

ТОПЛИВО В ПОМЕЩЕНИИ 305/2. ВОЗМОЖНЫЙ СЦЕНАРИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ЯДЕРНО-ОПАСНЫХ ЗОН

Проведен анализ существующих моделей скопления с высоким содержанием урана в помещении 305/2 с точки зрения их применимости к описанию аномального события, зарегистрированного в помещении 304/3 в июне 1990 г. Рассмотрен и обсужден ряд параметров, необходимых для адекватного описания процессов, происходивших при образовании лавообразных топливосодержащих материалов. Представлена версия сценария образования зон с высокой концентрацией ядерного топлива. Определены геометрические параметры зоны, содержащей скопление топливосодержащих материалов, поведение топлива в котором, возможно, привело к аномальному событию 1990 г.

Ключевые слова: топливосодержащие материалы, ядерно-опасные зоны, сценарий образования, модель скопления.

Модели зон с высокой концентрацией ядерного топлива

Анализ результатов скважинных измерений, выполненных в основном в период 1988 - 1990 гг., позволил сделать заключение, что в юго-восточной части помещения 305/2 (в районе пролома, ведущего в помещение 304/3, или в непосредственной близости от него), а также в области прожога в направлении помещения 307/2 в районе отметки +9.000 присутствуют скопления топливосодержащих материалов (ТСМ) с высоким содержанием урана [1]. Аномальное событие, зарегистрированное в помещении 304/3 в июне 1990 г., в соответствии с заключением экспертов было связано со значительным увеличением генерации нейтронов в скоплении ТСМ, находящемся в помещении 305/2 у пролома в стене, ведущего в помещение 304/3 [2].

Следует отметить, что сценарий образования, изложенный в работе [3], не объясняет и не предполагает присутствие таких скоплений в подреакторном помещении 305/2. И последовательность этапов лавообразования, предложенная в [3], была вполне справедливо подвергнута критике в работах [4, 5].

Некоторые дополнения к сценарию образования ЛТСМ, основанные также и на результатах работ [4, 5], позволили обосновать существование скоплений ТСМ с высоким содержанием топлива [6].

Предполагалось, что основная масса топлива должна находиться в полостях (зонах глубокого проплавления), образовавшихся в подреакторной плите (ПП) на активной стадии аварии в районе отметок +8.000 - +10.000. Была разработана модель такого скопления ТСМ, расположенного в юго-восточной части помещения 305/2 у пролома-прожога, ведущего в помещение 304/3, рассчитаны ее материальный состав и распределение потоков нейтронов в зоне расположения скопления (рис. 1).

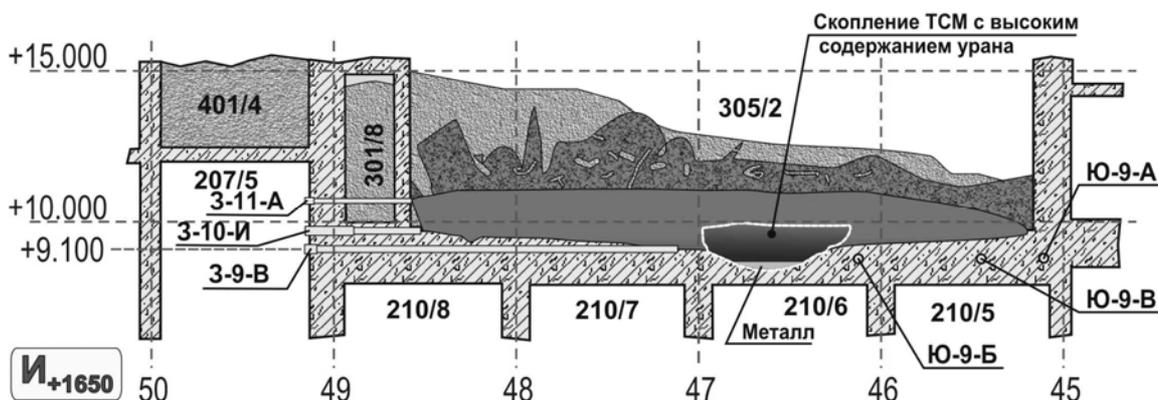


Рис. 1. ТСМ в помещении 305/2. Сечение по ряду И₊₁₆₅₀.

Предполагалось, что зона находится в массиве ЛТСМ, максимальная концентрация урана составляла 30 % (мас.).

Очевидно, что для верификации данных модельных расчетов необходимо было выбрать представительный массив экспериментальных данных. Поэтому расчеты ядерно-физических параметров проводились для 1989 г. [7]. Именно в период 1988 - 1990 гг. на границах рассматриваемой зоны был проведен значительный объем нейтронных измерений [8]. Результаты расчетов распределения плотности потоков нейтронов по западной границе зоны с высоким содержанием топлива в помещении 305/2 по характеру изменений удовлетворительно совпали с результатами прямых измерений. Объем зоны составил около 16 м^3 , количество топлива, заключенного в зоне, - примерно 10 т по урану.

В то же время проведенные работы показали, что масса топлива, заключенного в модели зоны 1, существенно занижена, а система в данной модели является сильно подкритичной. Эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{эф}$ для рассматриваемой модели ТСМ составил $k_{эф} = 0,237$.

Необходимо отметить, что выполненные исследования не являются доказательством факта существования критмассовой зоны (КМЗ), возможно расположенной в границах этого скопления. Поэтому представлялось целесообразным рассмотреть один из возможных вариантов структуры подобного образования, который позволил бы объяснить аномальное событие 1990 г.

Модель, позволяющая имитировать аномальное событие 1990 г., представлена в работе [9] (рис. 2). Геометрия модели – цилиндр, диаметром 5 м и высотой 0,9 м. Объем модели $17,7 \text{ м}^3$, т.е. примерно такой же, как в модели, представленной в работах [6, 7] (см. рис. 1). Расположен этот цилиндр в рядах И – К, осях 46 – 47, нижнее основание цилиндра – на отметке +8.300, т.е. фактически в границах ПП. Для достижения условий, обеспечивающих коэффициент размножения $k_{эф} = 1$, модель скопления ТСМ, содержала около 20 т урана с выгоранием $12,5 \text{ МВт}\cdot\text{сут}/\text{кг}$ урана (примерно 50 % от массы скопления). При этом свободный объем скопления, заполненный водой, составил 35 %.

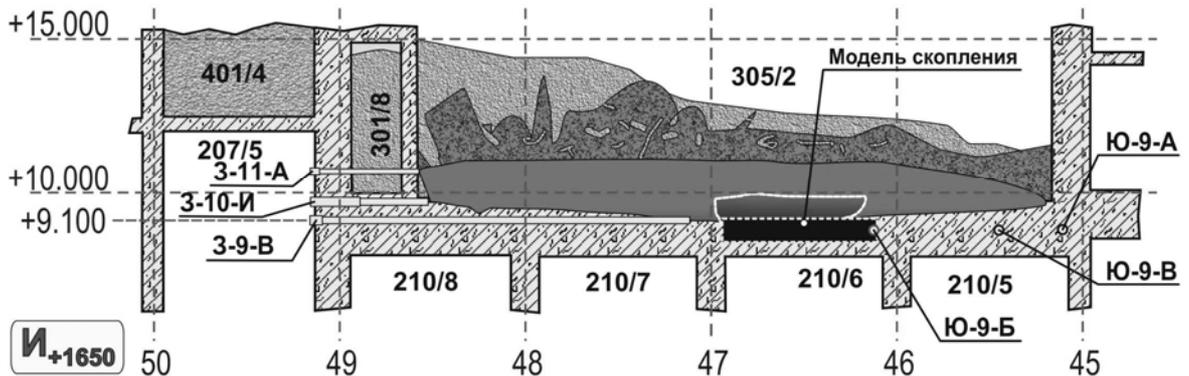


Рис. 2. Расположение цилиндрической модели скопления. Сечение по ряду И+1650.

Данная модель не может служить доказательством ядерной опасности данного скопления ТСМ, хотя бы только по ее пространственному расположению (см. рис. 2).

ПП пронизана сетью скважин, измерения в которых, а также результаты бурения позволили удовлетворительно определить нижнюю границу массива ЛТСМ, расположенного в помещении 305/2. А пространственное расположение ядерно-опасного скопления, согласно данной модели, явно вступает в противоречие как с характеристиками выбуренного керна, так и с результатами скважинных измерений (см. рис. 2) [10].

К вопросу о достоверности сценариев лавообразования

Информация, полученная в результате буровых работ, позволяет утверждать, что массив материалов помещения 305/2, содержащих лавы, не является однородным, - кроме ЛТСМ он содержит массу непереплавленных, непрореагировавших при варке лавы объектов (конструкционные материалы, графит, топливо и т.п.) [10]. Соотношение массы лав и непрореагировавших объектов, их пространственное расположение в массиве зависело от многих факторов – параметров, определявших процесс образования черновобильских лав.

Попробуем произвести оценку количества параметров, необходимых для описания поведения ЛТСМ на стадии их образования.

При рассмотрении процесса образования ЛТСМ с первых секунд аварии следует рассматривать многокомпонентную открытую термодинамическую систему с изменяющимися внешними граничными условиями.

При развитии аварии протекали процессы взаимодействия топлива с материалами различного состава: циркониевой оболочкой твэлов, серпентинитовой засыпкой, металлическими элементами строительных конструкций, бетоном, песком. Кроме того, происходило физическое перемещение элементов объема промежуточных компонентов ЛТСМ - горячие массы растекались по соседним помещениям, коридорам, кабельным проходкам. При этом параметры состояния рассматриваемой открытой системы и внешние условия постоянно менялись во времени и пространстве.

Химические компоненты лавы целесообразно рассматривать на уровне оксидов. Взаимодействие топлива только со строительным бетоном 4-го блока ЧАЭС предполагает анализ состояния термодинамических систем, в которые, кроме топлива, входит следующий набор оксидов: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 , FeO , MgO , TiO_2 , P_2O_5 , MnO , Cr_2O_3 .

Облученное ядерное топливо вносит весомый вклад в термодинамическое состояние системы, являясь основным источником тепловыделения.

В самом грубом приближении можно принять, что переменными параметрами при изменении химического состава ЛТСМ являются относительные массовые содержания SiO_2 и UO_2 .

Известно, что при описаниях двухкомпонентных систем в диапазоне температур от 50 до 2500 °C диаграммы состояния могут содержать до пяти (а в некоторых случаях и больше) областей, характеризующих возможные состояния и фазовые превращения в двухкомпонентной системе [11]. Наряду с этим, при добавлении в двухкомпонентную систему хотя бы одного дополнительного типа оксидов, вид диаграммы состояния может меняться самым кардинальным образом [12]. Конечным состоянием термодинамической системы из множества возможных вариантов является состояние, которому соответствует минимальное значение свободной энергии Гиббса. Но при попытке рассмотрения последовательности событий на термодинамической диаграмме состояния, где эволюция системы изображается в виде выбора направлений изменения положения точки, соответствующей совокупности термодинамических параметров, возникают неопределенности.

На выбор направлений в условиях неравновесности термодинамических процессов влияют такие факторы, как вариации термодинамических характеристик пространственных участков многокомпонентной топливосодержащей массы и изменения в составе и геометрии окружающих ЛТСМ веществ. Можно принять, что в каждый рассматриваемый момент времени термодинамическая система имеет возможность дальнейшей эволюции по двум направлениям на соответствующей совокупности областей в многомерной диаграмме термодинамического состояния системы ЛТСМ.

Следует учесть параметры, характеризующие пространственную плотность и динамическую вязкость системы. Эти параметры были разными в различных областях образования ЛТСМ и менялись во времени. Массив материалов, в котором варились лавы, с первых минут аварии можно рассматривать как совокупность пространственных участков с размерами, соответствующими размерам минимальных источников тепловыделения с прилегающими областями. Размер такого минимального источника в виде отдельной топливной таблетки (около 1 см³) с прилегающими областями соответствует объему 10 см³. Поведение каждого такого минимального объема описывается набором термодинамических и физических параметров.

Степень разбиения лавы на минимальные элементы объема при описании процессов образования ЛТСМ, с одной стороны, существенно влияет на сложность рассматриваемой модели, а с другой стороны, позволяет более точно описать ход процессов между начальным и конечным состояниями при "варке" ЛТСМ.

Если принять объем ЛТСМ в помещении 305/2 около 400 м³ [13], то количество минимальных объемов при описании процесса "варки" ЛТСМ составляет величину порядка $400 \text{ м}^3 / 10 \text{ см}^3 = 4 \cdot 10^7$ участков.

При оценке количества термодинамически активных пространственных участков по количеству твэлов¹ получим значение $3 \cdot 10^4$ (1659 тепловыделяющих сборок \times 18 твэлов = 29862 твэлов, т.е. примерно $3 \cdot 10^4$ участков), а по количеству сборок соответственно – $1,7 \cdot 10^3$ участков. Количество параметров поведения рассматриваемой открытой системы, которые задаются топологией граничных областей, можно ограничить числом граней для объема кубической формы, т.е. 6.

¹ Если предположить, что половина топлива первоначальной загрузки реактора участвовала в процессе лавообразования. Одна кассета состоит из двух сборок. Таким образом, количество сборок в реакторе 4-го блока на момент аварии составляло $1659 \cdot 2 = 3318$.

К граничным условиям также необходимо добавить два термодинамических параметра, описывающих состояние внешней среды, а также массу (и состав) реагирующих компонентов, поступающих извне к ЛТСМ.

В процессе варки лава растекалась по путям, содержащим элементы разрушенных строительных конструкций. При принятии разброса элементов строительных конструкций близким к случайному изменения объема ЛТСМ и направления движения лавы следует описывать с использованием четырех параметров, слабозависимых между собой.

Таким образом, рассмотрение процесса развития аварии с точки зрения динамики поведения ЛТСМ подразумевает описание минимум $6 + 2 + 4 = 12$ независимых параметров.

В приближении двухкомпонентной (SiO_2 и UO_2) системы с возможностью перехода на диаграмме состояния из одной точки с известным набором параметров в другую только по двум вероятным путям общее количество параметров составляет около $12 + 2 = 14$.

Если принять количество слабозависимых объемов равным 7 (число основных скоплений ТСМ в помещении 305/2 после окончания активной стадии аварии [13]), то число независимых параметров для двухкомпонентной системы составит уже $14 \cdot 7 = 98$, т.е. около 100.

Как отмечено в работе [14], одна таблетка топлива или единичный ТВЭЛ ни при каких реальных условиях не могут обеспечить процесс лавообразования. В то же время старт процесса лавообразования возможен при условии заключения отдельной сборки в ограниченный объем материалов, реально присутствовавших в шахте реактора во время аварии [14]. Осуществление же развитого процесса лавообразования по сценарию [3] возможно при условии присутствия в ограниченном объеме не менее 1 т облученного ядерного топлива или примерно 20 сборок [6]. Таким образом, количество термодинамически активных участков может быть ограничено интервалом значений $85 - 1,7 \cdot 10^3$.

В итоге для описания поведения при лавообразовании только двухкомпонентной системы нам потребуется $14 \cdot 85 - 14 \cdot 1,7 \cdot 10^3$ или по порядку $10^3 - 10^4$ параметров.

Автор сценария образования чернобыльских лав утверждает, что состав ЛТСМ и основной механизм их образования достаточно хорошо изучен [3]. Что касается состава лав, то это утверждение вполне соответствует действительности. Что же касается механизма, то, учитывая изложенное выше, это утверждение вызывает законное сомнение, так как автором работы [3] был предложен гипотетический сценарий, основанный фактически на диаграммах состояния двух- и трехкомпонентных систем.

Полная и достоверная модель протекания активной стадии аварии, в том числе и описание поведения ядерного топлива, еще не созданы и, вероятно, не могут быть созданы именно потому, что уровень наших знаний о реальных процессах, происходивших во время активной стадии аварии, явно недостаточен для построения такой полной модели.

Но есть одно неопровержимое правило, существующее в нашем мире, – любая система должна существовать и существует на минимальном энергетическом уровне. Применительно к процессу лавообразования это можно сформулировать так: в первую очередь протекали те процессы, которые требуют для своего развития наименьшие затраты энергии, и эти процессы протекали, конечно, при возможно меньших температурах.

Прежде чем приступить к изложению основной части статьи, представляется целесообразным подвергнуть критике одну недавно созданную «модель образования ядерно-опасных скоплений на 4-м блоке ЧАЭС» [15].

Авторы публикации [15] сообщают нам о том, что во время протекания аварии на 4-м блоке «...в юго-восточном квадранте подреакторного помещения 305/2 образовалась конфигурация «доменной печи» со всеми элементами ее функционирования...». Кроме того, «доменный» процесс завершился с образованием... в нижней части...» юго-восточного квадранта помещения 305/2 «...твердого раствора фракций тяжелых оксидов с критической массой топлива (более 20 тонн урана)...».

Причем «концептуальная модель» «доменного» процесса строилась авторами не на подобии физико-химических процессов, происходивших при образовании лав, и процесса выплавки чугуна в домне, а фактически на основании неких внешних признаков подобия, как-то первоначальная засыпка шахты реактора и домны, горение графита или распределение температур в шахтном пространстве.

Первое, что необходимо отметить, – это некорректное использование ссылок на источники информации. Так, данными по температурам, почерпнутыми из различных источников и, возможно, существовавшими на отметках +8.500 - + 20.000, авторы откровенно манипулируют, подгоняя их под

значения, характерные для доменного процесса. Например, характерные температуры процессов, позаимствованные авторами [15] из статей [4, 16, 17], никак не привязываются авторами этих работ к высотным отметкам.

Что же касается ядерно-опасных скоплений, то версия их образования, изложенная в цитируемой статье, представляется вообще фантастической. Так, читаем на странице 100 статьи [15] последний абзац: «...До засыпки «шихты» на пол помещения 305/2, не прикрытого остатками четверти сектора ОР, был сброшен расплав топлива (кориум), образовавшийся при расплавлении ТК еще до разгерметизации реакторного пространства...». И далее - «...кориум, разогретый до температуры уран-циркониевой эвтектики, расплавляет тепловую защиту ПП...», взаимодействует с бетоном, образуя «ванну расплава», а расплавленная сталь располагается над продуктами взаимодействия кориума и бетона. А сверху над слоем металла из «шихты» (читай - ФАЗ и другие материалы) «...в силикатной матрице в верхних слоях ванны расплава формируется несмешиваемый с металлической компонентой слой жидкого «шлака» – черные ЛТСМ». Затем «...переполнение ванны расплава приводит к сливу «шлака» за пределы «домны» и образованию большого горизонтального потока черных ЛТСМ». При этом, как утверждают авторы, «сливались» только те ЛТСМ, концентрация урана в которых не превышала 5 %!

Как утверждают авторы работы [15], 1 - 2 мая, т.е. через 5 дней, после того как «кориум был сброшен на пол помещения 305/2», «...разбавление кориума силикатами приводит к инверсии несмешиваемых металлической и оксидной частей расплава. Это известное свойство кориума... стратифицирует ванну расплава и формирует структуру ядерно-опасных скоплений ТСМ».

Необходимо отметить, что удержание кориума в районе перекрытия пола помещения 305/2 в температурных и временных условиях, определенных авторами работы [15], вполне очевидно привело бы к разбавлению расплава до такой концентрации топлива, при которой формирование ядерно-опасных скоплений ТСМ стало бы просто невозможным [4, 14, 18, 19]. Здесь также следует заметить, что, говоря об инверсии частей расплава, авторы ссылаются на источники, в которых нет никакого упоминания об «этом известном свойстве кориума».

Адекватность модели обычно определяется степенью совпадения свойств (функций/параметров/характеристик и т.п.) модели и соответствующих свойств моделируемого объекта.

Анализ материалов, представленных в работе [15], показывает, что аналогия с доменным процессом фактически сводится только к одному признаку подобия – процессу горения графита, который, возможно, и протекал в реакторном пространстве со значительным выделением энергии [20]. А «доменный процесс», как раз и был бы тем фактором, который не способствовал бы, а, наоборот, если следовать логике изложения цитируемой работы, препятствовал бы образованию зон с высоким содержанием урана.

Чтобы осуществить процесс образования скопления с высоким содержанием урана, требуется не нагрев области зоны или создание дополнительных тепловых барьеров, что привело бы к ускорению процесса взаимодействия топлива с конструкционными материалами и снижению концентрации урана, а, наоборот, необходимо обеспечить условия максимального теплосъема из района расположения скопления.

Таким образом, модель «доменной» версии, изложенная в работе [15], никак не может быть использована для описания процессов, происходивших или возможно происходивших в шахте реактора 4-го блока во время аварии.

Возможный сценарий образования ядерно-опасных зон

Как установлено, основным источником тепла во время аварии было само ядерное топливо.

При варке чернобыльских лав дополнительно к остаточному тепловыделению ядерного топлива присутствовали и другие источники тепла. Очевидно, что таким дополнительным источником тепла была энергия, выделяющаяся при экзотермических химических реакциях, которые с высокой вероятностью имели место во время аварии. В соответствии с оценками, проведенными ранее, энергетический вклад этих реакций мог достигать 30 % от остаточного тепловыделения [17].

Все дело в том, в какой период времени осуществлялись эти реакции. Очевидно, что для старта и осуществления самого процесса лавообразования было необходимо наличие положительного баланса тепла, т.е. должно было выделяться тепла больше, чем отдавалось в окружающее пространство. Интенсивность остаточного тепловыделения со временем падает по экспоненте. И если эта мощность с учетом вылета летучих компонентов сразу после взрыва составляла 230 кВт/т (урана), то через 6 ч она упала в два раза, при том что термическое сопротивление системы, содержащей топли-

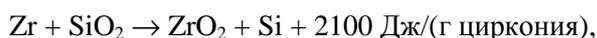
во, образующиеся лавы, конструкционные материалы, графит и т.п., а также строительные конструкции сложной конфигурации и т.д., изменялось сравнительно мало.

Таким образом, вполне вероятно, что положительный баланс тепла существовал в течение короткого промежутка времени – нескольких часов. В качестве примера, иллюстрирующего вклад химических реакций, рассмотрим только один фактор - присутствие циркония в образовавшемся после взрывов завале материалов и его роль в процессе образования чернобыльских лав.

Для справки. В активной зоне реактора 4-го блока присутствовало 103 т канального циркония, точнее сплава, содержащего 2,5 % ниобия, и 74 т твэльного циркония (примесь ниобия 1 %) [21]. Масса лав, покинувших помещение 305/2, по весьма приблизительным оценкам составляет примерно 900 т [3, 6], эти лавы содержат примерно 50 – 60 т урана и 30 – 40 т циркония.

Чистый цирконий чрезвычайно агрессивный металл. На воздухе компактный цирконий загорается при 600 - 800 °С. В виде порошка он способен самовозгораться на воздухе [22].

При высокотемпературном взаимодействии с кремнеземом осуществляется экзотермическая реакция [18]



т.е. в идеале взаимодействие каждого грамма циркония с кремнеземом приводит к выделению более 2 кДж тепла.

Таким образом, только эта реакция (на 35 т циркония) могла привести к генерации дополнительной энергии на уровне примерно $7 \cdot 10^{10}$ Дж.

Все дело в том, в какой период времени и как быстро могла протекать эта реакция. Если бы эта реакция полностью реализовалась (для 900 т лав) в течение первых 6 ч аварии, то она бы дала (по отношению к интегральному тепловыделению 55 т урана в течение первых 6 ч - около $2 \cdot 10^{11}$ Дж) примерно 30 %-ный прирост энергии. И, естественно, старт этой реакции, как старт всего процесса, приведшего к образованию основной массы ЛТСМ, происходил при условии обеспечения хорошего контакта циркониевой оболочки с кремнийсодержащими материалами, в основном с песком. Как было определено экспериментально, старт процесса образования основной массы чернобыльских лав, вероятнее всего, происходил при температуре 1400 °С [23, 24].

На основании приведенных выше фактов и наших предположений попытаемся реконструировать последовательность событий, происходивших в помещении 305/2 и шахте реактора во время аварии, предопределивших распределение ТСМ по объему помещения 305/2 и приведших, в том числе, к образованию зон с высоким содержанием урана.

Реконструкция состояния шахты реактора в первые минуты аварии была достаточно подробно изложена в ряде опубликованных ранее работ [6, 25, 26], поэтому приведем только отдельные фрагменты этой реконструкции, необходимые для дальнейшего изложения:

основная масса топлива была сосредоточена в юго-восточном квадранте помещения 305/2 над отбитой четвертью опоры реактора;

значительная часть твэлов имела хороший контакт с кварцевым песком шахтной и серпентинитовой засыпок схемы ОР и межкомпенсаторного зазора;

основание стены между помещениями 305/2 и 304/3 разрушено.

Приведем также следующие установленные факты:

интенсивность взаимодействия циркония с силикатами при всех условиях как минимум на порядок выше интенсивности взаимодействия циркония с урановым топливом [4];

само урановое топливо (UO₂) интенсивно взаимодействует с двуокисью кремния только при температурах выше 2000 °С [18];

присутствие циркония в силикатном расплаве значительно интенсифицирует процесс растворения UO₂ [18].

Старт процесса лавообразования происходил повсеместно, в областях, где осуществлялся плотный контакт циркониевой оболочки твэлов с кремнийсодержащими материалами (в основном с песком) и обеспечивался низкий уровень теплосъема. При этом появлялось множество малых очагов лавообразования. Большая часть этих очагов прекращала свое существование, так как расплавленные компоненты за счет гравитации неизбежно покидали очаги либо застывали вследствие изменения условий теплообмена, образуя малые скопления ЛТСМ. Логично предположить, что в первую очередь лавообразование происходило в тех областях, где присутствовало топливо с большим выгоранием, обеспечивающим более высокий уровень тепловыделения.

Предположим, что процесс взаимодействия основной части циркония с силикатами произошел в короткий промежуток времени, например в начальные шесть часов. На 6-й час уровень оста-

точного тепловыделения снизился в два раза. Также значительно снизилась интенсивность экзотермических реакций. Баланс тепла становится отрицательным, и наша система начинает остывать.

Образовавшиеся лавы собираются на полу помещения 305/2 и сформировавшиеся коричневые ЛТСМ поступают в помещения парораспределительного коридора и бассейна-барботера. Формируются прожоги в подреакторной плите. Несмотря на низкую вязкость лав [6, 14], интенсивность их поступления в помещение 210/6 ограничена еще не расплавившимися металлоконструкциями схемы ОР. В определенный момент раздробленное основание стены, разделяющей помещения 305/2 и 304/3, окончательно «разъедается» лавой, которая с начальной температурой около 1600 °С проникает в интенсивно расширяющийся пролом-прожог. Первоначальное заполнение помещения 304/3 вследствие низкой вязкости лавы происходит в считанные минуты, возможно, и быстрее. В течение очень короткого времени лава заливает коридоры 301/5 и 301/6 и впоследствии формирует «слоновью ногу» и сталактиты в помещении 217/2.

За короткий промежуток времени из помещения 305/2 происходит «слив» 200 – 400 т лав. Происходит перемещение части нерасплавившихся материалов к пролому-прожогу, который частично забивается непереплавленными материалами. Поэтому истечение лавы существенно замедляется. В результате этого процесса теплосодержание материалов, находящихся в помещении 305/2, резко снижается. В то же время происходит изменение геометрии завала, содержащего фрагменты ОЯТ. За счет гравитации и высокой пластичности основная масса лав и расплавленного металла сосредотачивается в нижней части помещения 305/2. Верхние слои материалов, находящихся в помещении 305/2, содержат в основной своей массе непереплавленные фрагменты, в том числе и фрагменты ОЯТ. Процесс лавообразования в юго-восточном квадранте практически останавливается, черные лавы остывают и постепенно вытекают в помещение 210/6.

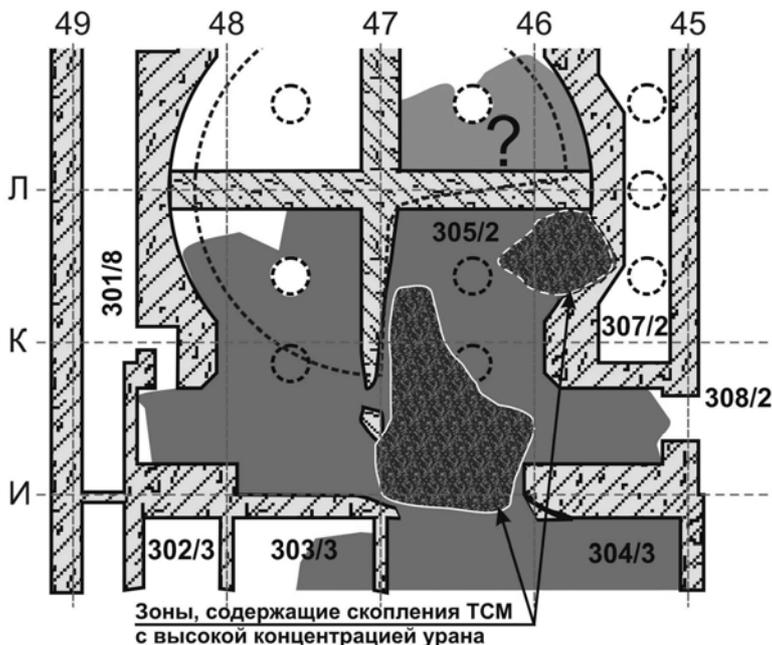


Рис. 3. Проекция зон на отметку +9.000.

Сформировавшееся в результате этого процесса размещение ТСМ в помещении 305/2 представлено на рисунке (см. обложку, с. 3). Тщательное изучение результатов буровых работ и скважинных измерений позволило определить в массиве ТСМ помещения 305/2 геометрические параметры и координаты зоны, в которой находятся скопления ТСМ с высоким содержанием урана (рис. 3 и 4). Объем зоны 1, согласно выполненным расчетам, составил 47 м³. Если границы зоны 1 мы определили достаточно уверенно, то отнести это к зоне 2 мы не можем из-за отсутствия необходимых данных.

Выделенные зоны, кроме топлива (фрагменты твэлов, таблетки), содержат также и некоторое количество застывших лав, и фрагменты металлоконструкций, а также остатки строительных конструкций. Свободный объем, присутствовавший после окончания процесса формирования зон, заполнен бетоном 1986 г., причем этот объем представляет собой пористую трещиноватую структуру со значительным количеством полостей, позволяющую наполнение этого объема значительным количеством влаги. Такая структура должна была образоваться вследствие того, что значительная часть ТСМ, заключенных в зоне во время заливки бетона в 1986 г., имела температуру, превышающую 100 °С.

Основная масса лав сосредоточена в нижней части массива, причем топливо в этих ЛТСМ имеет значение выгорания выше, чем в верхних слоях массива – для юго-восточной части в среднем 13,5 МВт · сут/кг (урана)². С большой вероятностью можно предположить, что в процесс лавообразования были вовлечены, прежде всего, сборки со сравнительно высоким выгоранием (сборки с низ-

² Среднее выгорание по цезию черных ЛТСМ помещения 210/6.

ким выгоранием выделяют меньше тепла), поэтому топливо с высоким выгоранием покидало очаги лавообразования быстрее, чем топливо с низким выгоранием (таблица).

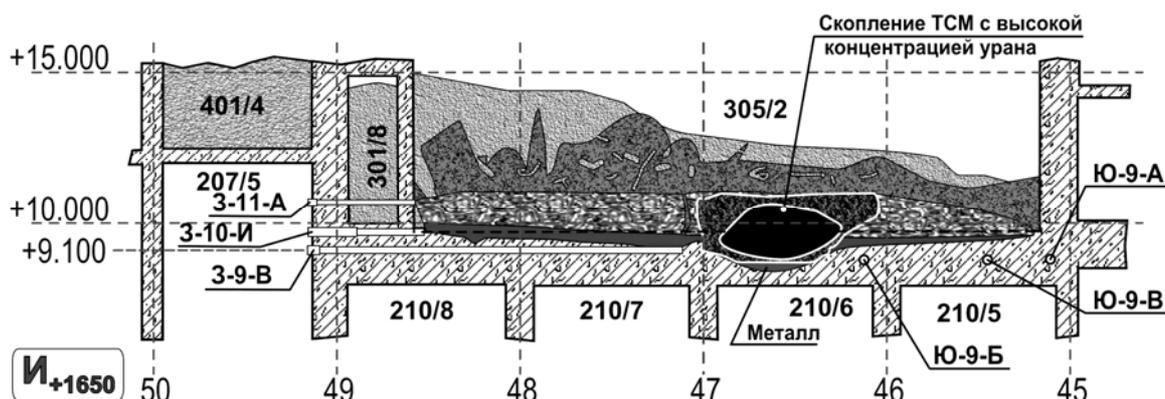


Рис. 4. Фрагмент сечения 4-го блока ЧАЭС по ряду И₊₁₆₅₀.

Таким образом, топливо, находящееся в зоне, должно иметь меньшее выгорание, чем топливо образовавшихся лав [6]. Именно в зоне 1 и находится скопление ТСМ, поведение топлива в котором, возможно, привело к аномальному событию 1990 г. (см. рис. 4). Можно предположить, что значение

Распределение кассет по величине выгорания [27]

Группа	Число кассет	Среднее выгорание, МВт · сут/кг (урана)
1	721	13,7
2	392	12,3
3	154	10,5
4	101	8,8
5	35	7,0
6	43	5,4
7	41	3,5
8	172	1,2
Всего кассет	1659	Среднее выгорание по восьми группам - 10,9

выгорания топлива в этом скоплении находится в пределах 9 – 11 МВт · сут/кг (урана) (таблица).

Сравнение рис. 1, 2 и 4 дает наглядное пояснение к эволюции наших представлений о характеристиках ядерно-опасного скопления, расположенного в юго-восточном квадранте помещения 305/2.

Следующая задача - это создать модель такого скопления и расположить ее в оконтуренной нами зоне таким образом, чтобы данные, полученные посредством ядерно-физических расчетов, не противоречили результатам проведенных ранее измерений.

Выводы

1. Анализ моделей скопления с высоким содержанием урана, присутствующего в помещении 305/2, представленных в ранее опубликованных работах, показывает, что эти модели не могут быть применимы для подтверждения факта существования аномального события, зарегистрированного в помещении 304/3 в июне 1990 г.

2. Полная и достоверная модель протекания активной стадии аварии на 4-м блоке ЧАЭС не может быть создана, потому что уровень наших знаний о реальных процессах, происходивших во время активной стадии аварии, явно недостаточен для построения такой полной модели.

3. Представленная в настоящей работе версия гипотетического сценария образования зон с высоким содержанием ядерного топлива позволила разработать модель такой зоны и возможность разместить в ней модель ядерно-опасного скопления, применимую для корректного описания аномального события, наблюдавшегося в помещении 305/2 в июне 1990 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Высотский Е.Д., Краснов В.А., Лагуненко А.С., Пазухин Э.М.* Топливо в помещении 305/2 4-го блока ЧАЭС. Критмассовые зоны. Уточнение сценария образования лавообразных топливосодержащих материалов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2007. - Вып. 8. - С. 77 - 86.
2. *Заключение экспертной комиссии о причинах аномального события в помещении 304/3 объекта "Укрытие" в июне 1991 г. / ИБРАЭ РАН. - Москва, 1992. - 67 с.*

3. *Пазухин Э.М.* Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования, влияние на окружающую среду: дис. ... д-ра техн. наук. - Чернобыль, 1999. - 293 с.
4. *Гончар В.В., Жидков А.В.* Динамика высокотемпературного взаимодействия аварийного ядерного топлива с конструкционными материалами РБМК // Проблемы Чернобиля. – 2002. – Вып. 9. – С. 25 - 33.
5. *Жидков О.В.* Електронні процеси в опромінених діелектриках та властивості композицій, що містять ядерне паливо: дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. - Львів, 2007. - 443 с.
6. *Лагуненко А.С.* Поиск и исследование скрытых скоплений топливосодержащих материалов разрушенного 4-го блока Чернобыльской АЭС: дис. ... канд. техн. наук. – К., 2008. - 148 с.
7. *Бабенко В.А., Высотский Е.Д., Ключников А.А. и др.* Моделирование массовых и геометрических параметров скопления топливосодержащих материалов в юго-восточной части помещения 305/2 разрушенного 4-го блока ЧАЭС // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2008. – Вып. 9. - С. 36 - 42.
8. *Арзуманов С.С., Беляев С.Е., Бондаренко Л.Н. и др.* Нейтронные исследования на объекте «Укрытие». Март 1988 г.- август 1990 г. – Москва, 1991. – 50 с. - (Препр. / ИАЭ им. И. В. Курчатова; 5313/3).
9. *Высотский Е.Д., Ключников А.А., Лагуненко А.С. и др.* Ядерно-опасные скопления топливосодержащих материалов в разрушенном четвертом блоке Чернобыльской АЭС // Радиохимия. - 2011.– Т. 53, № 2. – С. 178 – 183.
10. *Скважины объекта "Укрытие".* Обобщенные данные (альбом) // Отчет ОЯРБ МНТЦ "Укрытие". - Инв. № 09/05-66 от 09.06.98 г. - Чернобыль, 1998.- 117 с.
11. *Галахов Ф.Я.* (отв. ред.). Диаграммы состояния систем тугоплавких оксидов: справочник. Вып. 5. Двойные системы. Ч. I. - Ин-т химии силикатов им. И. В. Гребенщикова. - Л.: Наука, 1985. - 284 с.
12. *Торопов Н.А. и др.* Диаграммы состояния силикатных систем: справочник. Вып. 3. Тройные силикатные системы. - Л.: Наука, Ленингр. отд., 1972. – 448 с.
13. *Пазухин Э.М., Лагуненко А.С., Довыдьков С.А.* Новые количественные оценки ядерного топлива в помещении 305/2 объекта «Укрытие» // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2010. - Вып. 14. – С. 85 – 94.
14. *Жидков О.В.* 25 років еволюції уявлень про паливовмісні матеріали об'єкта «Укриття»: сценарії їхнього утворення та фізичні міркування // Проблеми Чернобиля. - 2011. - Вып. 16.- С. 86 - 100.
15. *Высотский Е.Д., Михайлов А.В.* Концептуальная модель «дóменной» версии образования ядерно-опасных скоплений на 4-м блоке ЧАЭС // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2013. - Вып. 21. - С. 99 - 106.
16. *Платонов П.А., Краюшкин А.В.* Процесс разрушения активной зоны реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. – 2008. – Т. 104. – Вып. 6. – С. 319 – 327.
17. *Богатов С.А., Боровой А.А., Лагуненко А.С. и др.* Образование и растекание чернобыльских лав // Радиохимия. – 2008. – Т. 50, № 6. – С. 565 – 568.
18. *Арутюнян Р.В., Большой Л.А., Васильев А.В., Стрижев В.Ф.* Физические модели тяжелых аварий на АЭС / Под ред. Н. Н. Пономарева-Степного. – М.: Наука, 1992. – 232 с.
19. *Бешта С.В.* Высокотемпературные процессы с расплавами кориума в проблеме безопасности АЭС с ВВЭР: дис. ... д-ра техн. наук. - Сосновый Бор, 2004. - 462 с.
20. *Пазухин Э.М.* Горение графита реактора 4-го энергоблока во время активной стадии аварии на Чернобыльской АЭС. Возможный вариант сценария // Радиохимия. - 2008, Т. 50, № 2. - С. 188 – 192.
21. *Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / М. А. Абрамов, В. И. Авдеев, Е. О. Адамов и др.; под общей ред. Ю. М. Черкашова.* - М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. - 631 с.
22. *Блюменталь У.Б.* Химия циркония: пер. с англ.; под ред. Л. Н. Комиссаровой и В. И. Спицына - М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 345 с.
23. *Красноруцкий В.С., Данилов А.П., Яковлев В.К. и др.* Микроструктурный анализ взаимодействия оболочек тепловыделяющих элементов с кремнийсодержащими материалами // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». – 2009. - № 2. - С 69 – 75.
24. *Красноруцкий В.С., Данилов А.П., Яковлев В.К. и др.* Микроструктурный анализ лавоподобных топливосодержащих масс // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». – 2010. - № 1. - С 60 – 67.
25. *Bogatov S., Borovoi A., Gavrillov S., et al.* Half an hour after the beginning of the accident, ОКPRINT - Moscow, 2005. - 22 p.
26. *Богатов С.А., Боровой А.А., Гаврилов С.Л. и др.* База данных по местонахождению и состоянию ядерного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС до и после аварии. Проект № 2916 «Разработка модели поведения ядерного топлива во время активной стадии аварии». – Москва, 2007. - 147 с. - (Препр. / РИЦ «Курчатовский институт»; 130-11/2).
27. *Радиационно-физические характеристики топлива 4-го энергоблока ЧАЭС и оценка их погрешности:* справочник / А. А. Боровой, А. А. Довбенко, В. М. Маркушев и др. / КЭ при ИАЭ им. И. В. Курчатова. - Инв. № 11.07-06/172. - Чернобыль, 1989. - 115 с.

О. С. Лагуненко, В. О. Краснов, С. А. Довыдьков

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

**ПАЛИВО В ПРИМІЩЕННІ 305/2.
МОЖЛИВИЙ СЦЕНАРІЙ ФОРМУВАННЯ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН**

Проведено аналіз існуючих моделей скупчень із високим вмістом урану в приміщенні 305/2 з точки зору їхнього можливого застосування до опису аномальної події, зареєстрованої в приміщенні 304/3 в червні 1990 р. Розглянуто та обговорено низку параметрів, необхідних для адекватного опису процесів, що відбувались при формуванні лавоподібних паливовмісних матеріалів. Представлено версію сценарію формування зон із високою концентрацією ядерного палива. Визначено геометричні параметри зони, що вміщує скупчення паливовмісних матеріалів, поведінка палива в якому, можливо, призвела до аномальної події 1990 р.

Ключові слова: паливовмісні матеріали, ядерно-небезпечні зони, сценарій формування, модель скупчення.

O. S. Lagunenکو, V. O. Krasnov, S. A. Dovydkov

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine

**FUEL IN ROOM 305/2.
PROBABLE FORMATION SCENARIO FOR NUCLEAR-DANGEROUS ZONES**

Analysis of existing models for a cluster with high uranium content in room 305/2 is conducted for their applying to an anomalous accident, that was registered in room 304/3 at June 1990, description. Parameters that necessary for adequate description of fuel-containing materials formation processes are discussed. Version for a scenario of zones with high nuclear fuel concentration formation is represented. Geometrical parameters for fuel-containing materials cluster containing zone that may be the reason for 1990 year anomalous accident are defined.

Keywords: fuel-containing materials, nuclear-dangerous zones, formation scenario, cluster model.

REFERENCES

1. Vysotskiy E.D., Krasnov V.A., Lagunenکو A.S., Pazukhin E.M. Fuel at ChNPP 4-th block room 305/2. Critical-mass zones. Lavalike fuel-containing mass formation scenario precisig // Problems of Nuclear Power Plants safety and of Chornobyl. – 2007. – Iss. 8. – P. 77 – 86. (Rus)
2. Expert commission conclusion about reasons of anomalous event in the object "Shelter" room 304/3 in June 1991 / ISDNE RAS, Moscow, 1992. – 67 p. (Rus)
3. Pazukhin E.M. Lavalike fuel-containing masses of Chernobyl NPP 4th block: topography, physical and chemical properties, formation scenario, influence on an environment: Dissertation for doctor of tech. sciences degree: 21.06.01; protected 25.11.1999; ratified 01.09.2001. - Chornobyl, 1999. - 293 p. (Rus)
4. Gonchar V.V., Zydkov A.V. Dynamics of high temperature cooperation of emergency nuclear fuel with construction materials of RBMK // Chornobyl problems. – 2002. – Iss. 9. – P. 25 – 33. (Rus)
5. Zydkov A.V. Electronic processes in radiation-exposed dielectrics and properties of nuclear fuel containing compositions: Dissertation for doctor of phys.-math. sciences degree. - Lviv, 2007. - 443 p. (Ukr)
6. Lagunenکو A.S. Search and research of hidden fuel-containing material clusters in ruined Chernobyl NPP Unit 4 : Dissertation for candidate of tech. sciences degree: 21.06.01. - Kyiv, 2008. - 148 p. (Rus)
7. Babenko V.A., Vysotskiy E.D., Kliuchnykov A.A. et al. Modelling of mass and geometrical parameters of accumulation of fuel-containing materials at south-east part of ChNPP destroyed 4th block room 305/2 // Problems of Nuclear Power Plants safety and of Chornobyl. – 2008. – Iss. 9. – P. 36 - 42. (Rus)
8. Arzumanov S.S., Belyaev S.E., Bondarenko L.N. et al. Neutron studies at "Shelter" object. March 1988 – August 1990. – Moscow, 1991. – 50 p. - (Prepr. / IAE by I. V. Kurchatov, № 5313/3). (Rus)
9. Vysotskiy E.D., Kliuchnykov A.A., Lagunenکو A.S. et al. Nuclear-dangerous fuel-containing mass clusters at ChNPP destroyed 4th block / Radiochemistry. - 2011.– T. 53, № 2. – P. 178 – 183. (Rus)
10. Object "Shelter" drills. Accumulated data (the album) / Report DNRS ISTC "Ukrytie". - Sam. № 09/05-66 for 09.06.98 y. - Chornobyl, 1998.- 117 p. (Rus)
11. Galakhov F.Y. (resp. red). Refractory oxides systems state diagrams. Reference book. Vol. 5. Double systems. P. I. In-t of silicates chemistry by I. V. Grebenshikov. – Leningrad: Nauka, 1985. – 284 p. (Rus)
12. Toropov N.A. et al. Silicate systems state diagrams. Reference book. Vol. 3. Triple systems. – Leningrad: Nauka, 1972. – 448 p. (Rus)
13. Pazukhin E.M., Lagunenکو A.S., Dovydkov S.A. New quantitative estimates of nuclear fuel in "Ukrytyya" object room 305/2 // Problems of Nuclear Power Plants safety and of Chornobyl. – 2010. – Iss. 14. – P. 85 – 94. (Rus)
14. Zydkov A.V. 25 years for evolution of "Shelter" object fuel-containing materials imagination: Scenarios of their formation and physical reasoning // Problems of Nuclear Power Plants safety and of Chornobyl. - 2011. - Iss. 16. - P. 86 - 100. (Ukr)

15. *Vysotskiy E.D., Michailov A.V.* Conceptual model of "domain" version of formation of ChNPP 4th block' nuclear-dangerous accumulations // Problems of Nuclear Power Plants safety and of Chernobyl. – 2013. - Iss. 21. - P. 99 - 106. (Rus)
16. *Platonov P.A., Krayushkin A.V.* Destruction process of Chernobyl NPP 4th block reactor' active zone // Atomic Energy. – 2008. – Т. 104. – Vol. 6. – P. 319 – 327. (Rus)
17. *Bogatov S.A., Borovoy A.A., Lagunenka A.S. et al.* Chernobyl lavas formation and spreading // Radiokhimiya. – 2008. – Т. 50, № 6. – P. 565 – 568. (Rus)
18. *Arutyunyan R.V., Bolshov A.A., Vasiliev A.V. et al.* Physical models for NPP's severe accidents / N. N. Ponomarev-Stepnoy (red.). – Moskva: Nauka, 1992. – 232 p. (Rus)
19. *Beshka S.V.* Corium meltion-mass high-temperature processes at the safety problem for NPP with VVER: Dissertation for doctor of tech. sciences degree. - Sosnovyi Bor, 2004. - 462 p. (Rus)
20. *Pazukhin E.M.* 4th power unit reactor graphite' burning at the Chernobyl NPP accident active stage. Possible scenario variant // Radiokhimiya. - 2008, Т. 50, № 2, P. 188 – 192. (Rus)
21. *RBMK nuclear power channel reactor / Cherkashov Yu.M. (red.)*. - Moskva: GUP NIKIET, 2006. – 631 p. (Rus)
22. *Blumenthal Warren B.* The chemical behavior of zirconium: New Jersey: Van Nostrand, 1958. – 398 p. (Russian edition: Moskva: Izdatelistvo inostrannoy literatuty, 1963. – 345 p.)
23. *Krasnorutzkiy V.S., Danilov A.P., Yakovlev V.K. et al.* The microstructure analysis for interaction of heat-emitting elements with silicon-containing materials // Problems of atomic science and technique. Series: Radiation damages' physics and radiation material-researching. - 2009. - № 2. – P. 69 – 75. (Rus)
24. *Krasnorutzkiy V.S., Danilov A.P., Yakovlev V.K. et al.* The microstructure analysis for lavalike fuel-containing masses // Problems of atomic science and technique. Series: Radiation damages' physics and radiation material-researching. - 2010. - № 1. – P. 60 – 67. (Rus)
25. *Bogatov S., Borovoi A., Gavrilov S. et al.* Half an hour after the beginning of the accident, OKPRINT, Moscow, 2005. - 22 p.
26. *Bogatov S.A., Borovoi A.A., Gavrilov S.L. et al.* The database for CHNPP 4th power unit' nuclear fuel location and state before and after an accident. Project № 2916 «Development of behavior model for nuclear fuel during the accident active stage». - Moskva, 2007. - 147 p. - (Prepr. / RSC «Kurchatov' Institut»; № 130-11/2). (Rus)
27. *Radiation-physical descriptions for ChNPP 4th power unit' fuel and of their deflection estimation: Reference Book / A. A. Borovoy, A. A. Dovbenko, V. M. Markushev et al. / KE from IAE by Kurchatov.* - Sam. № 11.07-06/172. - Chernobyl, 1989. - 115 p. (Rus)

Надійшла 18.11.2014
Received 18.11.2014