



П.А. Платонов

ИАЭ-6486/11

**О ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ АКТИВНОЙ
ЗОНЫ РЕАКТОРА IV БЛОКА ЧАЭС
(РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ФАКТОВ)**

Аннотация

Ключевые слова: Чернобыльская авария, разрушение активной зоны, диспергирование диоксида урана, температура графита.

Приводится анализ результатов исследования фрагментов графитовых блоков, собранных на 4-ом аварийном блоке Чернобыльской АЭС, делаются оценки температуры графитовых блоков в момент выброса из реактора, проводится также анализ изучения фрагментов и дисперсий топлива.

Делаются оценки теплосодержания топлива в момент взрыва, а также некоторые выводы о характере разрушения активной зоны.

Key words: Chernobyl accident, destruction of active core, dispersion of uranium dioxide, graphite temperature.

ABSTRACT

The results of testing of graphite bricks fragments which were collected at Chernobyl NPP, Unit 4 are presented, the estimations of graphite bricks temperature at the moment of their ejection from active core of the reactor have done, analysis of fuel fragments and dispersion carries out too.

The evaluation of value of fuel thermal capacity at the moment of explosion and also some conclusions about the nature of active core distortion have been made.



Российский научный центр "Курчатовский институт"

П.А. Платонов

**О процессе разрушения активной зоны реактора IV блока ЧАЭС
(ретроспективный анализ экспериментов и фактов)**

Москва, 2007

Памяти Ф.Ф. Жердева
посвящается

Введение

Более 20 лет прошло с момента Чернобыльской катастрофы; казалось бы, все должно быть исследовано, проанализировано и поставлена точка. Однако до сих пор остается неясным вопрос о характере и процессе разрушения реактора 4^{го} блока ЧАЭС, и не сведен баланс по топливу. Согласно проведенным исследованиям и официальной версии, озвученной на различных форумах [1], количество выброшенного из реактора топлива составляет около 3 %. В последнее время называется цифра до 5%. Однако до сих пор баланса по топливу нет и, по-видимому, не будет до тех пор, пока не будет определено количество топлива во всех помещениях реактора; такая возможность еще долго не представится. Оценки, приводимые в некоторых работах, удивительны; например, говорится о том, что в лавообразных массах содержится порядка 60 – 100 тонн топлива [2]. Говорить о реалистичности таких оценок просто бессмысленно.

Что касается процесса разрушения, то большинство версий основано на том, что взрыв реактора произошел в шахте, большая часть топлива слилась в виде лавообразных топливосодержащих масс (ЛТСМ), а графит сгорел. Конечно, это упрощенная формулировка, но она верно отражает тенденцию. Развитие

представлений о процессе разрушения реактора 4^{го} блока ЧАЭС рассмотрено в книге, выпущенной НИКИЭТ [3]. Сейчас совершенно очевидно, что эти версии не соответствуют многолетнему и, по возможности, тщательному обследованию состояния различных помещений здания аварийного реактора [4]. В известной мере «революционный» поворот наметился после появления в печати [5] версии развития процесса разрушения с выбросом активной зоны из шахты реактора ее взрывом в воздухе и испарением значительной части топлива. Эта версия была негативно воспринята большей частью специалистов, занимающихся проблемой Чернобыля, но среди ее сторонников оказался Главный Конструктор реакторной установки.

В известной мере авторы работы [5] в оценке возможности испарения активной зоны опирались на работу сотрудников ИАЭ им. И.В. Курчатова по исследованию графитовых блоков, отобранных на крыше 3^{го} блока ЧАЭС и на промплощадке. Проведенный анализ показал, что температура графитовых блоков отражателя в момент взрыва (вылета из реактора) превышала 1000 °С. Сделанные упрощенные расчеты показали, что при такой температуре отражателя (если разогрев произошел в момент взрыва) графит активной зоны или, по крайней мере, части ее должен был испариться. По этому поводу был выпущен отчет в августе 1986 г. (автор настоящей работы – в числе авторов). Однако отчет не был воспринят руководством института и пролежал на полке до тех пор, пока не был использован авторами работы [5]. Очевидно, поднимать дискуссию по этому поводу в то время было не своевременно. Эти материалы и результаты дополнительно проведенных экспериментов, в том числе по исследованию топлива, выброшенного из реактора (без оценки возможности испарения зоны) были представлены на рабочей группе по тяжелым авариям в Дагомысе, но не были опубликованы в трудах этой рабочей группы [6]. Поскольку мы понимали бесперспективность дальнейших исследований, к тому же основной исполнитель этих работ, активный участник ликвидации последствий аварии, Ф.Ф. Жердев, умер, работы были свернуты. Однако на фоне происходящих время от времени дискуссий, которые иногда приобретают скандально-оскорбительный характер [7], автор решил провести дополнительный анализ полученных ранее данных с тем, чтобы представить дополнительное обоснование возможности реализации версии аварии с выбросом активной зоны из шахты, только на основе экспериментальных фактов. Автору помогло то, что материалы Ф.Ф. Жердева удалось разыскать в его электронном архиве, некоторые из них вошли в эту работу без изменения.

1. Результаты исследования графита кладки активной зоны аварийного реактора.

В течение лета 1986 г. сотрудниками ИАЭ проведено несколько посещений промплощадки ЧАЭС с целью сбора фрагментов конструкций активной зоны 4^{го} блока. Накопленные наблюдения и анализ свидетельств очевидцев позволили отметить некоторые особенности взрыва.

Фрагменты графитовых блоков, собранные на крышах, были глубоко сплавлены в битум, который непосредственно около графита в некоторых случаях приобрел характерную стеклообразную карбонизированную структуру.

При очистке площадок вентиляционной трубы были обнаружены блоки, приварившиеся к стальному полу (при $T > 1000^{\circ}\text{C}$ в области контакта графита со сталью возникает чугун).

Небольшие куски графита, упавшие около южной стены, внутри машинного зала, были еще горячими через ≥ 20 минут после взрыва (по свидетельству пожарных). Свидетели взрыва и пожарные указывали на свечение фрагментов графита, выброшенных на крыши. Свидетели при этом отмечали, что графит светился голубым светом. Последнее свидетельствовало о том, что графит горел, т.е. температура его была выше температуры зажигания, составляющей около $900 - 1000^{\circ}\text{C}$. Так как пожарные прибыли спустя несколько минут после взрыва, можно полагать, что начальная температура графита была существенно выше 1000°C .

Помимо фрагментов графитовой кладки был обнаружен на крыше здания баллонной САОР и доставлен в ИАЭ кусок ТК, который включал нижний концевой переходник; он был идентифицирован по номеру, как принадлежащий периферийной зоне реактора (в юго-западном квадранте).

Перечисленные факты заставили при исследовании собранных фрагментов графита сосредоточить внимание на попытках восстановления величины их температуры в момент выброса.

На схеме рис. 1 представлен план части строительных конструкций ЧАЭС, примыкающих к аварийному блоку, с обозначением мест отбора фрагментов кладки. Приблизительные границы основного выброса обозначены нашими сотрудниками в процессе сбора фрагментов летом 1986 г. На рисунках 2 и 3 представлены схемы некоторых фрагментов и реконструкция их расположения в полноразмерном блоке, там, где это было возможно сделать. Поверхности кусков графита имели видимые следы высокотемпературной коррозии, хотя нельзя исключить вероятность закопчения.

Большая часть фрагментов графитовых блоков являлись частями коротких нижних блоков или пробок-заглушек бокового отражателя реактора. Почти во всех остальных случаях (исключая блок с расклиненным в нем кольцом твердого контакта) вопрос о местоположении исходного блока оставался открытым. Для привязки фрагментов блоков по их положению в реакторе были проведены следующие исследования.

Как известно, реакторный графит изменяет свои физико-механические свойства под действием облучения быстрыми нейтронами, и характер этого процесса зависит от температуры. Отсюда, зная распределение температуры и потока нейтронов по высоте и радиусу активной зоны и физико-механические свойства выброшенного графита, можно попытаться выделить вероятную зону реактора, которой принадлежал данный фрагмент.

Однако реальная ситуация осложняется несколькими обстоятельствами:

- естественным разбросом значений исходных свойств графита;
- малостью накопленного флюенса, приводящего лишь к незначительному изменению большинства параметров материала;
- возможным термическим отжигом изменения свойств материала, если его температура в процессе аварии достигала уровня 1000 – 1500 °С.

Для 4^{го} блока ЧАЭС, проработавшего 2 года, максимальный флюенс на материал кладки активной зоны составлял в среднем $1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,18 \text{ МэВ}$); для блоков отражателя эта величина существенно меньше в зависимости от положения блока в отражателе. При этом температура блоков отражателя при нормальной эксплуатации находилась в пределах 300 – 350 °С, а в случае блоков активной зоны составляла для внутренней поверхности $\geq 450 - 550$ °С, для наружной – $\geq 550 - 650$ °С. Ожидаемые изменения некоторых структурно-физических характеристик графита при таких условиях облучения составляют величины, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Изменение некоторых структурно-механических свойств графита РБМК под облучением.

| | Исходные значения | | Ожидаемые значения | | | | | |
|---|-------------------|-----|---|-------------|--|-------------|--|-------------|
| | | | Отражатель, $T = 300 - 350^\circ\text{C}$, $F = 0,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2} *$ | | Внутренняя поверхность блока а.з., $T = 450 - 550^\circ\text{C}$, $F = 1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ | | Наружная поверхность блока а.з., $T = 550 - 650^\circ\text{C}$, $F = 1,5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ | |
| | | ⊥ | | ⊥ | | ⊥ | | ⊥ |
| Направление вырезки | | ⊥ | | ⊥ | | ⊥ | | ⊥ |
| Удельное электро-сопротивление, $\cdot 10^{-6} \Omega/\text{м}$ | 10 | 13 | 22±2 | 29±3 | 30±3 | 35±4 | 29±3 | 31±3 |
| Кoeff. теплового расширения, $\cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ | 4,4 | 5,7 | 4,5±0,1 | 5,8±0,1 | 4,5±0,1 | 5,9±0,1 | 4,6±0,1 | 6,0±0,1 |
| Модуль упругости, ГПа | 6,5 | 5,0 | 10,1 ±0,8 | 7,0 ±0,6 | 12,0 ±1,0 | 8,8 ±0,7 | 9,8 ±0,8 | 6,5 ±0,1 |

* - максимальная доза.

Для исследования фактического состояния материала из фрагментов блоков были выбурены образцы в направлениях, параллельном и перпендикулярном оси блоков и проведены исследования некоторых их физико-механических свойств. В таблице 2 сопоставлены их величины в процентах от исходных значений, средних по большому количеству партий графита РБМК.

Из результатов видно, что произошел частичный или полный возврат свойств материала к исходному состоянию.

Результаты ранее проведенных исследований термического отжига вызванных облучением изменений свойств графита указывают, что наиболее «трудноотжигаемым» является изменение электросопротивления [8]. На рис.4 представлены кривые восстановления электросопротивления образцов графита РБМК при изохрональном отжиге. Можно видеть, что независимо от температуры облучения восстановление начинается при температуре $> 1000^{\circ}\text{C}$ и заканчивается при температурах около 2000°C . Этот параметр в наименьшей степени релаксировал и в данном случае, что позволило провести дополнительные изохрональные отжиги образцов с промежуточным замером их электросопротивления. Результаты представлены на графике рис. 5. В сочетании с данными таблицы 2 их можно расценить, как указание на то, что отклонение свойств материала от средних исходных значений есть следствие не полностью отожденного эффекта предыдущего облучения. Активный возврат электросопротивления к исходному значению у образцов фрагмента № 2 объясняется тем, что данный фрагмент имел наименьшую величину и плоскую форму и остывал наиболее быстро.

Таблица 2. Сравнение ожидаемых и фактических изменений свойств графита фрагментов блоков аварийного реактора.

| Физ. параметр | Уд. электросопротивление | | | | Модуль упругости | | | |
|-------------------|--------------------------|--------------|-------------|-----|------------------|----|-------------|----|
| | Ожидаемое | | Фактическое | | Ожидаемое | | Фактическое | |
| Отн. изменение, % | | ⊥ | | ⊥ | | ⊥ | | ⊥ |
| Вырезка | | ⊥ | | ⊥ | | ⊥ | | ⊥ |
| Фрагмент 1 * | 120 – 200 | 120 – 170 | 40 | 75 | 85 | 75 | 20 | 4 |
| Фрагмент 2 * | - | - | 150 | 170 | - | - | 50 | 30 |
| Фрагмент 3 | 120 | 120 | 0 | 31 | 55 | 40 | 30 | 0 |
| Фрагмент 4 | - | - | 56 | - | - | - | 82 | - |
| Фрагмент 5 | - | - | 0 | 6 | - | - | 24 | 12 |
| Фрагмент 6 * | 120 – 200 | 120 – 170 | - | 25 | 85 | 75 | - | 8 |
| Фрагмент 7 * | - | - | 15 | 26 | - | - | 11 | 8 |

* - блок активной зоны

Как следует из рис. 3, фрагменты 1, 2, 6 и 7 принадлежат одному блоку. В отличие от фрагмента 2 фрагменты 6 и 7 почти полностью восстановили свои свойства. Это показывает, что более массивные фрагменты 6 и 7, остывая, достаточно долго оставались при температуре $\gg 1000^\circ\text{C}$, что и привело к почти полному восстановлению электросопротивления. Отсюда следует, что начальная температура этих фрагментов могла быть около 2000°C . Эта оценка подтверждает предположение, что этот блок был выброшен из активной зоны.

Принимая в качестве гипотезы высокую температуру графита после выброса, с учетом полученных результатов ее можно оценить для большинства фрагментов, как существенно превышающую 1000°C .

Вероятная высокая температура графитовых блоков в момент выброса могла привести к массопереносу в материал радиоактивных осколочных изотопов из осевших на поверхности частиц топлива и аэрозолей в воздухе. Ввиду этого были предприняты исследования распределения осколков деления по сечению имеющихся фрагментов блоков.

Исходный диффузионный образец представлял собой цилиндр диаметром 10 мм, высверленный из куска графита полой фрезой. Ось сверления выбиралась таким образом, чтобы торцы образца соответствовали геометрическим поверхностям исходного неразрушенного блока и чтобы в математическом описании процесса можно было пользоваться моделями неограниченной пластины, цилиндра и полого цилиндра. После высверливания исходный образец распиливался перпендикулярно оси на 20 – 35 таблеток толщиной 1 – 2 мм, которые направлялись на гамма-спектрометрирование. Некоторые полученные результаты распределения удельной активности изотопов вдоль оси исходных диффузионных образцов представлены на графиках рис. 6 – 10.

Анализ полученных распределений показывает, что они не создают единообразной картины. Основной воспроизводящей особенностью результатов является качественное различие профилей концентрации изотопов цезия и остальных детектируемых осколочных изотопов.

Можно отметить также группу продуктов активации собственных примесей в графите: Sc-46; Co-60; Fe-59; Cr-51; Hf-181.

Рассматривая группу осколочных изотопов, не содержащую цезий, можно выделить следующие закономерности.

Центральная часть распределений, наиболее удаленная от поверхности блока, представляет собой более или менее выраженное плато, существование которого можно объяснить делением примесного в графите урана, для чего достаточен уровень его концентрации в $10^{-7}\%$ (ат.). Вместе с тем можно выделить области распределений протяженностью 10 – 20 мм от поверхности вглубь графита, в которых реализуется градиент концентрации примесей (см. рис. 6, 7).

Совершенно особый характер имеют распределения удельной активности изотопов Cs-137 и Cs-134. Здесь можно выделить две группы результатов:

1. укладываемые в решение уравнения Фика при соответствующих граничных условиях (см. график на рис. 8, правая ветвь на рис. 9);

2. представляющие собой диффузионно-размытую прямоугольную волну проникновения примеси от поверхности вглубь графита (см. график на рис. 10 и левая ветвь на рис. 9).

В рамках гипотезы о высокой начальной температуре графитовых блоков рассмотрим вероятный процесс массопереноса, сопровождающий остывание. Источником диффузанта явились в основном два типа аэрозолей, топлива и цезия, насыщавших воздух вблизи аварийного блока. При этом следует ожидать, что топливные аэрозоли представляли собой взвесь микрочастиц, обедненных летучими осколками деления. Цезий, вероятно, находился в элементарной форме или в виде гидрата окиси или окиси.

При остывании графита газ, содержащийся в порах, улетучивался, замещаясь воздухом, что вызвало транспирацию зольей обоих типов внутрь тела. При этом топливные золи эффективно фильтровались в приповерхностных слоях графита. Окисные соединения цезия при соприкосновении с нагретым выше 500°C графитом разлагаются. Согласно теоретическим расчетам, атом цезия ведет себя около поверхности базисной плоскости монокристалла графита, как свободная частица, но может сорбироваться при наличии в ней поливакансий. Возможны также акты сорбции или образования слабых химических связей на поверхностях обрыва монокристалла. Известно также, что скорость десорбции цезия в графите имеет широкий пик с максимумом при $T=900^{\circ}\text{C}$; в присутствии кислорода появляется дополнительный пик десорбции при 320°C .

В промежутках между актами сорбции цезий должен переноситься транспирационным потоком газа в поре. Не исключено, что «транспирационный» профиль концентрации цезия будет «замораживаться» в областях графита, имеющих в это время температуру, совпадающую с окрестностью максимумов сорбции. Это будет приводить к появлению волнообразного распределения концентрации.

Одновременно в графите должна проходить диффузия по телу и границам кристаллитов, инициированная транспирационным потоком в тупиковые поры. Таким образом, реальный профиль распределения концентрации при относительно небольших температуре и времени процесса, когда перетечка между каналами миграции еще не сгладила картину, будет приближаться к сумме соответствующих распределений.

Остывающие блоки в некоторых случаях одной из поверхностей лежали на расплавленном битуме, что исключало транспирацию. Распределения концентрации около этой поверхности целиком порождалось твердотельной диффузией (см. графики рис. 8, 9, правые ветви распределений).

Для расчетной оценки температуры графита во время взрыва необходимо знание параметров диффузии цезия в графите РБМК. Ввиду этого были проведены соответствующие лабораторные исследования. На рисунке 11 представлен эскиз образца-контейнера, использованного в экспериментах. Внутренняя поверхность съёмного дна образца покрывалась газонепроницаемым слоем карбида молибдена. При подготовке диффузионного отжига навеска топлива (собранного на промплощадке ЧАЭС), растолченного в ступке,

насыпалась тонким слоем на молибденизированное дно контейнера и фиксировалась тонким слоем клея. В собранном состоянии контейнер помещался в муфель электропечи, после вакууммирования объем муфеля заполнялся аргоном. Диффузионный отжиг состоял в быстром (10 – 20 минут) подъеме температуры контейнера до запланированного уровня, отключении нагрева и расхолаживания диффузионной сборки. При этом постоянно мониторировалась и записывалась температура контейнера. По такой методике были проведены отжиги сборок в вакууме при максимальных температурах от 1240 °С до 2050 °С и в аргоне при $T=900 - 1400$ °С.

По окончании отжига дно контейнера удалялось, и осевым сверлением полый фрезой из центральной части образца изготавливался исходный диффузионный образец. Дальнейшая методика исследования распределения диффузанта описана выше.

Целью экспериментов являлась не тщательная разработка механизма массопереноса цезия в графите, а получение эффективных коэффициентов диффузии в условиях, возможно более близко моделирующих основной рассматриваемый процесс. В частности, по этой причине в качестве источника диффузанта использовалось термошоковое топливо аварийного реактора.

Математическая обработка проводилась в рамках модели диффузии из постоянного источника в полуограниченное пространство. При этом предполагалось, что частотный множитель и энергия активации постоянны во всем экспериментально перекрытом диапазоне температуры, температура постоянна по объему образца и изменяется во времени в согласии с экспериментально наблюдавшимися зависимостями. Экспериментальный материал оптимизировался с точки зрения получения наилучших значений частотного множителя и энергии активации. Получены значения:

$$D_0 = 0,3 \text{ м}^2/\text{сек}, E = 19140 \text{ кал/моль.}$$

При проведении заключительных расчетных оценок рассматривались следующие вероятные механизмы образования распределений осколочных изотопов в графите:

- 1) термически активированная диффузия;
- 2) транспирация;
- 3) проникновение в поры с взрывной волной.

В расчете были приняты следующие приближения и допущения:

- в момент выброса фрагменты блоков были разогреты до некоторой постоянной по сечению температуры;
- остывание графита проходило за счет теплового излучения и естественной конвекции;
- фрагменты блоков, приближающиеся по своей геометрии к пластине, остывали, лежа одной из поверхностей на слое битума толщиной 25 мм, под

которым находился слой бетона толщиной 100 мм. В варианте расчета такие фрагменты остывали, излучая тепло обеими поверхностями;

- в расчете учитывалась температурная зависимость теплофизических параметров материала, взятая для случая необлученного графита. Это приближение ведет к некоторому завышению расчетной начальной температуры, однако, это завышение невелико, так как теплопроводность облученного графита при повышении температуры приближается к таковой для необлученного. С другой стороны, не принятие в расчет потерь тепла через контактную теплопроводность должно привести к заметному снижению начальной расчетной температуры. Вследствие этого приведенные ниже расчетные начальные температуры следует считать консервативными;
- в расчете принималась модель диффузии и транспирации из постоянных источников.

В рамках примененных вычислительных методов большинство принятых упрощений могли быть легко обойдены, но это привело бы к лавинному разрастанию дерева вариантов оптимизационного расчета. Уравнение теплопроводности записывается для рассматриваемых случаев в безразмерном виде:

$$C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\nu} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \lambda r^{\nu} \frac{\partial T}{\partial r} \right\}, \quad (1)$$

где $\nu=0$ или 1 для плоскости или аксиально-симметричного цилиндра соответственно;

C'_p - теплоемкость графита, $C = C'_p / C_0$ (здесь и далее физические параметры с нулевым индексом соответствуют начальной температуре графита);

r' - текущая координата, $r = r' / R_0$;

R_0 - толщина пластины или радиус цилиндра;

λ' - теплопроводность графита, $\lambda = \lambda' / \lambda_0$;

T' - температура, $T = T' / T_0$;

τ - время, $\tau = t / t_0$, $t_0 = C_{p0} R_0^2 \rho / \lambda_0$;

ρ - плотность графита.

Начальное условие: $T(r, 0) = T_0$.

Граничные условия для пластины:

$$\pm \lambda \frac{1}{r^{\nu}} \frac{\partial T}{\partial r} = Sk \cdot \varepsilon \{T^4 - T_g^4\} + \frac{\lambda_b}{2} Nu \{T - T_g\}, \quad (2)$$

где ε - степень черноты графита;

Sk - критерий Старка, $Sk = T_0^3 \sigma R_0 / \lambda_0$;

σ - постоянная Стефана - Больцмана;

λ'_b - теплопроводность воздуха при температуре T_g , $\lambda_b = \lambda'_b / \lambda_0$;

T'_g - температура воздуха вдали от блока, $T_g = T'/T_0$;

Nu - критерий Нуссельта, $Nu = 0,47 \cdot \{Gr\}_g^{0,25}$;

Gr - критерий Грэггофа при температуре T_g .

Для цилиндра в качестве определяющего размера в критерии Нуссельта берется $2 \cdot R_0$, для плоскости – максимальный линейный размер реального тела.

В случае цилиндра в граничных условиях возникает условие симметрии:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$

Задача решалась численно с использованием трехточечной неявной схемы с порядком аппроксимации $O(\tau + h^2)$, где τ - шаг по времени, h - шаг по координате. При расчете использовались значения $\tau = 0,001 - 0,01$; $h = 0,02$. В силу нелинейности граничных условий на каждом шаге по τ делались итерации для достижения точности 10^{-4} ; было достаточно 3 – 4 итераций.

Расчет диффузионного распределения в заданном поле температур основывался на краевой задаче:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\nu} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ Dr^{\nu} \frac{\partial C}{\partial r} \right\} \quad (3)$$

В случае цилиндра $\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$.

Здесь C' - концентрация примеси в графите, $C = C'/C_0$;

D - коэффициент диффузии.

Задача решалась численно совместно с задачей о поле температур. В силу эквивалентности уравнений (1) и (2) использовалась та же неявная схема, что и при решении задачи о поле температур. Расчет проводился в следующем порядке:

- определение диффузионного профиля;
- определение поля температур и переход к следующему временному слою.

Оптимизационный поиск начальной температуры данного фрагмента блока велся по схеме:

- перебор ряда значений начальной температуры T_0 с расчетом финального (соответствующего полному остыванию) распределения диффузанта и соответствующего ему критерия χ -квадрат;
- поиск наилучшего значения T_0 из ряда перебранных;
- оптимизация значения T_0 методом градиентного спуска.

Одновременно оптимизировались значения концентрации источника диффузанта и его фоновой концентрации в материале. В некоторых случаях в качестве фона рассматривался транспирационный пьедестал концентрации, что, как указывалось выше, оправдано ввиду малой перетечки между каналами диффузии.

В случаях, не относящихся к фрагментам заглушек отражателя, оптимизация проводилась для различных вариантов теплоотвода при охлаждении (различных положений блока на подстилающей основе). В качестве оптимального выбирался вариант, которому соответствовал наилучший критерий χ -квадрат. Результаты приведены в таблице 3.

В таблице приведены также данные оценки температуры по электросопротивлению.

Таблица 3. Расчетная максимальная температура блоков в момент взрыва.

| Номер фрагмента | Расчетная начальная температура, °С | |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------------|
| | По диффузии | По электросопротивлению |
| 2 | 1240 | > 1300 |
| 5 | 990 | > 1500 |
| 6 | 780 | > 1500 |
| 7 | 920 | > 1500 |
| 8 | 1100 | — |
| 9 | 1220 | — |
| 10 | 880 | — |
| 11 | 870 | — |
| 13 | 1500 | — |
| 14 | 800 – 1100 | — |
| 15 | 900 – 1140 | — |
| 12 | 2200 | — |

Сравнение данных диффузионного метода с результатами по измерению электросопротивления и дополнительного отжига образцов показывает, что результаты, полученные на основе концентрационных профилей, очевидно, занижены, что связано с обстоятельствами, о которых говорилось выше. Тем не менее, результаты, полученные методом обработки концентрационных профилей, несмотря на ряд допущений, дают величину, близкую к полученной на основе измерения электросопротивления, т.е. вполне определенно подтверждают высокую температуру графитовых блоков в момент выброса.

Как видно из рисунков 9, 10, не все графитовые блоки имели распределения концентрации цезия, допускающие описание с точки зрения механизма твердотельной диффузии. В части случаев профили носили ступенчатый характер. Как упоминалось выше, это может быть объяснено транспирацией – вытягиванием аэрозолей в поры графита потоком воздуха при охлаждении блока.

Из простейших соображений ясно, что глубина транспирационного профиля концентрации в случае цилиндра связана квадратичной зависимостью с максимальной температурой, от которой остывает графит (и газ в порах). Но

тогда оценки показывают, что в наиболее ярко выраженном случае (рис. 10) графит должен был быть нагрет до такой высокой температуры, при которой распределение не могло не выровняться за счет других механизмов массопереноса. По-видимому, в процессе транспирационного формирования профиля концентрации существенную, если не решающую, роль играют процессы нелинейной (по температуре) сорбции цезия в графите. Можно привести некоторые расчетные оценки. Процесс транспирации описывается уравнениями неразрывности и сорбции:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -\frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \{r^v u \rho\} \\ \frac{\partial c}{\partial t} &= -\frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \{r^v u c\} \\ \frac{\partial a}{\partial t} &= \beta \{c - \gamma a\} \\ P &= \rho T \end{aligned} \quad (4)$$

где ρ' - плотность воздуха, $\rho = \rho' / \rho_0$;

u' - линейная скорость воздуха в данной точке, определяемая из разностного аналога уравнения неразрывности, $u = u' / u_0$, $u_0 = \chi R_0 / t_0$;

χ - пористость;

a' - концентрация сорбированной примеси в единице объема графита, $a = a' / \rho_0$;

c' - концентрация примеси в газе в единице объема графита, $c = c' / \rho_0$;

β' - константа массообмена, $\beta = \beta' / t_0$;

γ - обратный коэффициент Генри;

P - давление газа в данной точке, $P = P' / P_0$, $P_0 = \rho_0 R_T T_0$;

R_T - газовая постоянная воздуха.

Поле температур задается здесь из решения тепловой задачи (2). Некоторые результаты численного решения задачи (4) для различных начальных температур графита и констант сорбции представлены на графиках рис. 12, 13. Видно, что решение чрезвычайно чувствительно к значениям параметров сорбции, и оценка температуры блоков по транспирационным распределениям концентрации должна базироваться на результатах исследований кинетики этого процесса. Поэтому, хотя расчеты дают качественную картину распределения диффузанта в транспирационной волне, использование этого метода для оценки начальной температуры без дополнительных экспериментов слишком спекулятивно. Тем не менее, наличие транспирационной волны (фрагмент № 8 и фрагмент № 7) говорит об очень высокой (> 2000 °C) температуре этих фрагментов, по крайней мере, со стороны транспирационной волны.

Альтернативным вариантом механизма возникновения обнаруженных распределений концентрации осколочных изотопов в графите является проникновение их в поры с взрывной волной при разрушении ТК.

Оценки возможности образования концентрационного профиля за счет вбивания аэрозолей ударной волной также были сделаны (они описаны в работе [9]), и также была получена качественно подобная картина распределения. Однако в силу произвола в выборе параметров ударной волны эти оценки вряд ли могут быть использованы. Кроме того, такое вбивание могло произойти только при взрыве каналов, и распределение могло быть только с внутренней стороны блока. Вбивание взрывом в такие элементы конструкции как стержни отражателя попросту исключаются. Либо следует предположить, что активная зона и топливо были полностью разрушены, после чего произошел взрыв.

Таким образом, высокая температура графитовых блоков отражателя в момент аварии является совершенно очевидным фактом.

Однако использование этого экспериментального факта напрямую, как это было сделано в отчете 1986 г. путем простого пересчета на основе соотношения между энерговыделением в отражателе и графите активной зоны, сейчас было бы неправильно, так как до момента взрыва была сложная, хотя и быстротекущая, история развития аварии, в которой до сих пор имеются неопределенности. Поэтому вначале мы остановимся на анализе результатов изучения фрагментов технологического канала, о котором было сказано в начале этого раздела.

2. Исследование фрагмента технологического канала (ТК).

Фрагмент, найденный на крыше баллонной САОР, представлял собой нижнюю часть канала длиной около 1 метра, включавший в себя нижний переходник (рис. 14). В канал была «вбит», видимо, с большой силой, фрагмент ТВС, застрявший в суженной части переходника. Нижний и верхний торцы фрагмента показаны на рис. 15 и 16. Внутренний ряд ТВС отсутствовал, вместо него полость была заполнена мелкой крошкой диоксида урана и циркониевой оболочки. Межтвэльное пространство было забито топливной пылью, частицы которой были полностью аморфизированы (полное отсутствие каких либо рефлексов на рентгенограмме) и имели размеры 10-20 мкм. После извлечения пучка твэлов из канала оказалось, что оболочки твэлов сплавлены между собой (рис. 17), что говорит о том, что температура оболочек в момент удара о переходник была около 1800 °С. Исследование структуры материала фрагмента канала показало, что его температура была около 1000 °С. Однако, скорее всего, канал был разогрет от тепловыделяющей сборки.

Из визуальных наблюдений наиболее интересным является характер разрывов циркониевой трубы и переходника. Оба разрыва характерны для динамического осевого нагружения. Совершенно очевидно, что вначале был оторван переходник от нижних водяных коммуникаций (НВК). В противном случае фрагмент канала остался бы навечно в шахте прикрепленным к НВК. Поскольку прочность циркониевой трубы лишь немного (с учетом действия облучения) превышает прочность переходника в самом тонком месте (такие оценки были сделаны), то это означает, что каналы в юго-западном квадранте не были перегреты, не потеряли своих свойств и, стало быть, продолжали эффективно охлаждаться до момента, пока не произошел их отрыв от НВК в

результате падения нижней плиты. По-видимому, большая часть каналов северной половины реактора также не была разрушена. Отчасти это подтверждается распределением топливосодержащих масс в нижних помещениях [4]. Однако каналы северной половины реактора, по-видимому, уже были перегреты, хотя и не достигли той температуры, при которой происходит разрушение. По опыту исследования аварийного канала реактора 1^{го} блока ЧАЭС, проведенного в ИАЭ им. И.В. Курчатова, это температура ≥ 800 °С, когда резко падает прочность сплава Zr + 2,5% Nb, и проявляется эффект сверхпластичности (последнее было показано в работах ИЦП МАЭ и НИКИЭТ [20]). Такое различие в состоянии каналов южной и северной половин реактора подтверждается характером деформации «калачей». Калачи южной половины сильно вытянуты вверх, что свидетельствует о значительных усилиях отрыва; калачи северной половины практически не деформированы (не потеряли своей формы) [4]. Возможно, значительное количество каналов южной половины также была перегрета, но не разрушена. Следовательно, практически все топливо вместе с активной зоной было выброшено из шахты, кроме того топлива, которое было выброшено вниз из разрушенного юго-восточного квадранта и образовало ЛТСМ. Очевидно, именно одновременный отрыв большого количества каналов и создал ситуацию, при которой стал возможен паровой взрыв, приведший к выбросу активной зоны из шахты. Этим же взрывом, очевидно, были разрушены кровля и конструкции центрального зала и соседних помещений. При этом могли играть роль не только ударная волна, но и резкое повышение давления в изолированном помещении центрального зала. Очевидно, перегрев большей части каналов способствовал тому, что выброшена была не одна верхняя плита с каналами, как предполагается в некоторых работах, а вся активная зона вместе с графитом. При перегреве каналов до температуры 600-700°С за считанные секунды произошла деформация каналов, прочно заклинившая каналы в графитовых блоках. При этом прочность каналов достаточна, чтобы удержать на себе вес графитовой колонны. Что касается самих графитовых блоков, выдерживающих при комнатной температуре ~70 атмосфер, при температуре 1000-1300°С, которая могла быть в нижней части активной зоны (см. ниже), графитовые блоки могли выдержать давление около 100 атмосфер. По этой же причине заклинившийся графит был выброшен при взрыве вместе с частями каналов и топливом.

Дальнейшее рассмотрение можно провести в рамках сценария с выбросом активной зоны из шахты, описанного в работах [4, 5]. Согласно этому сценарию, будучи выброшенной на высоту 30 м, она вращалась вокруг центра масс в вертикальной плоскости и, когда нижняя часть активной зоны была обращена в сторону 3^{го} блока, произошел взрыв, в результате которого часть топлива, циркониевых каналов и графита были выброшены на крышу 3^{го} блока и за его пределы. Экспериментальные факты полностью подтверждают эту версию; большая часть фрагментов графитовых блоков, собранных нашими сотрудниками на крыше 3^{го} блока, принадлежала коротким блокам, которые могли быть только блоками нижнего отражателя, на крыше были найдены нижние части тепловыделяющих сборок, нижняя часть канала, исследованная нами, была найдена на крыше баллонной САОР. Несомненно, что среди фрагментов активной

зоны, сброшенных солдатами с крыши в центральный зал, были и другие фрагменты нижних частей активной зоны. Взрыв этот, однако, судя по характеру отрыва ТК, не привел к полному разрушению активной зоны, а только ее нижней части (назовем это «малым взрывом»). Совершенно очевидно, что отрыв нижней части канала произошел в области максимума энерговыделения, где и произошел взрыв, вызванный разрушением и диспергированием топлива. От этого места взрывная волна, распространяясь вдоль канала к открытым его концам, выбросила нижнюю часть сборки, от удара которой нижняя часть канала была оторвана от остального канала. Отрыв должен был произойти в области минимальной прочности, т.е. в области максимального энерговыделения. Характер разрушения и тот факт, что отрыв канала потребовал удара большой силы, говорит о том, что весь канал не потерял полностью своей прочности, температура его была, по-видимому, ниже, по крайней мере, 600°C . Совершенно очевидно, что это разрушение не связано с сильным перегревом канала и разрывом от внутреннего давления, так как в этом случае разрыв был бы вдоль оси канала и сопровождался бы большой деформацией, как это было в случаях аварий на $1^{\text{ом}}$ и $3^{\text{см}}$ блоках ЛАЭС и на $1^{\text{ом}}$ блоке ЧАЭС. Тот факт, что очень мелкая топливная пыль (что свидетельствует о весьма высоком энерговыделении) не испарилась, говорит о том, что в момент взрыва канал не освободился еще полностью от остатков воды или пара. Судя по размерам фрагмента канала максимум энерговыделения был на расстоянии не более $1,2 - 1,5$ м от края активной зоны. Так как взрывная волна распространялась в обе стороны от места взрыва, то выброшена была только нижняя часть топлива; остальная часть от места взрыва, очевидно, была перемещена в среднюю часть ТВС. Одновременно с топливом были выброшены и остальные конструкции нижней части активной зоны. В соответствии с положением максимума энерговыделения выброшено было около 20% активной зоны (топливо, части каналов, графитовые блоки). Если принять, что половина выброшенного попала на крышу, а половина в центральный зал и соседние с ним помещения, то на крыше должно оказаться около 10% всех компонентов активной зоны, что не расходится с данными о собранных и сброшенных в центральный зал фрагментах зоны [3]. Следовательно, в центральном зале и соседних помещениях должно находиться (после этого взрыва) около 40 т топлива.

Таким образом, после малого взрыва конструкция активной зоны (каналы, графит), по-видимому, оставалась целой. Расстояние по времени между малым и «большим» взрывом, приведшим к полному разрушению и, возможно, испарению или диспергированию элементов активной зоны могло быть не более $0,1 - 0,2$ сек; после малого взрыва произошло полное обезоживание активной зоны, в значительной мере освобождение от газообразных и отчасти летучих осколков деления.

Характер разрушения твэлов и наличие топливной пыли позволили оценить теплосодержание в твэлах в момент взрыва. Размеры топливной крошки около 1 мм во внутренней полости ТВС свидетельствуют о теплосодержании (энерговлложении) на уровне $380-400$ кал/г [10]. Что касается мелкодисперсных частиц, то автор не нашел в литературе сведений об

экспериментах, при которых образовывались частицы подобного размера. Можно попытаться сделать оценки на основе данных о зависимости размера частиц от энергозатрат для диапазона меньших теплосодержаний (более крупных частиц). В работе [10] приведены данные о зависимости размера частиц от теплосодержания в диапазоне энергии 385-555 кал/г и размеров частиц соответственно от 1500 до 160 мкм. В этой же работе было показано, что доля энергии затрачиваемой на диспергирование (mechanical conversion), обратно пропорциональна среднему размеру дисперсий. Это дает определенные основания для построения зависимости общего теплосодержания от обратного размера частиц. Такая зависимость, построенная по данным работы [10], представлена на рис. 18 и аппроксимирована уравнением:

$$Q = 386,66 + 239916 \frac{1}{d_{cp}} \text{ кал/г} \quad (5)$$

Как видно из рисунка, уравнение вполне удовлетворительно описывает экспериментальные данные.

Чтобы иметь основания для достаточно далекой экстраполяции (примерно на порядок величины), уравнение подобного типа было получено из общих соображений и на основе экспериментальных данных.

В шестидесятых годах прошлого столетия сотрудник Курчатовского института В.М. Голянов провел ряд интересных экспериментов по изучению треков осколков деления в тонких пленках различных материалов, на основе которых были оценены диаметры треков и потери энергии на единицу длины трека [11].

В другой работе [12] изучали треки в платине и палладии при внешнем облучении осколками в зависимости от толщины пленки. Оказалось, что в пленках толщиной более 200 Å следы осколков полностью отсутствуют.

Наиболее интересные для нашего случая эксперименты были проведены В.М. Голяновым с пленками диоксида урана с различными размерами зерна от 20 до 600 Å.

Следы осколков почти полностью исчезали при размере зерна около 600 Å, однако на границе зерна в месте пересечения трека с границей возникали области пониженной плотности размером ~ 30 Å с уплотнением вещества по краям, т.е. в области границы зерна при пересечении ее осколком диоксид как бы вскипает. К сожалению, при жизни В.М. Голянов не опубликовал эти результаты, и автору не удалось разыскать эти результаты в архивах В.М. Голянова, тем не менее, эти эксперименты были проведены и автор помнит их в деталях.

Эти эксперименты можно интерпретировать следующим образом: большая часть энергии осколка деления расходуется на ионизацию, пока его энергия не достигнет собственного потенциала ионизации. Потери энергии (1000-2000 эВ/Å) полностью диссипируют в объеме вдоль трека диаметром 150-200 Å [13], при этом электронное возбуждение практически не взаимодействует с решеткой [14]. Однако это характерно для регулярной решетки. В частично аморфизированной структуре, какой является граница зерна, по-видимому, происходит сильная

локализация электронного возбуждения, приводящая к интенсивному взаимодействию с решеткой и сильному локальному разогреву вещества. Теории этого явления нет, однако, по мнению автора именно локализованный разогрев в границах зерна при определенной плотности деления приводит к частичному расплавлению и испарению диоксида вблизи границы вызывающего внутренний «взрыв» диоксида и разлет мелких фрагментов с большой энергией. Такой подход позволяет составить баланс энергии, состоящий из двух компонентов; общее теплосодержание:

$$Q = \frac{(d-2\Delta)^3}{d^3} \cdot \frac{q_1}{\rho} + \frac{6d^2\Delta}{d^3} \cdot \frac{q_2}{\rho} \quad (6)$$

где d – размер фрагмента, Δ – ширина неупорядоченной структуры вблизи границы зерна, q_1 – объемное энерговложение в теле фрагмента, q_2 – объемное энерговложение в области локализации, ρ – плотность, $\frac{1}{d^3}$ – число фрагментов в единице объема. Для удобства принято, что фрагменты имеют кубическую форму.

При $\Delta \ll d$

$$Q = \frac{q_1}{\rho} + \frac{6\Delta}{d} \cdot \frac{q_2}{\rho} \quad (7)$$

$q_1 = \frac{A}{\pi r_1^2}$, где A – потери энергии на единицу длины трека, r_1 – радиус области вокруг трека, в которой происходит рассеяние энергии в теле фрагмента.

$q_2 = \frac{A}{\pi r_2^2}$, где r_2 – радиус области локализации энергии вблизи границы.

Используя следующие исходные данные: $A = 2000$ эВ/Å, $r_1 = 70$ Å, $r_2 = 15$ Å, $\Delta = 300$ Å, $\rho = 10$ г/см³ получим уравнение:

$$Q = 391 + 19400 \frac{1}{d_{\text{ф}} (\text{мкм})} \text{ кал/г} \quad (8)$$

что очень мало отличается от уравнения (5). Используя очень небольшие вариации исходных параметров можно было бы получить коэффициенты уравнения, в точности совпадающие с уравнением (5). Конечно, в уравнении (6) заложены достаточно упрощенные представления о механизме диспергирования топлива, чтобы считать его адекватной физической моделью процесса, и автор привел его только для обоснования возможности экстраполяции уравнения (5) на размеры дисперсии, выходящие за рамки имеющихся экспериментальных данных. Вместе с тем необходимо отметить, что свободный член в этом уравнении достаточно хорошо совпадает с величиной 380 кал/г, которая в работе [10] принята как пороговое значение энергии, превышение которой приводит к расплавлению и диспергированию топлива на мелкие фрагменты. Если принять средний размер дисперсий равным 15 мкм, то это приводит к величине ~ 2060 кал/г, что хорошо коррелируется с величиной 8 МДж/кг (~ 2000 кал/г), приведенной в работе [3] со ссылкой на работу [10] и в работе [4] со ссылкой на

работы [10, 15]. Другая аппроксимация, также удовлетворительно описывающая экспериментальные результаты рис. (19), но не имеющая под собой физического обоснования

$$Q = -60,261 * \ln(d_m) + 829,99 \quad (9)$$

дает величину энергии ≈ 823 кал/г. Если первую величину можно считать верхней оценкой, то последнюю – весьма консервативной нижней оценкой.

На самом деле ни та, ни другая величины не могли привести к катастрофическому взрыву активной зоны с испарением всего топлива и диспергированием графита.

Действительно, повышение теплосодержания топлива на 2000 кал/г при соотношении энерговыделения в топливе и графите 1/20 при адиабатическом процессе могло привести к дополнительному нагреву графита активной зоны всего на ~ 200 °С, а отражателя и того меньше. Таким образом, графитовые блоки, найденные на крыше и относящиеся к нижней части активной зоны были нагреты до высокой температуры еще в шахте на предварительной стадии разгона реактора длившейся несколько секунд. Хотя некоторые фрагменты (например, №8 и №12) могли оказаться «свидетелями» «большого взрыва», также оказавшимися на крыше.

Таким образом, в результате малого взрыва, приведшего к выбросу топлива и графита на крышу (и, по-видимому, в центральный зал и соседние помещения) активная зона, кроме нижней ее части, не была разрушена и вся структура оставшейся части (каналы, графит и топливо остались целыми и были обречены на «большой» взрыв, который должен был немедленно последовать за малым). Поскольку структура активной зоны была целой и взрывные волны распространялись вдоль каналов, малый взрыв был узконаправленным, что отразилось в распределении выброшенных фрагментов (см. рис. 1). В момент малого взрыва зона была полностью обезвожена, в результате предварительной стадии разогрева топливо освободилось от газообразных осколков и, частично, от летучих. Кроме того, при дальнейшем вращении активной зоны регулирующие стержни (если они успели войти в зону после сигнала «превышение мощности») должны были оттуда вывалиться при определенном угле наклона, так как каналы СУЗ должны были сохранить к этому моменту целостность. Можно предположить, что большой взрыв произошел, когда активная зона была в вертикальном положении верхней плитой вниз. Именно поэтому шахта могла оказаться экранированной от взрыва и в нее не попало ничего. В любом другом положении часть графита отражателя и, возможно, топлива периферийных каналов оказалась бы в шахте. За такой вариант говорит и тот факт, что верхняя плита оказалась над шахтой. В любом другом положении ее отбросило бы к одной из стен. За такой вариант говорит и более или менее равномерное распределение фрагментов вокруг здания (рис. 1). К сожалению, среди фрагментов нет таких, которые можно было бы определенно отнести к свидетелям «большого» взрыва, если не считать диспергированного графита и выпадений урана в элементарной форме [16], на основе которых можно было бы сделать более или менее реалистичные оценки параметров взрыва. Факт диспергирования графита можно

считать вполне достоверным (конструкции здания покрыты дисперсным углеродом, дисперсный углерод выпадал так же и на местности). На основе этого факта можно попытаться хотя бы качественно оценить параметры взрыва и оценить возможность испарения (диспергирования) топлива и уноса его в атмосферу. Механизм диспергирования графита должен принципиально отличаться от механизма диспергирования диоксида (плавление и частичное испарение по границам дисперсий). К тому же графит не облучается осколками деления, которые могли бы вызвать локальные вспышки температуры. Графит не плавится при нормальном давлении и упругость его паров низка даже при температуре сублимации (3700°C). Графит является уникальным материалом, прочность которого растет с повышением температуры от комнатной до 2400°C примерно вдвое и затем резко падает. При температуре 3200°C графит полностью деградирует (рис. 20, рисунок взят из книги [17], данные по графиту ГМЗ из работы [18]). При температуре 3200°C графит становится неустойчивым и может рассыпаться при любом внешнем воздействии. Эту температуру можно назвать температурой диспергирования при медленном процессе. Можно попытаться оценить возможность диспергирования графита при более низкой температуре в результате очень быстрого разогрева. Одним из возможных механизмов диспергирования может быть внутреннее разрушение за счет резкого повышения давления газа в порах (пористость реакторного графита $\sim 27\%$) при очень быстром разогреве, когда газ не успевает выходить из пор.

Для оценки этой температуры по просьбе автора А.И. Ульяновым (РНИЦ КИ) был проведен расчет НДС графита ГР-280, имеющего пористость 27% ; средний размер пор был принят равным 5 мкм , прочностные и упругие характеристики для необлученного графита, что делает расчет консервативным. Если принять, что температура графита активной зоны до быстрого разогрева была $1000 - 1300^{\circ}\text{C}$ (что следует из предыдущего рассмотрения), то диспергирование могло произойти при температуре $\sim 2700^{\circ}\text{C}$ (рис. 20). Т.е. быстрый адиабатический подогрев мог составить $1400 - 1500^{\circ}\text{C}$, что соответствует повышению теплосодержания графита на $\sim 770\text{ кал/г}$. Отсюда следует, что теплосодержание топлива должно было составить 15500 кал/г , что должно было привести к полному испарению и диссоциации диоксида (отсюда – выпадение урана в элементарной форме). Если считать теплоемкость паров урана как для одноатомного газа, то температура паров урана должна была составить около 10^6°C . Реально температура должна была быть существенно ниже в связи и тем, что испарение топлива и диспергирование графита происходит одновременно и тем самым создаются условия для очень быстрого прямого теплообмена, в результате чего температура графита должна повыситься, а температура топлива понизиться. Если считать вклад каждого из компонентов в теплосодержание системы равным произведению массы на теплосодержание, то температура графита должна составить с учетом температуры до взрыва около 5000°C , температура топлива около 160000°C . Если принять температуру графитовых блоков до аварии 600°C (нормальная эксплуатация), то диспергирование могло произойти при температуре $\sim 2400^{\circ}\text{C}$, но тогда «быстрый» подогрев составит 1800°C , т.е. еще выше, чем в предыдущем варианте.

Другим возможным механизмом диспергирования при более низкой, чем 3200°C , температуре может быть внутреннее разрушение за счет взаимодействия анизотропно расширяющихся кристаллов. Монокристаллический графит характеризуется очень высокой степенью анизотропии свойств, в том числе анизотропией теплового расширения. Например, при температуре 400°C коэффициент теплового расширения вдоль оси c составит $\alpha_c = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$, вдоль оси $a - \alpha_a = 0$. В поликристаллическом графите различно ориентированные кристаллы при нагревании и охлаждении взаимодействуют, вызывая междолинчатые напряжения. При охлаждении с температуры графитации ($2300 - 2400^{\circ}\text{C}$) за счет этих напряжений возникают ориентированные параллельно плоскости базиса субмикротрещины (трещины Мрозовского). Эти трещины при нагревании частично аккомодируют тепловое расширение в направлении оси c , предотвращая появление слишком высоких междолинчатых напряжений. Прочность при этом увеличивается за счет закрытия трещин (предлагаются и другие механизмы увеличения прочности [17]). При температуре графитации аккомодационная способность исчерпывается и начинается быстрая деградация свойств. В условиях испытаний, когда в течение времени испытания происходит частичная релаксация напряжений, внутреннее разрушение происходит постепенно вплоть до температуры 3200°C , когда графит полностью деградирует. Можно предположить, что при очень быстром нагреве при практическом отсутствии релаксации внутреннее разрушение произойдет сразу после закрытия трещин Мрозовского, т.е. при температуре $2300 - 2400^{\circ}\text{C}$, что является консервативным предположением, так как согласно таблице 3 блоки, имевшие температуру $\sim 2000^{\circ}\text{C}$, оставались целыми. Если принять температуру диспергирования графита 2300°C , то дополнительный нагрев составит около 1000°C и, следовательно, энерговыделение около 515 кал/г и в пересчете на теплосодержание диоксида $\sim 10000 \text{ кал/г}$. После установления теплового равновесия температура графита должна составить около 4000°C .

Сделанные оценки, очевидно, минимальные; если принять температуру диспергирования графита соответствующей температуре его неустойчивости (3200°C), то теплосодержание системы «графит – уран» будет около 3000 кал/г , а температура графита около 6000°C .

Таким образом, сделанные оценки показывают возможность испарения значительной части топлива, если принять диспергирование графита достоверным фактом. Однако это не значит, что вся зона испарилась и бесследно исчезла. В силу неравномерного распределения энерговыделения часть топлива могла быть диспергирована, часть фрагментирована. Часть из этого топлива могла остаться в здании в центральном зале, соседних помещениях, в завале и т.п. Часть испарившегося топлива и диспергированного графита так же должны были остаться в здании (углеродной пылью покрыты все конструкции [5]). Тем не менее, по-видимому, большая часть испарившегося и диспергированного топлива вместе с графитом была унесена из здания вверх. Этому способствовала струя пара из шахты и разорванных ПВК, выбросившая большую часть раскаленной массы вверх, обеспечив в дальнейшем ей естественную тягу.

Большая часть отражателя, очевидно, была выброшена в центральный зал. Имея температуру существенно выше 1000°C , фрагменты блоков отражателя некоторое время горели, пока не остыли до температуры ниже 1000°C , однако, это не то горение, которое видели потом с вертолетов. Авторы версий, включающих в себя «сгорание графита», ошибочно полагают, что, будучи «зажженным», графит может сгореть дотла. Графит горит при температуре выше 1000°C (облученный при температуре более $\sim 900^{\circ}\text{C}$), при этом горение не разогревает графит; если нет подвода тепла, то графит остывает и горение прекращается. Горит он без копоти и дыма спокойным голубоватым пламенем, образуя двуокись углерода; для установления этих фактов были проведены специальные эксперименты.

Имел ли взрыв большую разрушительную силу? Ответ на этот вопрос могли бы дать специалисты, однако, интуитивно кажется, что большой разрушительной силы взрыв не имел. Взрыв был распределен в более чем 1600 каналах, окруженных инертной массой диспергированного графита. Диспергированный графит мог не только поглотить тепло выделенное при взрыве, но частично демпфировать ударные волны от каждого канала. Кроме того сила взрыва зависит от времени, в течение которого он происходит. Одним словом, это совершенно необычный взрыв и энергию, выделяющуюся при взрыве вряд ли можно измерять в тротиловых эквивалентах.

Сделанные в настоящей работе выводы не вполне совпадают с выводами работ [4, 5]. Однако они совпадают в главном — допущении реальной возможности испарения (диспергирования) и уноса из здания значительной части топлива. Вообще вопрос о количестве оставшегося в здании реактора топлива еще много лет останется открытым до тех пор, когда наступит возможность проведения реабилитации, или, по крайней мере, до тех пор, пока тем или иным способом не будут обследованы те помещения, в которых предположительно находится топливо. Можно утверждать, однако, что это не 95% загрузки, можно утверждать также, что в ЛТСМ содержится не 50 и тем более не 150 т топлива, а значительно меньше. Такое расхождение в оценках говорит о явной неизвестности количества топлива в здании, что дает возможность называть практически любые цифры, проверить или уточнить которые в ближайшие 10-20 лет невозможно. Более того, никто и не будет их уточнять, пока не будет построен новый саркофаг. Именно эта безнадежная неизвестность дает возможности строить любые, якобы реалистичные, сценарии развития аварии [19], которые никак не объясняют наблюдения и обследования, выполненные как в первые месяцы после аварии (выброс нижней части активной зоны на крышу, выпадение дисперсий углерода, выпадение урана в элементарной форме и др.), так и в течение длительного времени после аварии: состояние шахты, конструкций, нижней плиты, отсутствие в шахте конструкций активной зоны и, наоборот, — нахождение в шахте под верхней плитой бетонных плит и конструкций из центрального зала и др. [4, 5]

Именно версия с выбросом активной зоны, кажущаяся фантастической и парадоксальной (по словам кого-то из известных людей — парадокс — это правда,

очень похожая на неправду) дает удовлетворительное объяснение большинству наблюдений (в том числе, и очевидцев со стороны) и фактов. Оценки, сделанные в настоящей работе (отнюдь не фантастические), также вполне коррелируют с этой версией.

В заключение автор благодарит сотрудников РНЦ КИ: Рязанцеву А.В., Ульянова А.И., Лышева Л.Л. Чугунова О.К., Новобратскую И.Ф., Алексеева В.М., Гайдученко А.Б., помогавших подготовить материалы этой работы, особая благодарность А.Н. Кузьмину, разыскавшему материалы в электронном архиве Ф.Ф. Жердева и подготовившему их к опубликованию.

Литература

1. Абагян А.А. и др. Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. Информация подготовлена для совещания экспертов МАГАТЭ (25-29 августа 1986 г., г. Вена. Обобщенный материал ГК ИАЭ СССР, М., 1986.)
2. Боровой А.А., Гагаринский А.Ю. Атомная энергия т. 90, Вып. 2, февраль 2001.
3. Абрамов М.А., В.И. Авдеев, Е.О. Адамов и др. Канальный энергетический реактор РБМК. Под общей редакцией Ю.М. Черкашова. М., ФГУП НИКИЭТ, 2006, с. 632.
4. Новосельский О.Ю., Черкашов Ю.М., Чечеров К.П. Технические аспекты аварии на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС. Препринт ФГУП НИКИЭТ ЕТ-05/70, М., 2005.
5. Кисилев А.Н., Чечеров К.П. Модель процесса разрушения реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС. Ат.энергия, т.91, вып.5, дек.2001.
6. Материалы первой международной рабочей группы по тяжелым авариям. Дагомыс, 1989, М.: Наука, 1996.
7. Виктор Барьяхтар, Борис Горбачев, Валерий Кухарь (Украина). Чернобыльские небылицы – 5. Журнал ядерного общества России, 4-5, ноябрь, 2006, с. 11.
8. P.A. Platonov, E.I. Trofimchuk, O.K. Chugunov, V.I. Karpukhin. Yu.P. Tumanov and S.I. Alexeev. Annealing of radiation damage in graphite. Radiation effects. 1975, Vol. 25. pp. 105 – 110.
9. P.A. Platonov, V.I. Karpukhin, F.F. Zherdev, V.M. Markushev, V.N. Bespalov. Estimating the Temperature of Damaged Reactor Core Components at the Time of Explosion. First International Workshop on Severe Accidents and Their Consequences.
10. Takaharu Tsuruta, Masa-Aki Ochiap, Shinzo Saito. Conversion Ratio at Rapid Deposition of High Energy in LWR Fuels. – J.Nucl. Sci. Technol., Vol. 22, no. 9 (Sep. 1995)
11. Н.Ф. Правдок, В.М. Голянов. Berkeley Conf. 1961, no. 34, p. 160
12. T.S. Noggle, J.O. Stiegler. J. Appl. Phys. 33, 1726, 1894. (1962)
13. J. Ozeroff. Knolls Atom. Power Lab. Rep 205, 22, 6 (1946)
14. И.М. Лифшиц и др. Атомная энергия 6,4,391 (1959)
15. P.H. Gudixsen et al. The Current Status of ARAC and its Application to the Chernobyl Event. National laboratory VCRL – 95562, preprint, 1986. 8 p.
16. Э.В. Соботович, А.А. Вальтер, Ольховник и др. Твердые радиоактивные выпадения в ближней зоне Чернобыльской АЭС. Труды НАН Украины, 1993, №8, с. 172 – 176.
17. С.Е. Вяткин, А.Н. Деев, В.Г. Нагорный. Ядерный графит. М.: Атомиздат, 1967, с. 119
18. В.И. Барабанов, Ю.С. Виргилиев. Радиационная прочность конструкционного графита. М.: Атомиздат, 1976

19. В.М. Федуленко. Мудрость не всегда приходит с возрастом, или возвращение к истории о взрыве ЧАЭС. Газета «Курчатовец», №7-8 (1051-1052) август-сентябрь 2006 г.
20. Б.С. Родченков, А.Н. Семенов. Механические свойства сплава Zr – 2,5% Nb при высоких температурах. Российская конференция «Материалы ядерной техники». Материалы второй российской конференции «Материалы ядерной техники» (МАЯТ – 2), тезисы, М.: ВНИИНМ, 2005, 216 с., стр. 23

Рисунки и подписи к ним

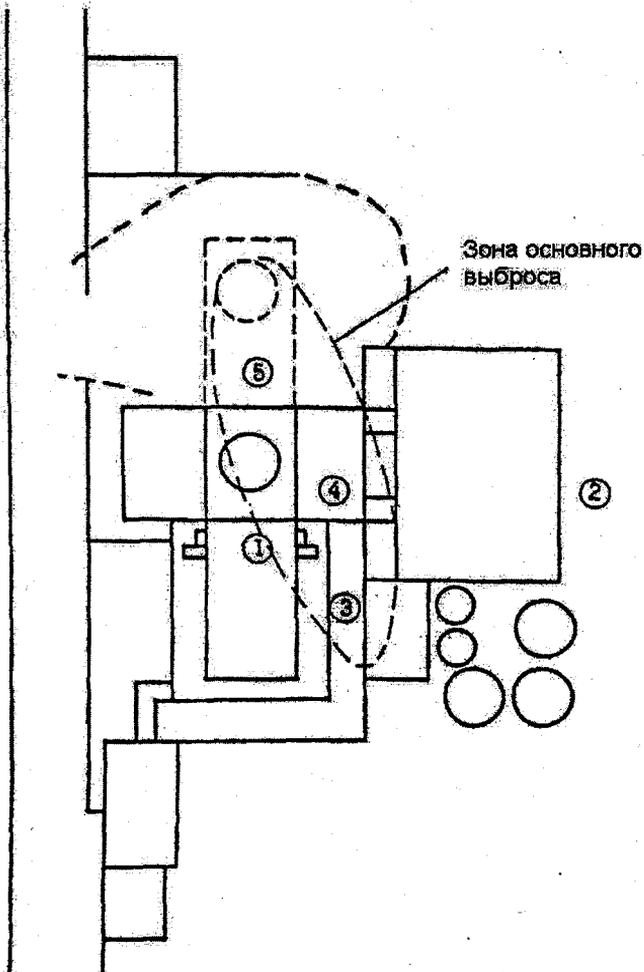


Рис. 1. Схема расположения зданий второй очереди ЧАЭС. Цифрами указаны места сбора фрагментов графитовых блоков. Пунктиром обозначены области наибольшего сосредоточения фрагментов. Наибольшее количество сосредоточено в пределах эллипса (по наблюдениям сотрудников ОРМ)

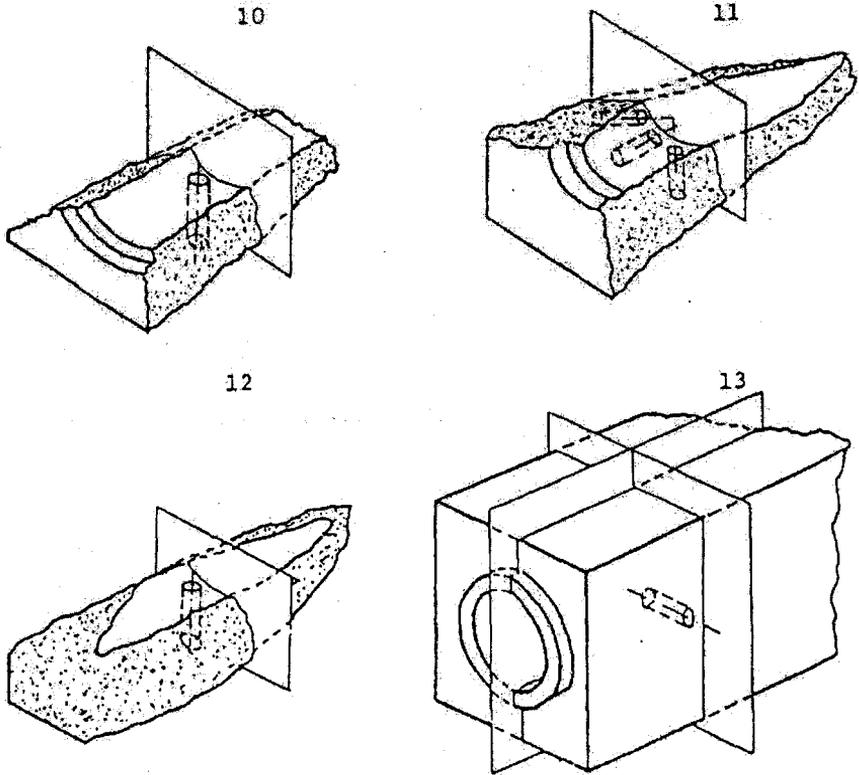


Рис. 2а. Эскизы фрагментов блоков и схема вырезки из них диффузионных образцов. Цифрами обозначены номера фрагментов, которые будут использованы при дальнейшем описании.

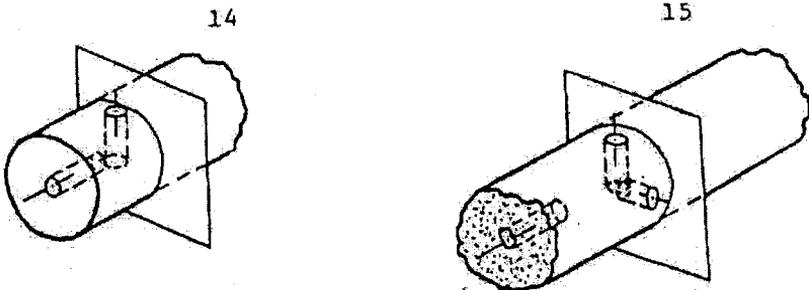


Рис. 2б. То же, что и на рис. 2а

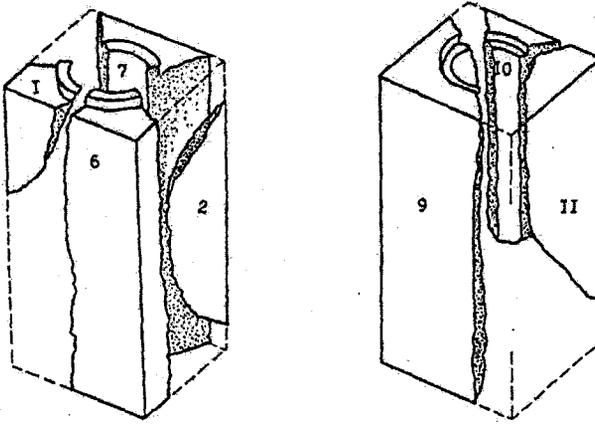


Рис 3. Реконструкция графитовых блоков из фрагментов, собранных в одном месте. Цифрами обозначены номера фрагментов.

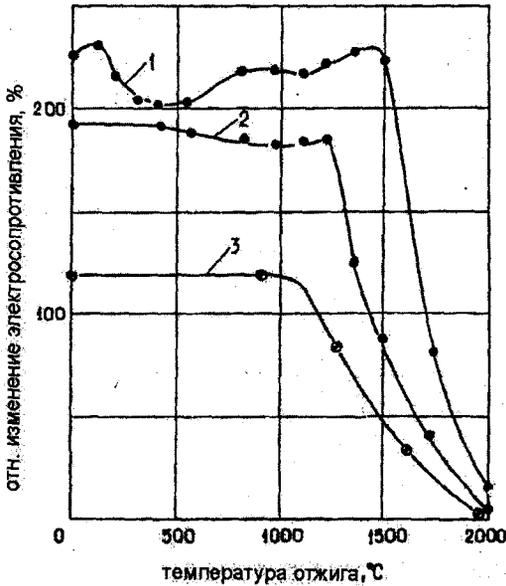


Рис. 4. Относительное изменение электросопротивления облученного графита ГР-280 в зависимости от температуры отжига (температура графитации 2300 °C);

1. $T_{\text{обл}} = 120-150$ °C, флюенс $4 \cdot 10^{20}$ см⁻²
2. $T_{\text{обл}} = 550$ °C, флюенс $15 \cdot 10^{20}$ см⁻²
3. $T_{\text{обл}} = 900$ °C, флюенс $12 \cdot 10^{20}$ см⁻²

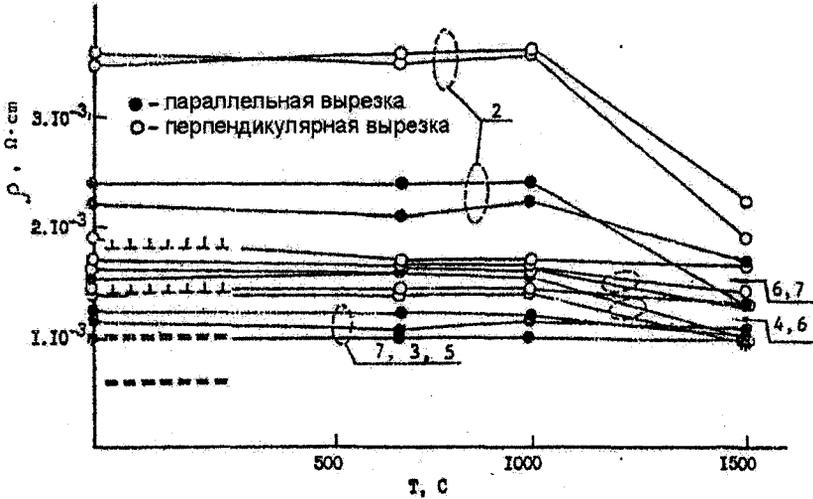


Рис. 5. Восстановление электропроводности образцов из фрагментов графитовых блоков (цифрами обозначены номера фрагментов). На рисунке обозначены области значений электропроводности необлученного графита по большому количеству измерений для перпендикулярной \perp и параллельной \parallel вырезов.

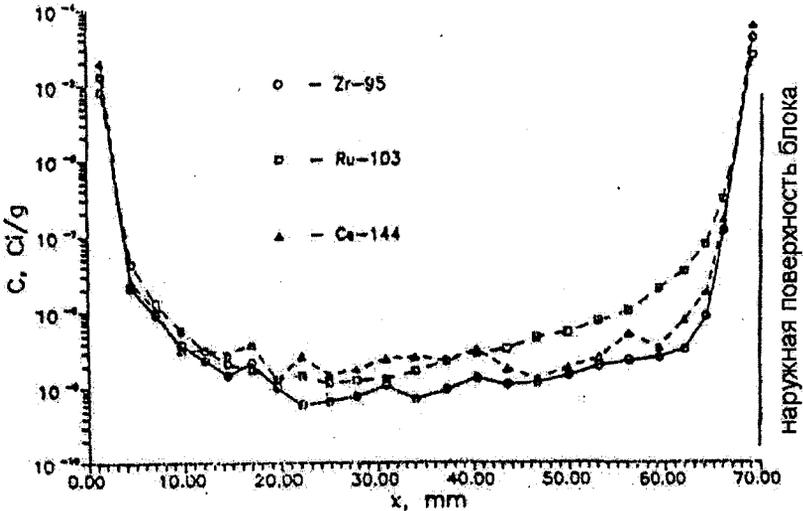


Рис. 6. Распределение удельной концентрации продуктов деления по сечению графитового блока (фрагмент № 7).

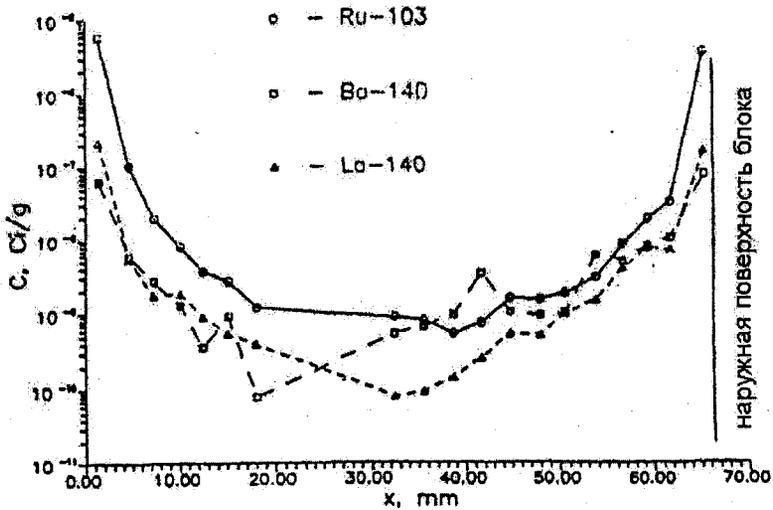


Рис. 7. Распределение удельной концентрации продуктов деления по сечению графитового блока (фрагмент № 5).

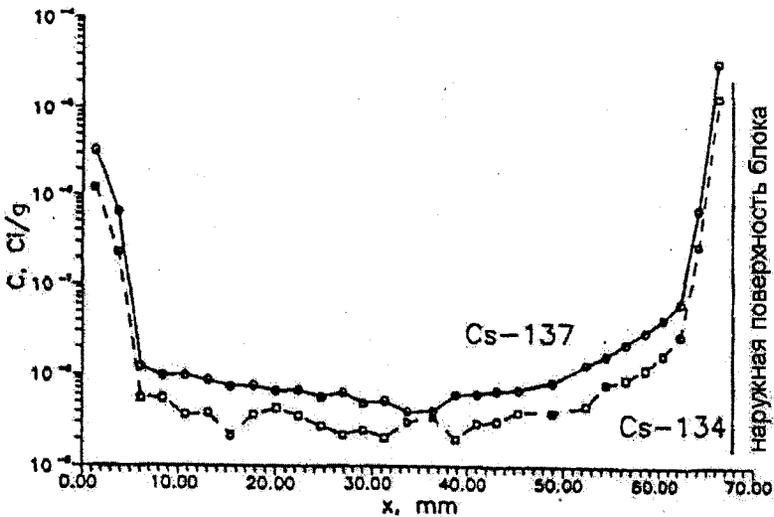


Рис. 8. Распределение удельной концентрации цезия по сечению графитового блока (фрагмент № 10).

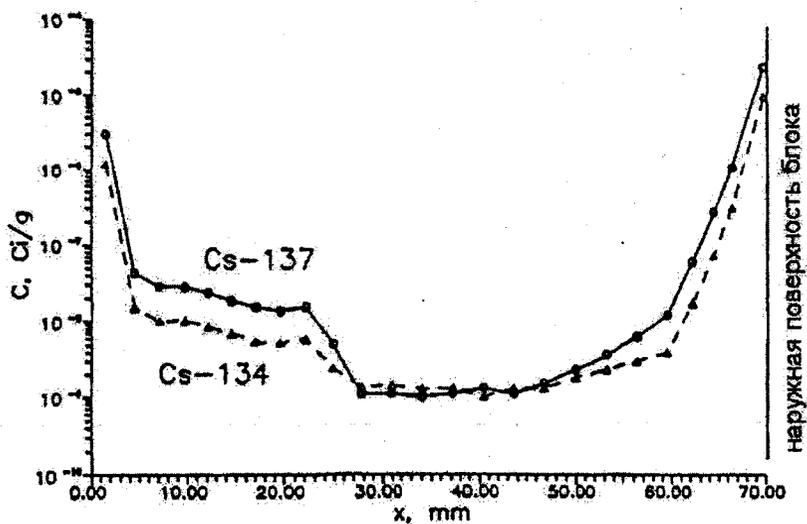


Рис. 9. Распределение удельной концентрации цезия по сечению графитового блока (фрагмент № 7).

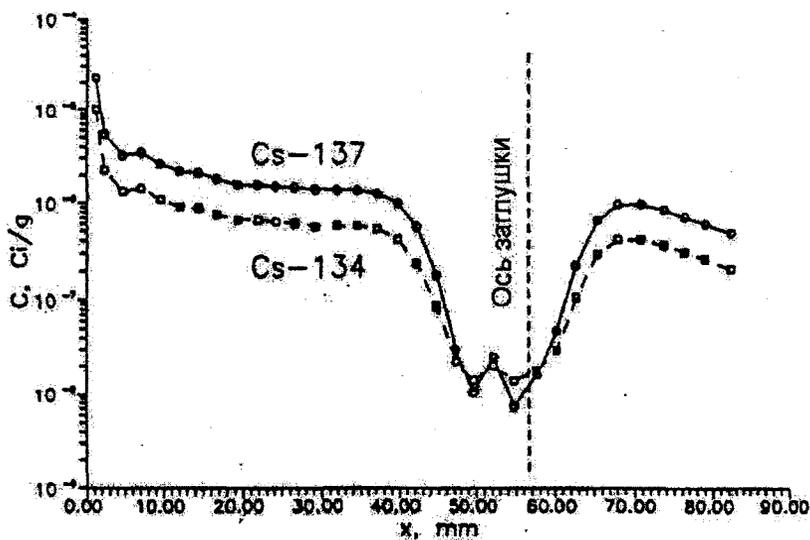


Рис. 10. Распределение удельной концентрации цезия по сечению фрагмента заглушки отражателя (фрагмент № 8).

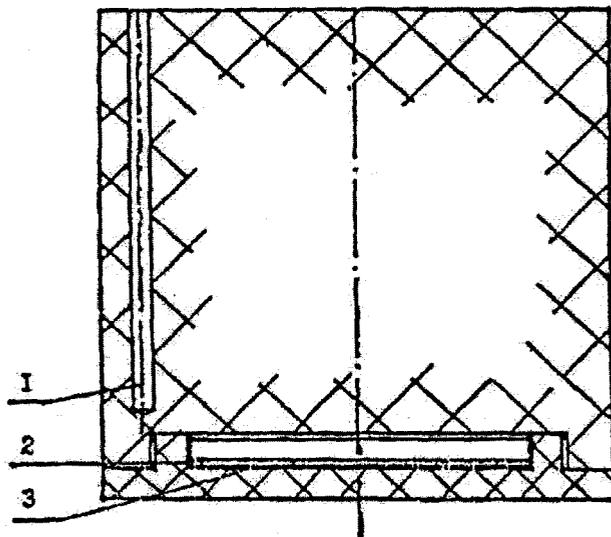


Рис. 11. Эскиз графитового контейнера для определения параметров массопереноса цезия в режиме нагрев-охлаждение: 1 – Канал для термопары, 2 – облученное топливо; 3 – слой карбида молибдена.

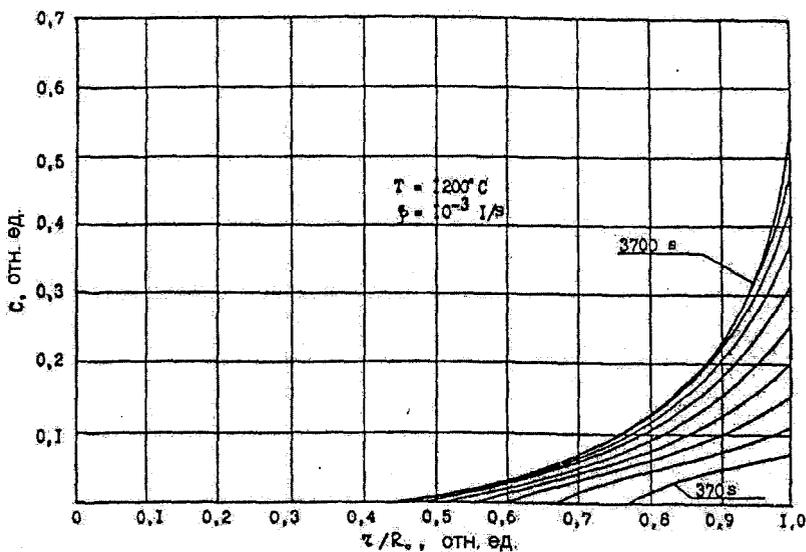


Рис. 12. Распределение относительной концентрации диффузанта в транспирационной волне; цилиндрическая геометрия.

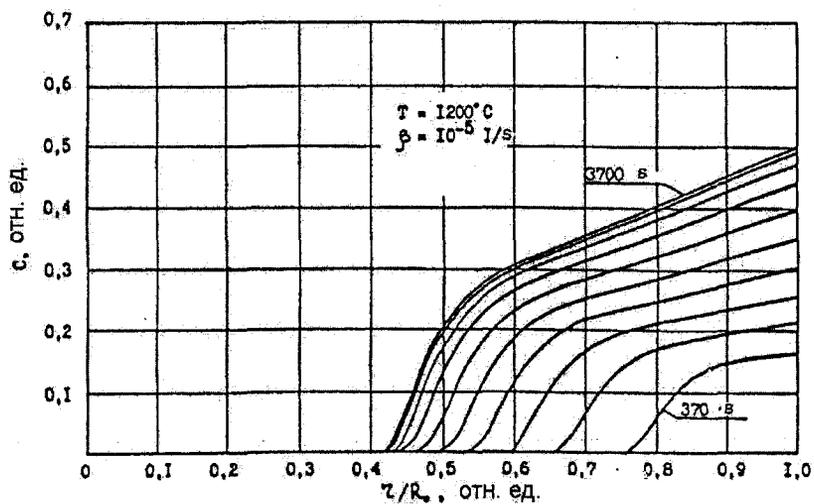


Рис. 13. Распределение относительной концентрации диффузанта в транспирационной волне; цилиндрическая геометрия.



Рис. 14. Внешний вид фрагмента технологического канала с нижним переходником. Диаметр канала вблизи верхнего конца несколько увеличен.



Рис. 15. Нижний торец фрагмента технологического канала с переходным соединением.



Рис. 16. Верхний торец фрагмента технологического канала.

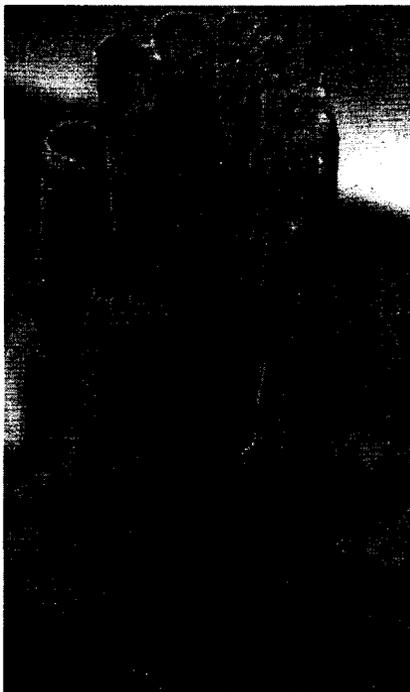


Рис. 17. Фрагмент ТВС, извлеченной из фрагмента технологического канала. Оболочки твэлов сплавлены между собой.

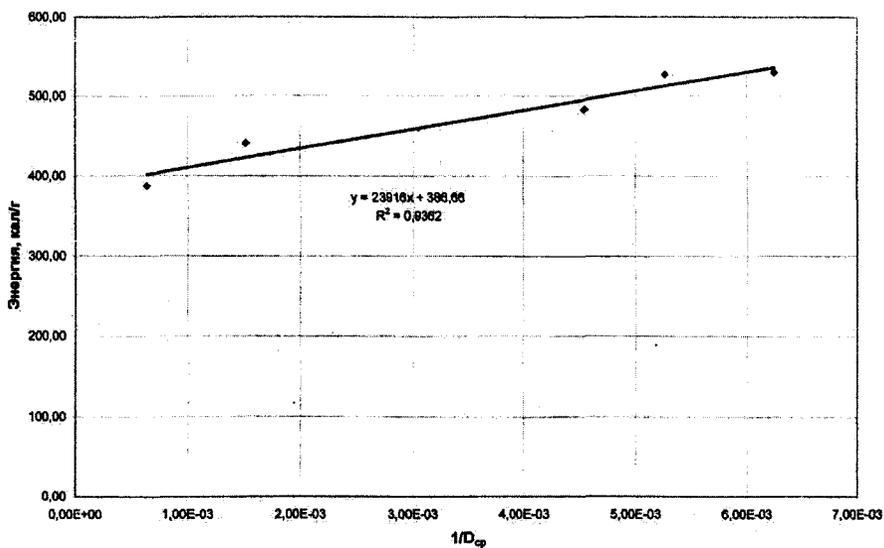


Рис. 18. Зависимость теплосодержания от размера частиц при экспериментах типа RIA. Данные из работы [10].

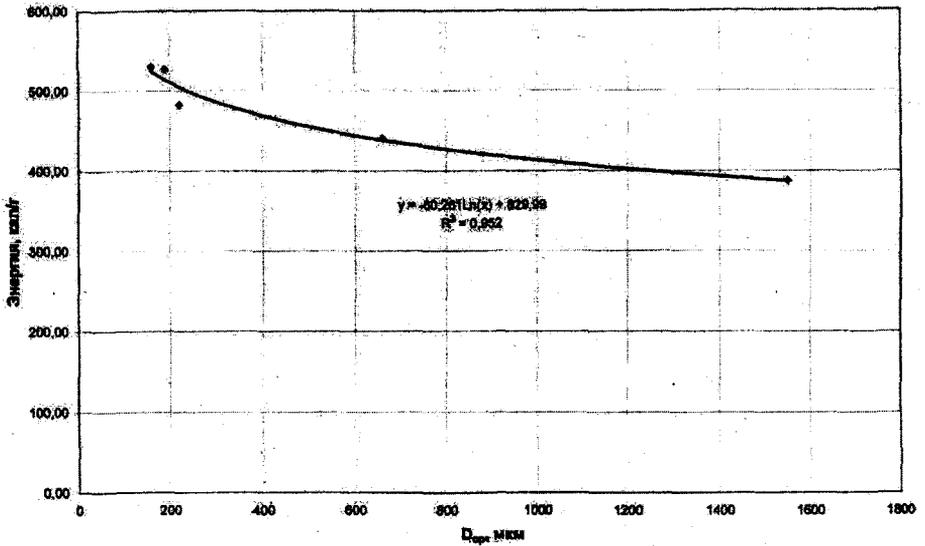


Рис. 19. Зависимость теплосодержания от размера частиц. Те же данные, что и на Рис. 18.

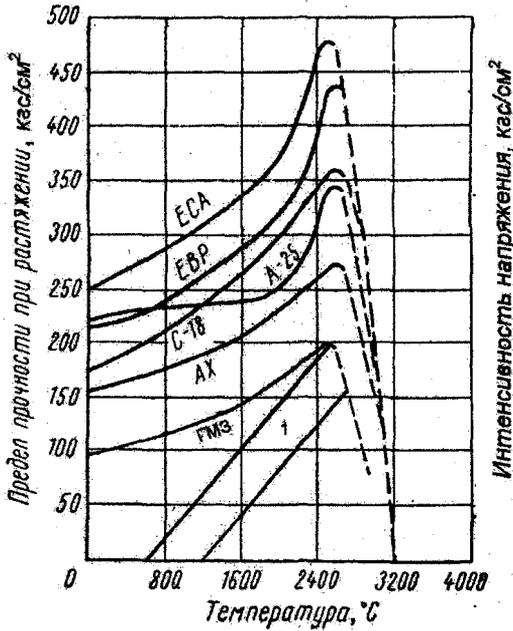


Рис. 20. Зависимость прочности различных марок графита при растяжении; 1- зависимость интенсивности напряжений на поверхности пор графита ГР-280 от температуры.

Подписано в печать 08.10.2007. Формат 60×90/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,25

Тираж 135 экз. Заказ 79. Индекс 3624

Отпечатано в РНЦ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

