

**НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕРНО ОПАСНЫХ СКОПЛЕНИЙ
ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ****Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, В. Н. Щербин, В. Б. Шостак***Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль*

Приводятся результаты расчета нейтронно-физических характеристик критических сборок (топливо - замедлитель – отражатель), геометрия которых вписывается в реальные границы зоны проплавления фундаментной плиты шахты реактора в юго-восточной части подреакторного помещения 305/2. Анализируется динамика развития и самогашения нейтронной аномалии, зарегистрированной в июне 1990 г. Показано, что аномалия была вызвана критическим инцидентом, разгон и самогашение которого произошли в результате залива водой скопления топливосодержащих материалов (ТСМ), скрытого в зоне проплавления. Рассматривается версия «доменного» процесса образования скопления, при котором в результате взаимодействия расплава топлива с бетоном фундаментной плиты и «шихтой» из фрагментов активной зоны легкий оксидный слой ($U < 5$ % мас.) образует горизонтальный поток черных лавообразных ТСМ (ЛТСМ), а тяжелый нижний слой ($U > 50$ % мас.) остается в зоне проплавления и при наличии воды представляет ядерную опасность.

Ключевые слова: топливосодержащие материалы, критическая сборка, нейтронная аномалия, реактивность, критичность.

Введение

В конце июня 1990 г. детекторами системы «Финиш» была зарегистрирована мощная нейтронная аномалия. Плотность потока нейтронов (ППН) в помещении 304/3, примыкающем к юго-восточной части подреакторного помещения 305/2 (место образования и истока лавовых потоков), в течение нескольких суток возросла в десятки раз и составила в максимуме более чем 10^4 нейтрон/(см²·с) [1]. Причины, способные вызвать аномалию, были рассмотрены специальной комиссией. Все предложенные гипотезы, основанные на затоплении водой детектора, изменения химического состава и геометрии ТСМ, увеличение массовой доли топлива в помещении 304/3, оказались несостоятельны [2]. Только критический инцидент в помещении 305/2 мог объяснить такое возрастание ППН [3].

В настоящее время в юго-восточной части помещения 305/2 локализованы скопления ТСМ с концентрацией топлива более 40 %. Скопления находятся в зонах проплавления фундаментной плиты (ФП) шахты реактора и скрыты под слоем «свежего бетона». Южная зона проплавления примыкает к пролому в стене помещения 304/3, северная зона уходит под бетонную тумбу опоры бака биологической защиты. В северной зоне наличие воды не установлено. Скопления в южной зоне постоянно находятся в воде, уровень которой удерживается на отметке 9,1 м. Из южной зоны через скважины периодически с 1990 г. наблюдается сток подогретой воды. Время и объемы стока коррелируют с интенсивностью атмосферных осадков и периодом появления на блоке конденсационной влаги [4].

Нейтронная аномалия была зарегистрирована в период (19 июня – 3 июля 1990 г.) заполнения водой зон проплавления в ФП. К этому времени температура на периферии скоплений снизилась до 70 - 80 °С, а за вторую неделю июня выпала полуторамесячная норма осадков. Поступление воды в ФП было отмечено уже в апреле - мае, когда были залиты водой и отказали нейтронные детекторы, расположенные в западных скважинах ФП на отметке 9,1 м [5].

Характерным для водно-урановых систем с низкообогащенным топливом является наличие узкого диапазона оптимального увлажнения, при котором система надкритична между первым и вторым значением критичности. Поэтому с большой вероятностью можно предположить, что «сухое» скопление при заполнении водой достигло первого значения критичности и удерживалось в процессе поступления воды в околкритическом состоянии в течение как минимум 6 сут (27 июня – 2 июля 1990 г.). Самогашение произошло в результате переувлажнения и перехода скопления в подкритику за вторым значением критичности.

Механизмы удержания околокритического состояния были связаны как с процессами заполнения водой горячей, пористой структуры скопления, так и с отрицательными температурными коэффициентами реактивности.

Ниже приводятся результаты расчетного моделирования и определения параметров критических сборок (топливо – замедлитель – отражатель), геометрия которых вписывается в реальные объемы южной зоны проплавления ФП шахты реактора.

Нейтронно-физические характеристики модели скопления

Оценка нейтронно-физических характеристик скопления была проведена на основании результатов расчетного моделирования критических сборок, вписывающихся в реальные границы зоны проплавления. Расчеты эффективного коэффициента размножения ($K_{эф}$) проводились на программном комплексе MCNP-4A. При расчетах критичности учитывались процессы взаимодействия нейтронов с ТСМ, а также термализация нейтронов в воде.

В пределах ограничений, определяемых реальными условиями существования скопления, варьировались следующие параметры сборки:

1) геометрия задавалась в виде плоского цилиндра, усеченного эллипсоида и части сферы, высота которых ограничивалась 0,9 м, что соответствовало уровню воды, постоянно присутствовавшей в зоне проплавления; радиус задавался в пределах 2 - 3 м и определялся границами зоны проплавления;

2) моделировалась как гомогенная, так и гетерогенная структура;

3) пористость среды задавалась в пределах 40 – 60 % общего объема сборки и ограничивала максимально возможное содержание воды в композиции;

4) элементный состав в расчетах был представлен бинарными ($UO_2 + SiO_2$) и многокомпонентными композициями, соответствующими составу черных ЛТСМ;

5) обогащение по ^{235}U (1,1 – 1,4) % бралось с учетом наработки плутония, что соответствовало выгоранию 10,5 - 12,5 Мвт·сут/кг урана.

В пределах заданных ограничений на параметры фактически все версии критических сборок достигали критического состояния при заливе водой в вариациях концентрации топлива в ТСМ в диапазоне от 40 до 60 % мас.

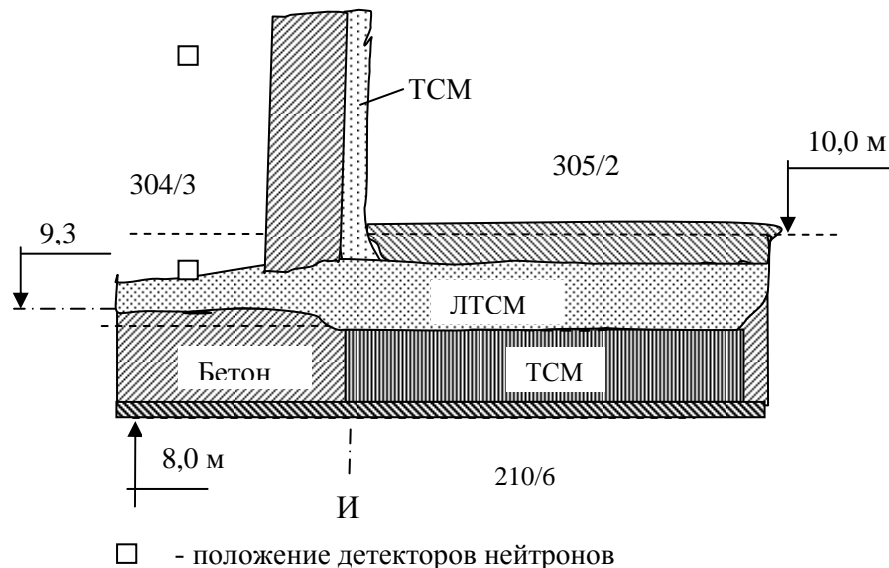


Рис 1. Размещение критической сборки в фундаментной плите.

На рис. 1 показана схема размещения варианта критической сборки, моделирующей скопления в юго-восточной части помещения 305/2. Сборка в геометрии плоского цилиндра имеет нижний и боковой бетонные отражатели, верхний отражатель представлен слоем

ЛТСМ, закрытым сверху слоем свежего бетона. Сборка частично уходит под бетонную тумбу дополнительной опоры бака биологической защиты - схема «Л», а с юга, под разделительную стену с помещением 304/3. В объеме плоского цилиндра размещается ТСМ и вода.

В табл. 1 приведены геометрические и массовые параметры версий критическихборок с гомогенной и гетерогенной структурами многокомпонентной композиции ТСМ. Валовой химический состав смеси (кремний, кальций, натрий, алюминий, магний, цирконий, железо, хром) соответствует черным ЛТСМ, образующих горизонтальный поток [7]. Содержание урана в процентном отношении к массе определялось из условия достижения критичности при увлажнении. Остаточное обогащение по ^{235}U бралось с учетом наработки ^{239}Pu , что соответствовало среднему выгоранию 12,5 Мвт-сут/кг урана.

Таблица 1. Массовые и геометрические параметры критическихборок

Структура	Объем цилиндра, м ³	Объем ТСМ, м ³	Объем UO ₂ , м ³	ТСМ, т	UO ₂ , т	U, т	²³⁵ U, кг	Вода, т (макс.)
Гомоген	17,7	7,07	2,10	33,6	22,9	20,2	231,8	10,6
Гетероген	17,7	8,5	2,01	35,8	21,1	18,6	213,4	8,2

На рис. 2 приведена зависимость реактивности (δK в единицах $\beta = 0,0065$) борок от объемного содержания воды в районе оптимального увлажнения. Расчеты реактивности проводились для размножающей среды при комнатной температуре (20 °С). При повышении температуры среды запас реактивности и объема воды в диапазоне оптимального увлажнения сокращаются из-за действия отрицательных температурных коэффициентов Доплера ($K_d \sim 2 \cdot 10^{-3} \beta/^\circ\text{C}$) и теплового уширения ($K_t \sim 3 \cdot 10^{-2} \beta/^\circ\text{C}$).

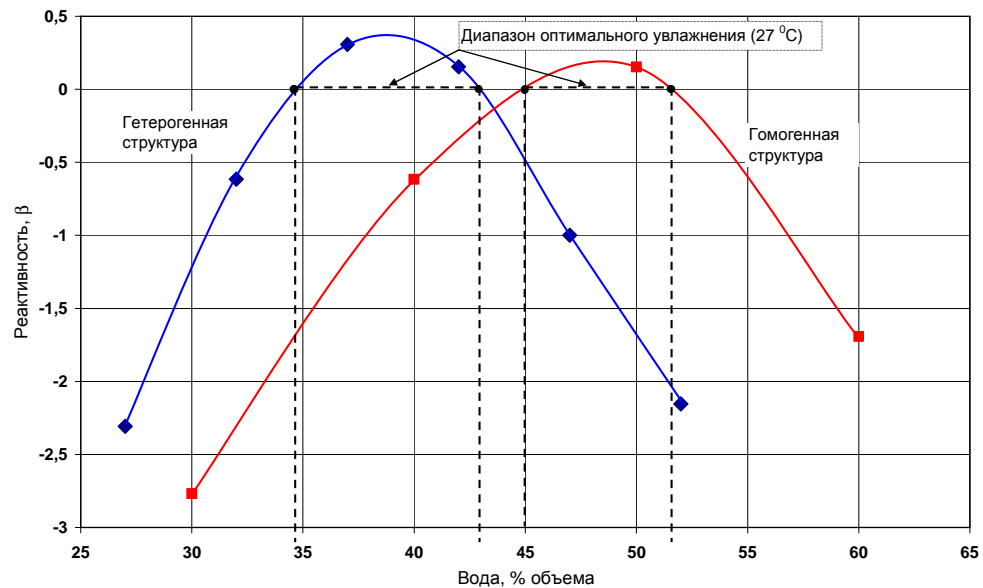


Рис. 2. Реактивность критическихборок (цилиндр R = 2,5м, H = 0,9 м) в районе оптимального увлажнения при 27 °С.

В табл. 2 приведены значения изменения $K_{эф}$ в зависимости от объемного содержания воды в сборке.

Сухая сборка глубоко подкритична с $K_{эф} < 0,5$. При поступлении воды вносится положительная реактивность, $K_{эф}$ растет, сборка достигает первого значения критичности и остается надкритичной в диапазоне оптимального увлажнения до второго значения критичности. При дальнейшем поступлении воды сборка становится подкритичной и уровень подкритичности ограничивается объемом воды, который может принять сборка за вторым

скопление холодная вода сдерживает подъем температуры в объеме скопления и гасит локальную температуру топлива в ядре скопления. Отсюда следует, что характер динамики развития СЦР и уровень достигаемых параметров надкритичности (ППН, число делений, температура) определяются соотношением этих конкурирующих процессов.

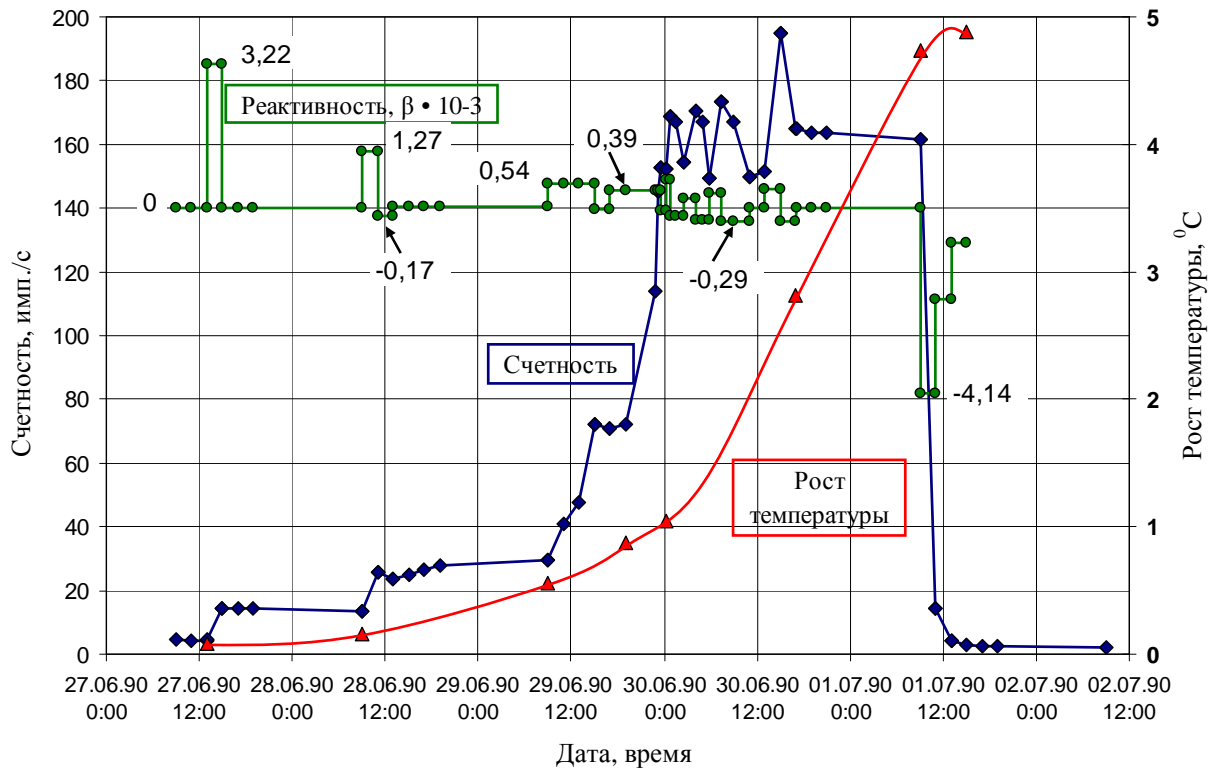


Рис. 3. Динамика счетности ДН, вводимой реактивности и роста температуры топлива при критическом инциденте.

Текущее значение реактивности скопления определяется суммой вкладов реактивностей от изменения количества воды и роста температуры топлива и скопления в целом

$$\delta \cdot K_{\Sigma} = \delta \cdot K_{(H_2O)} - K_{д \cdot \Delta T_1} \text{ } ^\circ\text{C} - K_{т \cdot \Delta T_2} \text{ } ^\circ\text{C},$$

где T_1 $^\circ\text{C}$ – температура топлива, а T_2 $^\circ\text{C}$ – температура скопления.

Скорость нарастания или падения мощности зависит от знака и величины результирующего значения $\delta \cdot K_{\Sigma}$ на каждом этапе развития инцидента.

На рис. 3 приведены в шкале времени характеристики этапов разгона, удержания на мощности и самогашения критического инцидента. Величина $\delta \cdot K_{\Sigma}$ вводимой реактивности определяется по значению производной по времени на кривой счетности ДН на каждом из этапов спада и нарастания мощности. Параметры, определяющие рост температуры, оценивались для критических сборок моделирующих скопление (см. табл.1).

На этапах разгона, на каждом скачке мощности скопление выходило в надкритическое состояние с положительной реактивностью, величина которой зависела от текущей температуры топлива. В момент парообразования по фронту смачивания положительная реактивность сбрасывалась в результате выталкивания воды. После каждого сброса длительность удержания мощности определялась конкурирующими процессами: вводом положительной реактивности при возвращении фронта смачивания и вводом отрицательной реактивности (в основном Доплер-эффектом) при росте температуры топлива.

По мере поступления воды и роста температуры запас положительной реактивности уменьшается, а диапазон (надкритичности) оптимального увлажнения суживается. На рис. 3 величина реактивности, вводимая на скачках мощности, падает, а интервалы ее удержания

увеличиваются. Разгон прекратился, когда количество воды в скоплении превысило объемы оптимального увлажнения и при продвижении фронта смачивания стала вводиться отрицательная реактивность. Теперь процесс выталкивания воды при парообразовании по фронту смачивания приводил к возврату скопления в надкритическое состояние, а поступление воды возвращало скопление в подкритику.

Этап удержания мощности и рост температуры скопления продолжался 35 ч и прекратился, когда переувлажнение и отрицательные температурные коэффициенты реактивности перестали компенсироваться очередным сбросом воды при парообразовании.

В табл. 3 приведены параметры надкритичности, интерпретированные для критических сборов, моделирующих скопление. Расчетная величина ослабления ППН в двухметровом слое черных ЛТСМ, разделяющих ДН и источник, составила $2 \cdot 10^4$. Максимальная величина ППН 10^4 нейтрон/(см²·с) оценивалась по счетности ДН при условии деформации спектра нейтронов к тепловому [1]. Поэтому величина ППН $5 \cdot 10^7$ нейтрон/(см²·с) была принята как средняя на этапе удержания максимальной мощности при инциденте.

Таблица 3. Параметры критического инцидента

Параметр	Гомогенная структура	Гетерогенная структура	Примечание
Плотность потока нейтронов ϕ , нейтрон/(см ² ·с)	$5,6 \cdot 10^7$	$5,6 \cdot 10^7$	при максимальной счетности ДН
Интенсивность делений на этапе удержания, дел/с	$3,81 \cdot 10^{13}$	$3,48 \cdot 10^{13}$	на этапе удержания мощности
Суммарное число делений	$5,17 \cdot 10^{18}$	$4,7 \cdot 10^{18}$	92 ч
Энерговыведение, МДж	172	157	
Вводимая температура разогрева топлива (UO ₂), Δ°С	5,05	4,88	без учета теплосъема
Вводимая температура разогрева скопления (ТСМ + H ₂ O), Δ°С	2,11	2,06	без учета теплосъема
Собственный фон, нейтрон/с	$1,65 \cdot 10^8$	$1,52 \cdot 10^8$	
Умножение нейтронов	$> 10^5$	$> 10^5$	
Вводимая положительная реактивность, $10^{-3}\beta$	0,39 ÷ 3,22	0,39 ÷ 3,22	при разгоне
Вводимая отрицательная реактивность, $10^{-3}\beta$	0,17 ÷ 4,14	0,17 ÷ 4,14	при самогашении
Диапазон оптимального увлажнения, % объема воды	0,12	0,16	полный объем воды 10 м ³
Средняя температура скопления, °С	70 - 80	70 - 80	во время инцидента
Запас реактивности скопления, β	$> 1,5$	$> 1,5$	при 20 °С

Температура залитого водой скопления к началу инцидента составляла 70 - 80 °С и поддерживалась остаточным тепловыделением (ОТВ). В настоящее время температура скопления снизилась до 30 - 40 °С и продолжает падать, следуя за падением ОТВ. При переувлажнении этот фактор работает в сторону увеличения подкритичности и конкурирует с Доплер-эффектом. При оцениваемой за счет переувлажнении подкритичности менее 2 β только сокращение объемов воды в скоплении и рост температуры может привести к критическому инциденту, механизмы развития которого будут уже другими, но всегда с медленной кинетикой.

Процесс образования и структура скопления

В результате разрушения технологических каналов (ТК), расплавления и диспергирования топлива в юго-восточной четверти активной зоны (АЗ) возникший квазистатический импульс давления (до 20 МПа) был достаточным для разгерметизации реакторного пространства (РП). Этот импульс давления опустил основание реактора (схему "ОР") на

3,85 м и выбросил схему "Е". Процесс имел характер мощного динамического импульса, но не взрывной природы [6]. Во время движения "ОР" вниз расплав топлива, образовавшийся еще в штатном положении АЗ, был сброшен в открытое пространство к юго-восточной части стены помещения 305/2 и в зазор между "ОР" и тумбой опоры бака биологической защиты (схема "Л").

При детонации паро-водородной смеси юго-восточный квадрант помещения 305/2 был засыпан фрагментами АЗ. В результате образовалась «доменная печь» с доступом атмосферного воздуха и полной загрузкой шихты: «агломерата» (циркония, диоксида циркония, диоксида урана, металла); «кокса» (графитовые блоки, кольца, заглушки); «шлаковых флюсов» (серпентинита, засыпки межкомпенсаторного и монтажного зазоров). Все компоненты шихты имели высокую начальную температуру разогрева и снизу подогревались от расплава топлива, который начал проплавливать бетон фундаментной плиты.

Процесс формирования ЛТСМ происходил в объеме загрузки шихты через прямое восстановление металла и транспортные газофазные реакции [6]. По мере потери массы компоненты шихты постепенно оседали, а «шлак» уходил через пролом в стене между помещениями 305/2 и 304/3 и образовал горизонтальный поток черных ЛТСМ (рис. 4). В зоне проплавления остались топливо и металл. При этом по мере прогорания шихты в зоне проплавления увеличивается концентрация топлива за счет оседания фрагментов топливных каналов из шихты. Увеличение выброса продуктов деления начавшееся на шестые сутки аварии, может быть связано с уменьшением и исчезновением слоя шихты в юго-восточной части помещения 305/2.

Процесс прекратился, когда шихта, прикрывающая зону проплавления полностью осела и необходимая температура от тепло-химических процессов и ОТВ не могла поддерживаться.

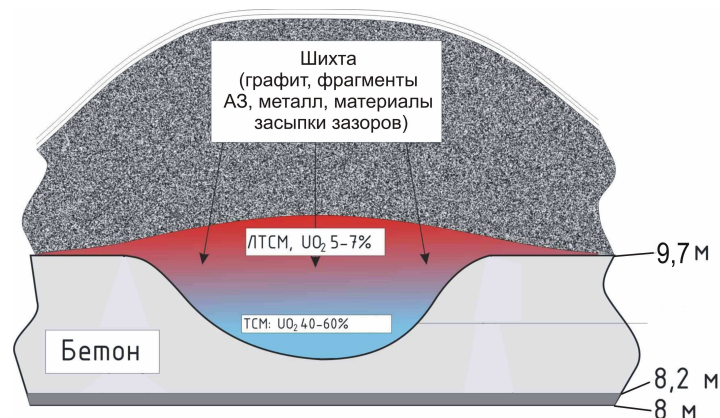


Рис. 4. Структура зоны проплавления («доменной печи»).

На рис. 5 приведена предполагаемая трехслойная структура скопления, образовавшаяся в ФП в процессе охлаждения. Расслоение расплава в процессе взаимодействия топлива с бетоном подтверждается результатами экспериментов, которые проводятся в рамках международного проекта CORPHAD.2. Верхний слой до отметки 9,7 м представляет собой черные ЛТСМ с концентрацией урана от 3 до 4 % . Нижний слой состоит из металла с повышенным содержанием рутения. Промежуточный слой, с содержанием урана более 50 % мас., образует скопление, состав и структура которого неизвестны в связи с отсутствием доступа непосредственно к ТСМ.

Показательно, что только в районе южной зоны проплавления шихта полностью отсутствует, свежий бетон здесь имеет ровную поверхность (рис. 6). По краям зоны проплавления видны компоненты шихты – графитовые блоки, фрагменты ТК и нижних водяных коммуникаций (НВК). В остальной части юго-восточного квадранта помещения 305/2 свежий бетон прикрывает остатки шихты и имеет неровную поверхность.

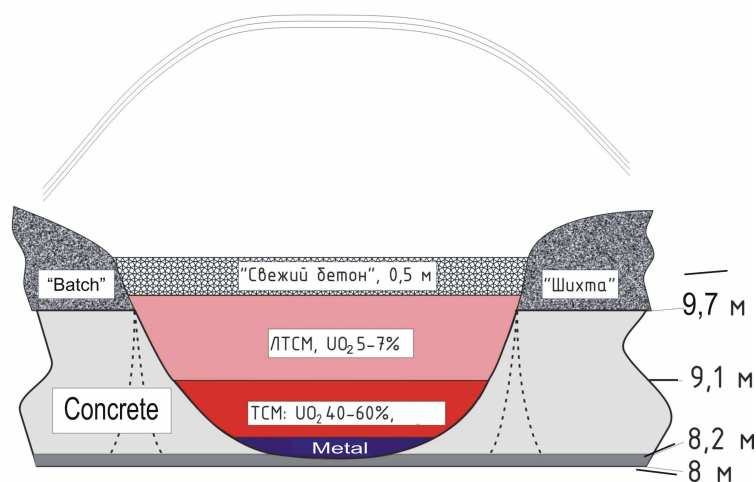


Рис. 5. Предполагаемая трехслойная структура скопления.



Рис. 6. Южная зона проплавления ФП (помещение 305/2).

В настоящее время зона проплавления заполнена водой, уровень которой удерживается на отметке 9,1 м. Из зоны периодически наблюдается сток подогретой воды.

Выводы

1. Геометрия южной зоны проплавления ФП позволяет разместить в ней критическую сборку (ТСМ – замедлитель - отражатель), в который многокомпонентная композиция ТСМ (до 40 т) содержит топливо с выгоранием 12,5 МВт/(сут·кг) от 50 до 60 % мас. и имеет пористость от 50 % объема. При увлажнении сборка становится надкритичной ($K_{эф} > 1$) в диапазоне оптимального увлажнения между первым и вторым состоянием критичности, при переувлажнении достижимый уровень подкритичности ($K_{эф} < 1$) ограничивается пористостью ТСМ.

2. Нейтронная аномалия июня 1990 г. была вызвана критическим инцидентом, который развился в процессе поступления воды в скопление ТСМ, скрытое в зоне проплавления ФП шахты реактора. Самогашение СЦР произошло в результате переувлажнения. Основным фактором, тормозящим скорость ввода реактивности от поступления воды в горячее (больше 100 °С) ядро скопления, было локальное парообразование по фронту смачивания и вследствие этого частичное выталкивание воды. Скачкообразное повышение мощности определило эффективность действия отрицательных температурных коэффициентов реактивности.

Число делений за время инцидента, оцененное для предлагаемых моделей критических сборок, составило более 10^{18} .

3. В настоящее время скопление залито водой и его температура снижается вместе со снижением ОТВ. Подкритичность скопления из-за переувлажнения, предположительно, находится за пределами регламентных аварийных значений $K_{эф} > 0,98$, что определяет скопление как ядерно-опасное, так как рост температуры и сокращение объемов воды (неуправляемые процессы) могут привести к СЦР.

4. Образование в ФП скоплений ТСМ с концентрацией топлива более 50 % массы топлива удовлетворительно объясняется «доменным» процессом взаимодействия расплава топлива с бетоном ФП и «шихтой» из фрагментов активной зоны. В результате этого процесса горизонтальный поток черных ЛТСМ вобрал в себя часть топлива из «шихты» (содержание урана $< 5\%$), а большая часть осела в зоне проплавления и образовала кориум (содержание урана $> 50\%$), структура и состав которого в настоящее время не могут быть исследованы в связи с отсутствием доступа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Работы по контролю нейтронно-физических параметров топливосодержащей массы в пом. 304/3 объекта «Укрытие», выполненные в июне 1990 г.: (Отчет) / КЭ при ИАЭ им. И. В. Курчатова.* - Арх. № 1511. – Чернобыль, 1990.
2. *Заключение экспертной комиссии о причинах аномального события в пом. 304/3 объекта «Укрытие» в июле 1990 г. / ИБРАЭ РАН.* - М, 1992. – 67 с.
3. *Фролов В.В.* Аномальный инцидент 27 - 30 июня 1990 г. в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС // *Атомная энергия.* – 1996. - Т. 80. - Вып. 3.
4. *Высотский Е.Д., Ключников А.А., Краснов В.А.* Локализация ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов // *Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля.* – 2007. – Вип. 7. - С. 66 - 75.
5. *Арзуманов С.С., Беляев С.П., Бондаренко Л.Н. и др.* Исследовательская система нейтронного контроля ядерно-физического состояния топливосодержащих масс 4-го блока ЧАЭС. – Москва, 1992. - (Препр. / ИАЭ им И. В. Курчатова; № 5452/3).
6. *Рудя К.Г.* Исследование процессов развития аварии и образования топливосодержащих материалов на 4 блоке Чернобыльской АЭС: Дис. ... канд. техн. наук. - К. Чернобыльский центр ядерной безопасности, 2003.
7. *Боровой А.А., Богатов С.А., Пазухин Э.М.* Лавообразные топливосодержащие массы объекта «Укрытие». – Киев, 1993. - (Препр. / НАН Украины. Ин-т кибернетики им. В. Н. Глушкова; № 93/17).

НЕЙТРОННО-ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ СКУПЧЕНЬ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Є. Д. Висотський, О. О. Ключников, В. М. Щербин, В. Б. Шостак

Наводяться результати розрахунку нейтронно-фізичних характеристик критичних збірок (паливо - сповільнювач - відбивач), геометрія яких вписується в реальні межі зони проплавлення фундаментної плити шахти реактора в південно-східній частині підреакторного приміщення 305/2. Аналізується динаміка розвитку й самогасіння нейтронної аномалії, зареєстрованої в червні 1990 р. Показано, що аномалія була викликана критичним інцидентом, розгін і самогасіння якого відбулися в результаті надходження води в скупчення паливовмісних матеріалів (ПВМ), приховане в зоні проплавлення. Розглядається версія «доменного» процесу утворення скупчення, при якому в результаті взаємодії розплаву палива з бетоном фундаментної плити і «шихтою» з фрагментів активної зони, легкий оксидний шар ($U < 5\%$ мас.) утворює горизонтальний потік чорних лавоподібних ПВМ, а важкий нижній шар (уран $> 50\%$ мас.) залишається в зоні проплавлення і за наявності води представляє ядерну небезпеку.

Ключові слова: паливовмісні матеріали, критична збірка, нейтронна аномалія, реактивність, критичність.

**NEUTRON-PHYSICAL CHARACTERISTICS OF NUCLEAR DANGEROUS ACCUMULATIONS
OF FUEL CONTAINED MATERIALS**

E. D. Vysotskiy, O. O. Klyuchnykov, V. M. Scherbin, V. B. Shostak

Results of calculation of neutron-physical characteristics of a critical assembling (a fuel - a moderator - a reflector), geometry of which is inscribed into the real scopes of fusion penetration area of fundamental flag of the reactor shaft in south-east part of subreactor apartment 305/2 are given. The dynamics of development and self-quenching of neutron anomaly, which was registered in June, 1990 is analysed. It is shown that the anomaly was caused by a critical incident, acceleration and self-quenching of which were a result of water feeding to accumulation of fuel contained materials, hidden in a fusion penetration area. The version of «blast-furnace» process of formation of such accumulation is examined, at which as a result of interaction of fuel flux with the concrete of bed plate and «furnace charge» from the fragments of an active zone, an easy oxide layer ($U < 5\%$ mas.) forms the horizontal stream of black lavalike fuel contained materials, and a heavy lower stratum ($U > 50\%$ mas.) remains in the fusion penetration area and in case of water presence presents is nuclear dangerous.

Keywords: fuel contained materials, critical assembling, neutron anomaly, reactivity, criticality.

Поступила в редакцию 27.08.09