохранилось несколько десятков практически целых ТВС (без реализации локального разгона реактора в юго-восточном секторе целых ТВС обнаружить не смогли бы), оставшиеся части стержней подвесок ТВС, остатки графитовых колонн с каналами, разрушенными ТВС и прочими конструкционными элементами АЗ.

Попадание паров графита в ЦЗ и смешивание их с кислородом воздуха привело к взрыву, началу разрушения ЦЗ и образованию пламени. Именно этот (первый) факел, который достигал высоты обреза вентиляционной трубы 2-ой очереди, наблюдал очевидец Романцов.

В результате опускания схемы «ОР» в подреакторное помещение разгон на быстрых нейтронах прекратился, но цепная реакция продолжалась, причем с нарастающей мощностью, что подтверждается наличием образовавшихся в это время черных ТСМ, которые в помещении

304/3 имеют значительное уменьшение плотности по толщине (плотность на поверхности значительно меньше, чем у пола). В это время образуется грот в стене помещения 305/2 в восточном направлении (к комнате 307/2) и пары графита, которые из подреакторного помещения через пролом в стене попадали в помещение 304/3 и через него - в ряд помещений четвертого блока, вызвали в них взрывы и пожары. Разработанная модель плавления бетона показала, что при температуре плазмы равной 10000°C скорость плавления бетона равна 0.2 м/с, что хорошо согласуется со скоростью разрушения восточной стены подреакторного помещения (почти 2 м за 10-15 с).

За счет превращения углерода из газообразного состояния в твердое в юго-восточном квадранте подреакторного помещения температура поддерживалась на уровне 4500°C. Поэтому стальная обшивка комнаты 305/2 и теплоизоляция в юго-восточном квадранте отсутствуют.

Модель плавления труб водяных коммуникаций показала, что при температуре 4500°C время плавления равно $\tau=3.5$ с.

Наличие в черных и коричневых ТСМ железных шариков и струй, их расположение в ПРК сверху железа говорит о том, что они образовались после плавления труб водяных коммуникаций юго-восточного сектора реактора, когда в помещении находились пары железа. Доказательством наличия паров железа является железная корка в помещении 210/5, сажа и закопченность всех помещений – наличия паров графита.

Во время второго большого нижнего разгона на мгновенных нейтронах, который произошел в юго-восточном квадранте через ~14-17 с после первого и был во много раз мощнее его, был полностью разрушен юго-восточный квадрант схемы «ОР» и образованы коричневые ТСМ, выброшены схема «Е», схема «КЖ» и графитовая кладка реактора в центральный зал. Это была серия взрывов.

Вылет схемы «Е» сопровождался выбросом пламени светло-фиолетового цвета полукилометровой высоты и огромным облаком графитового пепла, который, по свидетельству очевидцев, осаждаясь, покрыл площадь размером 0,5 км.

За третьим взрывом из окна на расстоянии 200 м наблюдал начальник смены ЧАЭС. Он подошел к окну после первых взрывов. Звук при взрывах был таким, как при преодолении самолетом звукового барьера. Яркая вспышка осветила комнату, давая возможность увидеть обломки бетона и металла, которые разлетались во все стороны. Еще какое-то мгновение продолжались другие вспышки.

На основании анализа публикаций и результатов моделирования мы установили, что схема «Е» в результате своих перемещений вытащила из 3/4 неповрежденных технологических каналов топливо в центральный зал, где происходили взрывы, вызванные превращением паров графита в твердое состояние с последующим его окислением и образованием СО и

CO₂. Во время этих взрывов были расплавлены оболочки твэлов и произошло образование топливной пыли. Таким образом, основная часть ядерного топлива попала наверх в разрушенный центральный зал реактора и под сооруженную при строительстве объекта «Укрытие» каскадную стену. Эти взрывы разрушили стены центрального зала и стены помещений барабан-сепараторов.

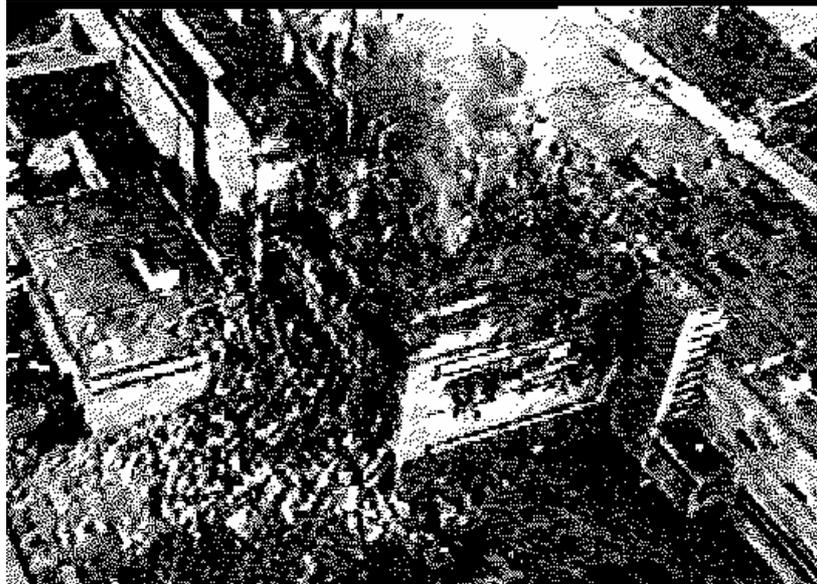


Рис. 3 - Здание 4-го энергоблока после аварии.

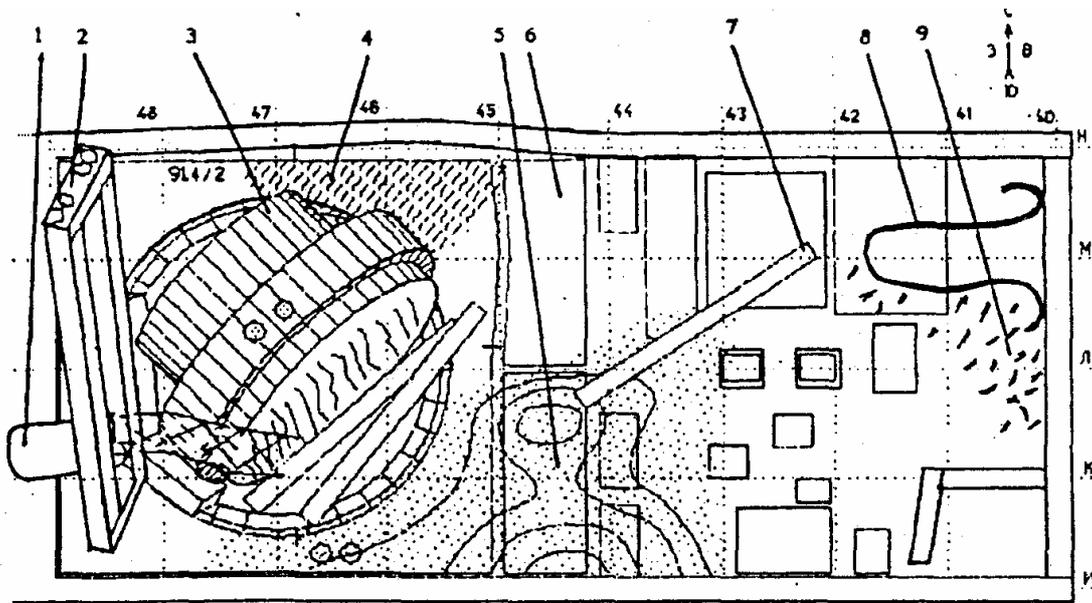


Рис. 4. План центрального реакторного зала после аварии [11]: 1 - скафандр разгрузочно-загрузочной машины; 2 - мост разгрузочно-загрузочной машины; 3 - металлоконструкция схемы «Е»; 4 - погнутые

трубы коммуникаций; 5 - завал из материалов, сброшенных с вертолетов; 6 - бассейн выдержки с северной стороны; 7 - балка; 8 - металлоконструкция схемы «КЖ»; 9 - ТВС и их фрагменты.

Образовавшиеся в процессе последнего взрыва обломки ТВС и фрагменты бетонных конструкций попали в реакторное и подреакторное помещения во время полета схемы «Е» [12, 13].

Исследование «горячих» частиц подтверждает предлагаемую нами версию развития аварии. В работе [6] говорится о том, что радиоактивным материалом первого выброса был испаряемый материал активной зоны с высокими температурами плавления и испарения. В процессе аварии были образованы частицы с ядрами из материалов, которые имели более высокую температуру испарения, а оболочкой – из материалов, в которых температура испарения была ниже. Указывается, что для образования таких частиц температура в реакторе должна достигать 7000 °С.

В [13] отмечается, что так же, как и в «горячих» частицах, образованных при атомных взрывах, в ТСМ 4-го блока ЧАЭС наблюдается значительное обеднение ^{137}Cs (его количество составляет ~40% по сравнению с расчетными значениями, в то время как для ^{90}Sr эта величина достигает 100%).

В работе [14] приведены результаты исследования топливных «горячих» частиц (ТГЧ) западного следа с помощью использования сканирующего электронного микроскопа РЕМ-100У с волновым и энергодисперсным спектрометрами. В процессе исследования использовались оригинальные методы сепарирования (отбора) частиц. В результате выполнено систематическое исследование морфологии и свойств ТГЧ. Проанализировано более 1200 частиц. В результате было подтверждено наличие двух классов частиц, которые резко отличаются морфологией, элементным составом и физико-химическими свойствами.

Первый класс представляет собой частицы диоксида урана, которые сохранили характерные морфологические особенности доаварийного топлива.

Частицы второго класса имеют в своем составе, кроме диоксида урана, примеси элементов, которые входят в состав ТВС. Результаты исследований этих частиц показывают, что они образовались из сплава, который возник вследствие плавления топлива и других деталей ТВС, и прошли стадию быстрой кристаллизации.

Выявлены частицы с характерными следами пластической деформации кристаллов топлива под действием давления осколочных газов в результате развития цепной самоподдерживавшейся реакции с взрывными параметрами. Объемный парогазовый взрыв не может сделать импульс давления для деформации кристаллов топлива.

В работе [15] указывается на то, что в дисперсной фазе, осажденной на поверхностях объекта «Укрытие», присутствуют образовавшиеся в активной стадии запроектной аварии частицы со сферической и нитевидной формами. Сферические частицы характеризуются различными и отличающимися от аналогичных для ядерного топлива 4-го энергоблока соотношениями ^{144}Ce , ^{241}Am , Pu и U в разных слоях. Эти частицы свидетельствуют о том, что в активной стадии аварии протекали процессы высокотемпературного распыления элементов и последующей объемной спонтанной конденсации паров.

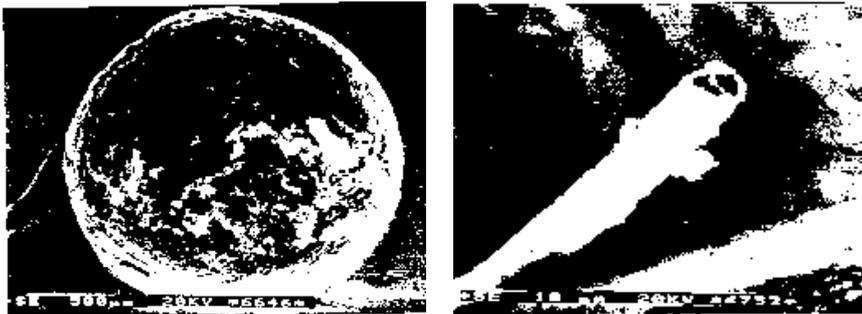


Рис. 5 - Сферическая и нитевидные частицы дисперсной фазы аэрозолей.

Выводы

Появление частиц, являющихся ядрами конденсации, с неравномерным распределением радиоактивных элементов в различных слоях при содержании во внешнем слое частиц наиболее летучих компонент указывает на то, что их образование могло происходить в условиях ядерного взрыва.

Во время аварии в реакторе испарилась приблизительно 1/8 часть графита, а на его сублимацию потребовалось $14,3 \cdot 10^9$ кДж. Процесс длился ~60 с, средняя интегральная мощность составила 240000 МВт (т.е. в 75 раз превысила номинальную тепловую мощность реактора (3200 МВт)). При учете теплоты, затраченной на испарение 1/4 количества топлива, мы получили величину всплеска интегральной мощности, которая примерно в 80 раз превышает номинальную, что практически совпадает с результатами, полученными на модели Института атомной энергии им. И. В. Курчатова.

Разработанная в процессе проведенных исследований теплофизическая модель, с помощью которой были получены описанные выше результаты, вполне может стать основой для построения новой системы обеспечения радиационной и ядерной безопасности «Укрытия», в которой давно назрела необходимость.

Литература

1. *Тарапон А. Г.* Моделирование процессов кризиса теплообмена в реакторах РБМК-1000// Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. 1998. Вип 3. С. 13-24.
2. *Тарапон А. Г.* Моделирование процессов тепломассопереноса во время аварии на ЧАЭС// Там же. - С. 3 - 13.
3. *Герасько В. Н., Ключников А. А., Корнеев А. А. и др.* Объект «Укрытие»: история, состояние и перспективы. Киев: Интерграфик. 1997. –223 с.
4. *Чернобыль. Пять трудных лет: Сб. материалов.* М.: Атомиздат. 1992. - 381 с.
5. *Кучин А. В., Халимончук В. А.* Нейтронно-физические и теплофизические исследования аварии на 4-м энергоблоке ЧАЭС/ Докл. НАН Украины. 1993. №1. - С. 140 – 147.
6. *Edvard E. Purvis III* The Chornobyl 4 accident sequence – April 1995. - ISTC, 1995. -178 p.
7. *Тарапон А.Г.* Модели начальной стадии аварии на Чернобыльской АЭС// Зб. наук. праць ІПМЕ НАНУ. Вип. 4. Вид. ‘Світ’. Львів, 1998.-С. 63-69.
8. *Тарапон А.Г.* Реконструкция аварии на ЧАЭС на основе моделей тепломассопереноса//Электронное моделирование. ИПМЭ НАНУ. 2001. Т.23, №3. -С. 89 - 106.
9. *Тарапон А.Г.* Модели процессов тепломассопереноса во время аварии на Чернобыльской АЭС и в объекте «Укрытие». Киев: ИПМЭ НАН Украины. 1998.- 150 с.
10. *Киселев А.Н., Сурин А.И., Чечеров К.П.* Послеаварийное обследование реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС//Атомная энергия. Т. 80. Вып. 4, апрель 1996 .-С. 240-247.
11. *Боровой А. А., Лагуненко А. С., Пазухин Э. М.* Подапаратное помещение 305/2 4-го блока Чернобыльской АЭС: его состояние, оценка количества топлива.-Чернобыль. 1997. –11 с. (Препр./НАН Украины. МНТЦ "Укрытие"; 97-7).
12. *Боровой А.А., Гаврилов С.Л.* Создание базы данных "Ядерное топливо и радиоактивные отходы в объекте "Укрытие" Чернобыльской АЭС" (на англ. язык.)/Институт проблем безопасности развития атомной энергетики РАН. Препринт № IBRAE - 2001 - 01.
13. *Бондарьков М. Д., Желтоножский В. А., Мюк К. и др.* Изучение соотношений ^{90}Sr и ^{137}Cs в горячих частицах атомных взрывов/Міжнар. Чорнобильський центр: Наук.-техн. та соц. аспекти закриття Чорнобильської АЕС// Тези доп. 4-ї щоріч. конф. - Славутич. - С. 225.
14. *Петелин Г., Зимін Ю., Рибалка В.* Деякі аспекти аварії на IV блоці ЧАЕС на основі результатів вивчення викидів ядерного палива// Міжнар. конф. "П'ятнадцять років Чорнобильської катастрофи. Досвід подолання"/ МНС України.

15. *И. Е Кузьмина, В. В. Токаревский.* Деструкция ядерного топлива после запроектной аварии на четвертом энергоблоке ЧАЭС. Государственный научный центр РФ – Физико-Энергетический Институт ФЭИ-23-17. Обнинск, 1996. 34 с.

Дата надходження до редколегії: 22.12.2003 р.