

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИН ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ЯДЕРНООПАСНОЕ СКОПЛЕНИЕ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ В ОБЪЕКТЕ «УКРЫТИЕ»

Представлены результаты расчетов нейтронно-физических характеристик модели пространственного расположения объемов, заполненных бетоном, металлом и топливосодержащими материалами (ТСМ) с низким и высоким содержанием топлива в зоне проплавления фундаментной плиты шахты реактора в юго-восточной части подреакторного помещения 305/2 объекта «Укрытие» и в областях, непосредственно примыкающих к зоне проплавления, массовые и геометрические параметры которых отвечают реальным условиям существования скрытого скопления. Анализируется возможность описания динамики развития и самогашения нейтронной аномалии, зарегистрированной в 1990 г., в зависимости от возможных величин параметров смеси ТСМ с высоким содержанием топлива.

Ключевые слова: топливосодержащие материалы, нейтронная аномалия, критичность.

Исходя из заключения [1], что зарегистрированное детекторами системы «Финиш» аномальное возрастание (более чем в 60 раз), удержание и спад плотности потока нейтронов в объекте «Укрытие» в конце июня 1990 г. могло быть идентифицировано только как «холодный критический инцидент» [2], в работах [3, 4] развита и представлена его модель.

В рамках этой модели предполагается, что «сухое» пористой структуры скопление топливосодержащих материалов (ТСМ) в зоне проплавления подреакторной плиты (ПП) при заполнении горячей водой (около 100 °С) достигло первого значения критичности, когда эффективный коэффициент размножения ($K_{эф}$) равнялся единице. Оно удерживалось в процессе заполнения водой в околокритическом состоянии механизмами, связанными с отрицательными температурными коэффициентами реактивности и процессом парообразования по фронту смачивания при поступлении воды в объем горячего скопления (~100 °С). Самогашение произошло в результате переувлажнения, приведшее к возрастанию роли реакции $n(np)d$, и перехода в подкритику ($K_{эф} < 1$) за вторым значением критичности [5]. Предполагается также, что в зоне проплавления постоянно находится вода, уровень которой поддерживается за счет пополнения атмосферными осадками и конденсатом, и которая в настоящее время является стабилизирующим фактором подкритичности.

Предложение такой модели развития критического инцидента основано на том, что в настоящее время в результате многолетних реализаций динамики измерения нейтронных [6] и температурных полей [7] конфигурации скважин [8], а также данных визуальных наблюдений в юго-восточном квадранте подреакторного помещения 305/2 объекта «Укрытие» в зоне проплавления ПП локализовано скрытое скопление ТСМ с большой (предположительно > 40 %) массовой долей топлива [9], так называемая критмассовая зона (КМЗ). Там же показано, что такая высокая концентрация топлива в ТСМ, в данном случае, удовлетворительно объясняется «доменным» процессом взаимодействия расплава топлива с бетоном ПП и «шихтой» из фрагментов активной зоны. Определены реалистичные диапазоны возможных значений пространственных параметров КМЗ и непосредственно примыкающих к ней объемов, заполненных известными материалами, в условиях отсутствия к ним доступа.

Если протекание критического инцидента происходило в соответствии с предложенной моделью, то, как следует из самой сути модели, изменение режима поступления или циркуляции воды в объекте «Укрытие» может привести к возвратной самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР).

Весомым аргументом в пользу представленной модели могут быть результаты расчетов, которые показывают наличие двух значений критичности в процессе заполнения водой объема КМЗ. При этом исходные значения ее пространственных и массовых параметров должны находиться в реалистичных диапазонах их возможных значений.

В данном случае также важно определить границы многомерного объема, образованного величинами пространственных и массовых параметров КМЗ, внутри которого обеспечивается наличие двух значений критичности в процессе заполнения водой объема КМЗ. Сопоставление этих границ с объемом, образованным границами реалистичности этих параметров позволит в дальнейшем оценить вероятность реализации сценария процессов, описанных в данной модели.

Со времени самопроизвольно возникшей в 1990 г. нейтронной аномалии не произошло ничего, что могло бы изменить величины тех ядерно-физических параметров (далее – параметров) которые оказывают существенное влияние на формирование $K_{эф}$ в районе рассматриваемого КМЗ. Поэтому остается актуальным вопрос о возможности нового самопроизвольного возникновения нейтронной аномалии.

Настоящая работа посвящена поискам ответов на вопросы, поставленные в трех предыдущих абзацах с помощью расчетов, которые проводились на программном комплексе решения задач переноса нейтронов методом Монте-Карло в трехмерных материальных системах MNCP-4A в рамках вышеуказанной модели.

Параметры размножающей и окружающих сред

В условиях, когда, в рамках модели, практически все параметры объема ТСМ с высоким содержанием топлива используются при отсутствии к ним доступа, всегда требуется более детально и обоснованно определить их связь с аналогичными наблюдаемыми величинами.

Состав размножающей и окружающих сред

За основу смеси, использованной в модели, был принят химический состав черных лавообразных ТСМ (ЛТСМ), образовавших большой горизонтальный поток из района скопления через помещение 304/3. Средний состав химических элементов в угольно-черной керамике и ее плотность ($2,4 \text{ г/см}^3$) взяты из работы [10]. При этом предполагалось, что основная доля топлива в ТСМ образована микровключениями, а отношение массовых долей компонентов в смеси с высоким содержанием топлива (исключая само топливо) сохраняется независимо от массовой доли топлива. Состав смеси при содержании урана 4,7 % представляет усредненные результаты анализа проб, взятых из помещения 304/3. Сумма парциальных объемов химических компонентов составляет 80 % от всего объема. Оставшаяся часть объема может приходиться на микро- и макропористость в пробах.

Таким образом, парциальная плотность ТСМ определяется из соотношения

$$\frac{80}{\rho_{ТСМ}} = \frac{M_{UO_2}}{\rho_{UO_2}} + \frac{(100 - M_{UO_2})}{\rho_{(ТСМ - UO_2)}}, \quad (1)$$

где M_{UO_2} - массовая доля топлива в смеси, %; $\rho_{ТСМ}$ - плотность смеси при отсутствии микропор, г/см^3 ; ρ_{UO_2} - плотность UO_2 ($10,5 \text{ г/см}^3$); $\rho_{(ТСМ - UO_2)}$ - плотность части смеси, где отсутствует UO_2 , г/см^3 .

Наличие в смесях нейтронных поглотителей, таких как гадолиний и бор, не учитывалось. Они являются «выгорающими поглотителями», т.е. количество поглощающих нейтроны изотопов бора и гадолиния уменьшается в среде с ненулевой плотностью потока нейтронов. Также и бор, и гадолиний хорошо растворяются в воде и могут «вымываться» из пористых ЛТСМ. Кроме того, их измеряемое содержание незначительно.

Для тяжелого бетона, окружающего объема, заполненные ТСМ, принят химический состав бетона с гранитным наполнителем, применявшемся при строительстве АЭС в СССР, плотностью $2,4 \text{ г/см}^3$ [11].

Компонент	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	CO ₂	MgO	H ₂ O
Мас. %	69,1	10,8	0,15	0,006	2,7	8,8	0,05	1,7	1,2	0,7	1,9

Нижняя часть объема, содержащего ТСМ с высоким содержанием топлива, заполнена металлом, элементарный состав которого был рассчитан на основе оценки типов и объемов конструкционных сталей, вовлеченных в процесс лавообразования [11].

Элемент	титан	углерод	железо	хром	никель	молибден
Мас. %	0,5	0,08	82,92	12,25	4	0,25

Содержание изотопа ²³⁵U

Предложенный в работе [12] сценарий образования КМЗ позволяет допустить, что при формировании этих зон происходила не только сепарация концентрации топлива. С большой вероятностью можно допустить, что в процесс лавообразования были вовлечены, прежде всего, сборки с отно-

сительно высоким выгоранием (сборки с низким выгоранием выделяют меньше тепла), и топливо с высоким выгоранием покидало места лабообразования быстрее, чем топливо с низким выгоранием. В этом случае образцы (из помещения 305/2) с большим содержанием урана, в среднем, должны иметь более низкое выгорание.

Результаты анализа проб, отобранных из помещения 305/2, подтверждают эту гипотезу [11]. Они аппроксимированы в предположении прямой пропорциональности между величинами выгорания (x), МВт·сут/кг (U) и процентного массового содержания урана в ТСМ ($m_U^{\%}$). Результаты аппроксимации отражает выражение [11]

$$x = 0,0674 m_U^{\%} + 12,684. \quad (2)$$

С другой стороны, в ряде работ в получены величины процентного содержания изотопов ^{235}U ($m_{235}^{\%}$) в топливе черной керамики, которое составляет 4,7 % от массы ТСМ, при различных величинах его выгорания. Зависимость между этими величинами следующая:

Выгорание топлива, МВт·сут/кг (U)	0	1,2	11	12,5
Содержание ^{235}U в топливе, %				
(черная керамика, $U = 4,7$ % массы ТСМ)	2 [13]	1,88 [13]	1,01 [13]	0,89 [14]

Эти данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью

$$m_{235}^{\%} = 0,0888x + 1,9932. \quad (3)$$

С учетом выражений (2) и (3) получаем вероятную зависимость содержания изотопа ^{235}U в топливе ТСМ от содержания урана в ТСМ:

$$m_{235}^{\%} = 0,006 \cdot m_U^{\%} + 0,8669. \quad (4)$$

Как показали результаты анализа, примерно 300 проб черной и коричневой керамики имеют практически одинаковое выгорание, а именно: коричневая керамика - ($12,6 \pm 0,4$), черная - ($12,5 \pm 0,5$) МВт·сут/кг (U) [10, 15]. Содержание ^{239}Pu в топливе ТСМ бралось равным 0,25 % массы урана.

Пространственные параметры

В модели предполагается, что скопление ТСМ в прожоге ПП образовалось в результате высокотемпературного взаимодействия расплавов топлива с бетоном фундаментной плиты, фрагментов активной зоны и силикатными материалами засыпки межкомпенсаторного и монтажного зазоров. Как отмечалось [12], растворение топлива в лаве происходит до концентрации, определяемой условиями термодинамического равновесия совокупности материалов, находящихся в данной области. Так, например, при температуре 1500 °С в системе $\text{UO}_2\text{-SiO}_2\text{-ZrO}_2$ концентрация UO_2 не может превысить значения ~ 15 %.

Таким образом, создались предпосылки для образования глубоких полостей в массиве ПП, заполненных ТСМ с высоким содержанием топлива. В дальнейшем это и было подтверждено результатами измерений нейтронных [6] и температурных полей [7], а также конфигурации скважин.

В процессе решения задач с использованием метода Монте-Карло в трехмерных материальных системах пространственное моделирование осуществлялось с учетом всей области, непосредственно примыкающей в КМЗ. Используемая при этом модель [3, 4] пространственного расположения объемов, заполненных бетоном, металлом и ТСМ с низким и высоким содержанием топлива в области КМЗ и областях, непосредственно примыкающих к ней в радиусе ~ 8 м в горизонтальной плоскости и более 2 м вверх и вниз, которые учитывались в процессе переноса нейтронов, представлена в двух проекциях на рис. 1 и 2.

Расчетное моделирование формы и размеров объема, заполненного ТСМ с высоким содержанием топлива, выполнено таким образом, чтобы его геометрия вписывалась в реальные объемы южной зоны проплавления фундаментной плиты шахта реактора.

По результатам анализа совокупности данных по скважинам, измерений нейтронных и температурных полей и визуальных наблюдений было определено [7 - 9], что скопление ТСМ с большой массовой долей топлива может быть представлено в модели в виде плоского цилиндра с радиусом менее 3 м, который размещается в нижней части бетона фундаментной плиты (ФП) в юго-восточной

части помещения 305/2. Или он может иметь форму усеченного шара или усеченного эллипсоида, имеющих тот же объем.

Высота объема с большой массовой долей топлива выбрана по уровню воды, которая удерживается на отметке +9.100 (уровне проходок скважин 3-9-Е, 3-9-Ж и 3-9-К).

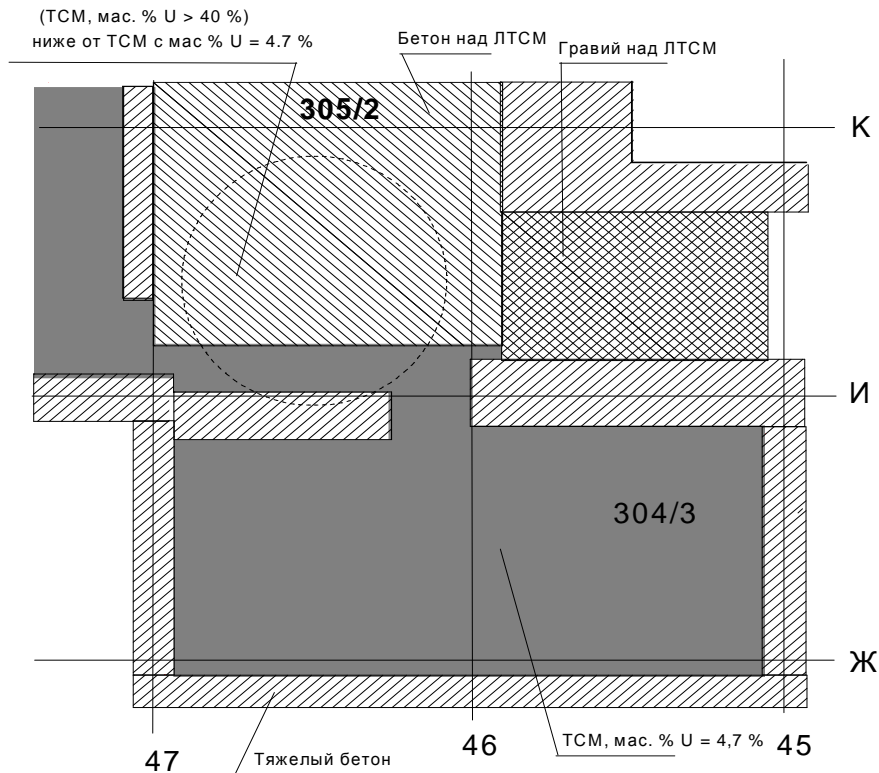


Рис. 1. Горизонтальное сечение по отметке +10.500.

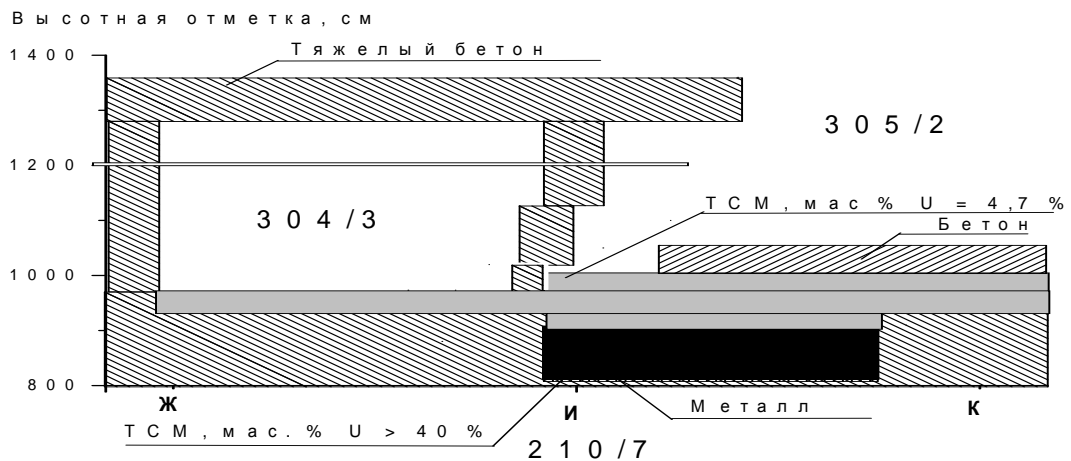


Рис. 2. Вертикальное сечение по оси 46+600.

В данной работе в процессе расчетов используется геометрия цилиндра, она выбрана для упрощения процедуры расчета, при том что возможные скорости разрушения бетона при продвижении лавы в радиальном и аксиальном направлениях оценить не представляется возможным.

Глубина проплавления ФП была определена до уровня плитного настила верхнего перекрытия, т.е. слоя тяжелого бетона, который мог задержать продвижение фронта взаимодействия расплава топлива с бетоном в аксиальном направлении. В то же время стальная обшивка потолка парораспределительного коридора имеет признаки значительной тепловой деформации и незначительные натеки ЛТСМ, что позволяет предположить наличие сквозного проплавления ФП в районе этой КМЗ. Таким

образом, в пределах ограничений, задаваемых фактическими условиями существования скопления (ТСМ с критической массой топлива), наиболее определенной величиной является его высота ~90 см.

Параметры гетерогенности ТСМ с высоким содержанием топлива

Нейтронно-физические характеристики скопления ТСМ определяются микро- и макропористостью среды. Как показывают расчеты, ТСМ, не имеющие макропор, не достигают критичности ни при каком наборе реалистичных параметров скопления, рассматриваемого в настоящей работе. Микропористость образовалась в результате насыщения вакансиями объема среды из-за температурных напряжений, неравных встречных диффузионных потоков и радиационных дефектов с последующей их коагуляцией и коалесценцией [16]. Характеристики доступной микропористости определяют влагоемкость и скорость насыщения водой.

Экспериментальные исследования доступной микропористости образца черных ЛТСМ, который не имел видимых макроскопических полостей и сквозных трещин, продемонстрировали наличие от 3 до 4 % доступной пористости от объема образца [17]. Микропоры обеспечивают сквозное просачивание воды в ЛТСМ и заполнение более крупных пустот. Существующая в ЛТСМ система пор образует бесконечный кластер, который обеспечивает хорошую проницаемость для воды. Макроскопические поры являются следствием коагуляции и коалесценции газовых пузырей, в изобилии образовавшихся в процессе формирования лавы. Размер газовых пустот в ЛТСМ оценивался значениями от нескольких микрометров до нескольких сантиметров в диаметре [17].

Поэтому скопление ТСМ с большой массовой долей топлива в модели было представлено в виде регулярной пространственной решетки с ячейками кубической формы. В этой решетке ячейки, взаимно расположенные в шахматном порядке, заполнены гомогенной смесью силикатного раствора топлива с доступной для воды микропористостью (до 4 % от объема). Оставшиеся ячейки пространственной решетки, также фактически взаимно расположенные в шахматном порядке, одновременно и равномерно заполнялись водой. Объемная доля воды в пустых ячейках варьировалась от нуля до полного заполнения жидкостью всей пористости.

Модельные параметры, обеспечивающие две критичности

В рамках описанных выше моделей, выполнены многовариантные расчеты величины $K_{эф}$ при различных наборах значений следующих модельных параметров:

- массовой доли урана в ТСМ;
- процентного содержания изотопов ^{235}U ;
- радиуса цилиндра (R) (максимального сечения усеченного шара, максимального сечения усеченного эллипсоида), содержащего скопление ТСМ с большой массовой долей топлива;
- доли пустот в ТСМ, доступных для заполнения водой;
- величины грани кубической ячейки (ГКЯ) (гетероген);
- температуры ТСМ.

Если используемая массовая доля ^{235}U вычислялась из выражения (4), то в пределах заданных ограничений на варьируемые параметры, с ростом величины $m_U^{\%}$, фактически все версии форм скоплений ТСМ в КМЗ достигают критического состояния при заливе водой, когда концентрация топлива в ТСМ становится чуть более 48 % ($m_{235}^{\%} = 1,15 \%$) массы ТСМ. Как показано в работе [18], с ростом содержания воды в ТСМ $K_{эф}$ может увеличиваться до тех пор, пока увеличение коэффициента поглощения среды не превысит улучшения замедляющих свойств. Таким образом, могут возникнуть два значения критичности.

С ростом величины $m_U^{\%}$ два значения критичности появляются при вариации каждого из модельных параметров, а разница между этими значениями быстро увеличивается (диапазон оптимального увлажнения). В результате также быстро образуется многомерный объем в пространстве этих параметров, внутри которого выполнены условия, необходимые для реализации сценария процессов, описанных в предложенной модели.

Для иллюстрации вышеизложенного ниже приведен пример многопараметрических расчетов при одном из значений $m_U^{\%}$, когда скопление ТСМ с большой массовой долей топлива в модели было представлено в виде цилиндра с $R = 250$ см. Так, на рис. 3 представлены результаты расчетов зависимостей величины $K_{эф}$ от величины объема ТСМ, заполненного водой при температурах 27, 40 и 80 °С

и $m_U^{\%} = 52 \%$. Все расчеты в работе выполнялись с учетом эффекта Доплера и зависимости плотности воды от температуры.

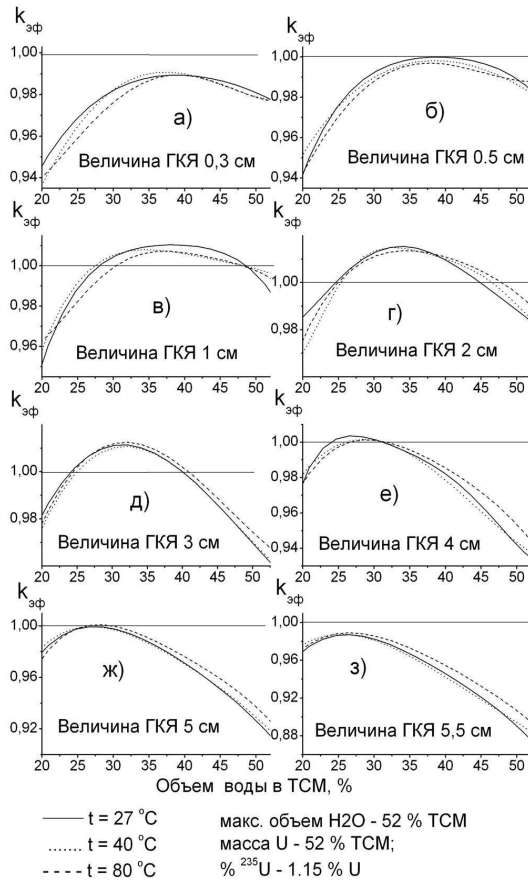


Рис. 3. Зависимости $K_{эф}$ от объема воды в ТСМ, %.

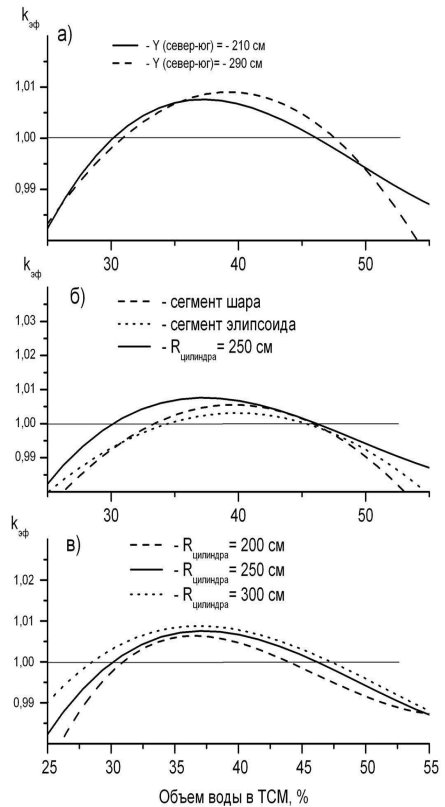


Рис. 4. Зависимости $K_{эф}$ от объема воды в ТСМ, %.

Результаты, которые представлены на рис. 3, иллюстрируют степень влияния величин параметров гетерогенности смеси ТСМ с высоким содержанием топлива на реализуемость указанной выше модели. В настоящее время в этих ТСМ недоступны для измерения ни спектр размеров макропузырей (макропор), ни их суммарный объем, ни степени их наполняемости водой.

Температура залитого водой скопления к началу инцидента составляла от 70 до 80 °C и поддерживалась остаточным тепловыделением (ОТВ). В настоящее время температура скопления снизилась до интервала от 30 до 40 °C и продолжает падать, следуя за падением ОТВ.

Сухая сборка глубоко подкритична [19] (в данной модели всегда $K_{эф} < 0,5$). При увлажнении сборка становится надкритичной в диапазоне оптимального увлажнения между первым и вторым значениями критичности. Подкритичность ($K_{эф} < 1$) переувлажненной сборки зависит от объема воды, принятой сборкой за вторым значением критичности. Максимальная подкритичность определяется доступной для воды частью полного объема сборки.

На рис. 4 приведены сравнения между собой зависимостей $K_{эф}$ от объемного содержания воды в объеме, заполненном ТСМ с высоким содержанием топлива в районе оптимального увлажнения, для случаев небольших изменений геометрических параметров этого объема. Эти расчеты выполнены для оценки на устойчивость получаемых результатов:

к величине радиуса цилиндра, заполненного ТСМ с высоким содержанием топлива (см. рис. 4, а);

к форме объема заполненного ТСМ с высоким содержанием топлива (см. рис. 4, б);

к положению на оси (Y) север-юг центра объема, заполненного ТСМ с высоким содержанием топлива (см. рис. 4, в).

Видно, что наблюдается качественное и количественное подобие кривых при изменении положения оси цилиндра относительно системы координат строительных осей в пределах 1 м и при из-

менении радиуса цилиндра в диапазоне 200 – 300 см. То же наблюдается и при замене цилиндра на усеченный шар или усеченный эллипсоид, имеющих тот же объем.

Анализ результатов расчетов

Из рис. 3 видно, что используемый набор параметров обеспечивает наличие двух значений критичности в широком диапазоне величин ГКЯ (0,5 – 4,0 см) в процессе заполнения водой всех существующих в ТСМ пустот при $m_U^{\%} = 52 \%$. В этом случае процесс деградации структуры ТСМ как в сторону уменьшения размеров макропор, так и в сторону их увеличения не может привести к опасному уменьшению уровня подкритичности, если осуществлено полное заполнение водой всех существующих в ТСМ пустот.

На рис. 5 - 8 представлены результаты расчетов зависимостей величины $K_{эф}$ от величины ГКЯ решетки для объемов ТСМ с высоким содержанием топлива, имеющих различные геометрические и массовые параметры при двух степенях заполнения водой этого объема ТСМ. Сплошные кривые соответствуют заполнению объема водой, при котором достигаются наибольшие значения запаса реактивности критической массы топлива (величины максимумов кривых на рис. 3). Штриховые кривые соответствуют полному заполнению всех пустот этого объема (величины крайних правых точек кривых на рис. 3). Параметры, использовавшиеся в процессе расчетов, представлены на соответствующих рисунках.

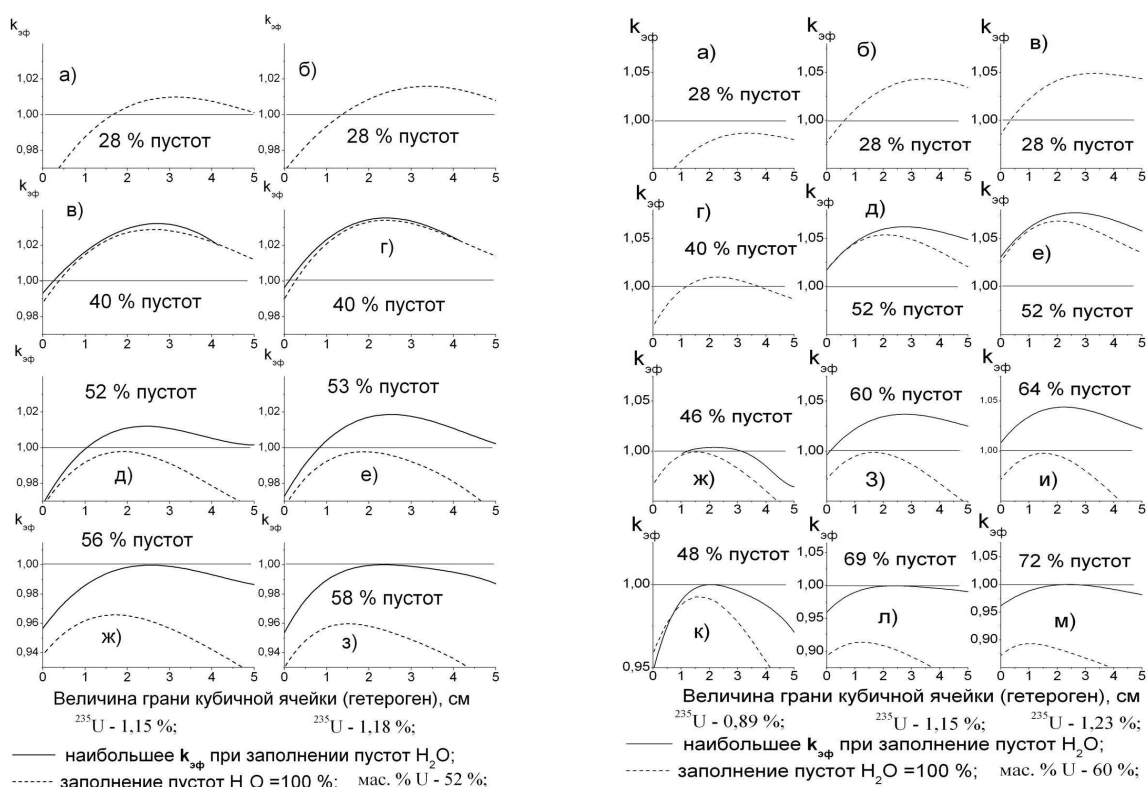


Рис. 5. Зависимости $K_{эф}$ от величин ГКЯ; $m_U^{\%} = 52 \%$. Рис. 6. Зависимости $K_{эф}$ от величин ГКЯ; $m_U^{\%} = 60 \%$.

На рис. 5 – 8 представлены результаты расчетов зависимостей величины $K_{эф}$ от величины ГКЯ решетки для объемов ТСМ с высоким содержанием топлива, имеющих различные геометрические и массовые параметры при двух степенях заполнения водой этого объема ТСМ. Сплошные кривые соответствуют заполнению объема водой, при котором достигаются наибольшие значения запаса реактивности критической массы топлива (величины максимумов кривых на рис. 3). Штриховые кривые соответствуют полному заполнению всех пустот этого объема (величины крайних правых точек кривых на рис. 3). Параметры, использовавшиеся в процессе расчетов, представлены на соответствующих рисунках.

Расчеты выполнены и представлены для трех значений $m_{235}^{\%}$: 0,89 %, 1,15 % и из формулы (4). Для каждой из этих трех величин получены результаты при различных значениях долей пустот в ТСМ, доступных для заполнения водой. Графики, соответствующие определенной величине $m_{235}^{\%}$, расположены на рисунках один над другим.

Исходя из консервативных соображений, во всех расчетах, результаты которых представлены рис. 5 – 8, использовалась величина $R_{\text{цилиндра}} = 200$ см.

В случае необходимости увеличения влагонасыщенности ТСМ в процессе расчетов некоторые ячейки решетки освобождались от силикатного раствора таким образом, чтобы сохранить измененную среднюю плотность постоянной в пределах цилиндра, содержащего ТСМ (далее - средняя плотность ТСМ) с высокой концентрацией топлива.

Как показывают результаты расчетов, приведенные на рис. 5 – 8, непрерывное увеличение или уменьшение средней плотности ТСМ в основном приводит соответственно к непрерывному подъему или опусканию обеих кривых - и сплошной, и пунктирной.

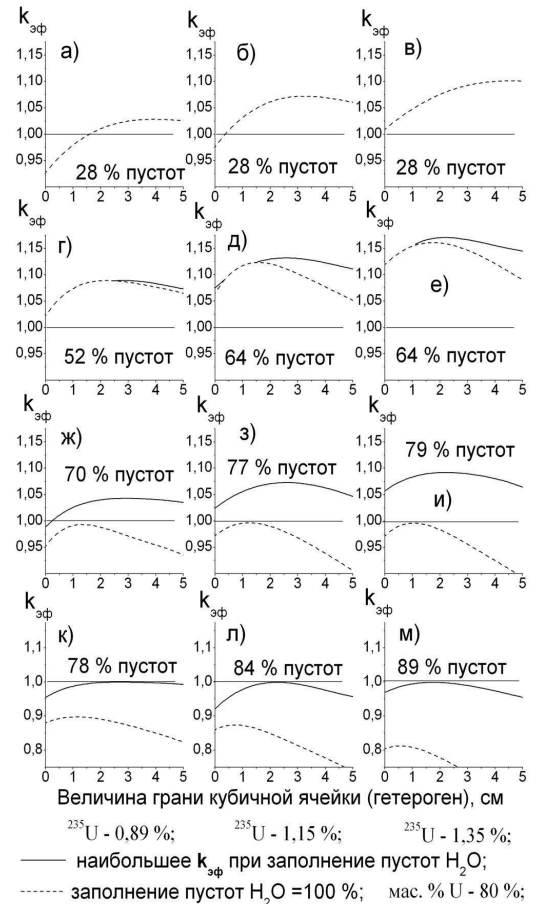
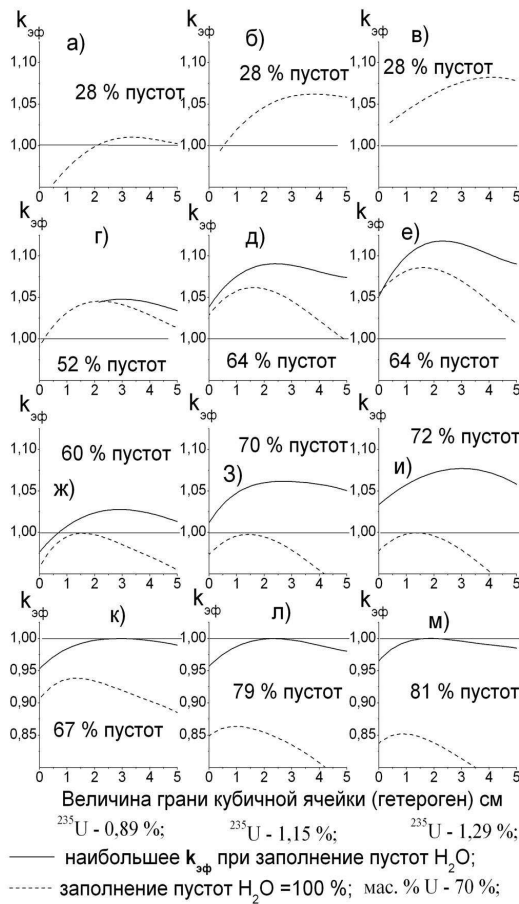


Рис. 7. Зависимости $K_{эф}$ от величин ГКЯ; $m_U^{\%} = 70$ %. Рис. 8. Зависимости $K_{эф}$ от величин ГКЯ; $m_U^{\%} = 80$ %.

Представленные на рис. 5 (д, е), 6 (ж, з, и), 7 (ж, з, и) и 8 (ж, з, и) результаты расчетов или полностью, или в достаточной мере согласуются с рассматриваемой моделью. Т.е. сплошная кривая в основном или полностью расположена выше $K_{эф} = 1$, пунктирная - полностью ниже. Это получено путем плавного изменения средней плотности ТСМ. Можно, изменяя среднюю плотность ТСМ в определенном диапазоне, опустить часть сплошной кривой до уровня $K_{эф} = 1$ или несколько ниже, или поднять штриховую частично выше этого уровня и при этом во всем диапазоне изменений будет наблюдаться согласие с рассматриваемой моделью. Допустимая степень пересечения кривыми уровня $K_{эф} = 1$ определяется существующей формой спектра распределения размеров ячеек, заполняемых водой, которая неизвестна в данный момент.

Если штриховая кривая частично выше уровня $K_{эф} = 1$, то в зависимости от реальной пористости смеси ТСМ процесс деградации структуры, как в сторону уменьшения макропор, так и в сторону

их увеличения, может привести к опасному уменьшению уровня подкритичности. Это будет справедливо для всех случаев, когда часть штриховой кривой располагается при $K_{эф} > 1$.

Данные на всех остальных рисунках полностью не согласуются с рассматриваемой моделью. Таким образом, полностью определены границы объема в многомерном пространстве физических параметров, внутри которого рассматриваемая модель согласуется с тем, как протекала нейтронная аномалия 1990 г.

Из рис. 5 (д, е), 6 (ж, з, и), 7 (ж, з, и) и 8 (ж, з, и) видно, что для каждого определенного набора значений параметров мерой величины этого объема есть разность расстояний между сплошной и штриховой кривыми. Видно, что эта разность уменьшается при уменьшении величин $m_U^%$ и $m_{235}^%$. При $m_{235}^% = 0,89$ % она почти отсутствует, если $m_U^% = 60$ % и полностью отсутствует, если $m_U^% = 52$ %. При $m_U^% = 49$ % и менее разность практически исчезает полностью. В частности видно, что величины процентного содержания пустот в объеме ТСМ на рис. 5 (д, е), 6 (ж, з, и), 7 (ж, з, и) и 8 (ж, з, и), с одной стороны, и на рис. 5 (д, е), 6 (ж, з, и), 7 (ж, з, и) и 8 (ж, з, и), с другой, определяют границы этого объема на шкале средней плотности ТСМ. Величины этих границ представлены в таблице.

Диапазоны величин параметров, внутри которых обеспечивается наличие двух значений критичности в процессе заполнения водой всех существующих пустот в цилиндре, содержащем скопление ТСМ с большой массовой долей топлива

(радиус цилиндра 200 см, высота цилиндра 90 см, температура 40 °С)

Массовая доля урана в ТСМ, %	52	60	70	80
<u>Диапазоны пустот в объеме ТСМ, %</u>				
<u>Диапазон плотностей ТСМ, г/см²:</u>				
<u>при содержании ²³⁵U = 0,89 %</u>	–	$\frac{46}{2,5} \div \frac{48}{2,4}$	$\frac{60,4}{2,1} \div \frac{67,8}{1,7}$	$\frac{70}{1,8} \div \frac{77,7}{1,3}$
<u>при содержании ²³⁵U = 1,15 %</u>	$\frac{52}{2,0} \div \frac{56,3}{1,8}$	$\frac{60}{1,9} \div \frac{69,4}{1,4}$	$\frac{70}{1,6} \div \frac{79,1}{1,1}$	$\frac{77,1}{1,4} \div \frac{84,3}{0,9}$
<u>при содержании ²³⁵U = 1,18 %</u>	$\frac{52,9}{2,0} \div \frac{58}{1,8}$			
<u>при содержании ²³⁵U = 1,23 %</u>		$\frac{64}{1,7} \div \frac{72,8}{1,3}$		
<u>при содержании ²³⁵U = 1,29 %</u>			$\frac{72,5}{1,4} \div \frac{80,9}{1,0}$	
<u>при содержании ²³⁵U = 1,35 %</u>				$\frac{79,3}{1,2} \div \frac{88,6}{0,7}$
<u>Диапазоны величины ГКЯ:</u>				
<u>при содержании ²³⁵U = 0,89 %, см</u>	–	1 - 3	0,5 ÷ более 5	0,2 ÷ более 5
<u>при содержании ²³⁵U ≥ 1,15 %, см</u>	1 ÷ 5	0 ÷ более 5	0 ÷ более 5	0 ÷ более 5

В таблице приведены максимальные величины диапазонов пустот и плотностей в объеме ТСМ. Реальная их величина может быть существенно меньше. Это уменьшение определяется существующей формой спектра распределения размеров ячеек, заполняемых водой, которая неизвестна в данный момент.

Как видно из представленных результатов, изменение величин $m_U^%$ и $m_{235}^%$ также приводит к непрерывному подъему или опусканию кривых. Предварительные оценки показали, что изменение в определенном диапазоне величины всех остальных значимых параметров приводит к аналогичному результату. Отсюда следует, что если величины каких-либо параметров, использованных в проведенных расчетах и анализе, в действительности имеют несколько иные значения, то это будет лишь означать, что предсказания модели реализовались при других несколько отличных величинах средней плотности ТСМ или $m_U^%$ и $m_{235}^%$.

Расчетные кривые для различных возможных температур вблизи первого и второго значений критичности на рис. 3 имеют малое различие между собой, а в рамках этого различия при более высокой температуре кривые расположены, как правило, ниже вблизи второго значения критичности. Все это говорит о невысокой вероятности самопроизвольного возникновения СЦР по мере остывания всего объема КМЗ. Однако если подкритичность уменьшится до опасного уровня из-за сокращения

объемов воды в скоплении или из-за деградации структуры макропор ТСМ, то начинающийся при этом рост температур будет способствовать нарастанию реактивности и возникновению более тяжелого ядерного инцидента.

Выводы

1. Показано, что существует вероятность реализуемости используемой в работе модели, которая описывает динамику развития и самогашения нейтронной аномалии, зарегистрированной в 1990 г. в рамках описанной модели пространственного расположения объемов, заполненных бетоном, металлом и ТСМ с низким и высоким содержанием топлива в зоне проплавления ФП шахты реактора в юго-восточной части подреакторного помещения 305/2 и в областях, непосредственно примыкающих к зоне проплавления, массовые и геометрические параметры которых отвечают реальным условиям существования скрытого скопления.

2. Определены границы объема в многомерном пространстве физических параметров, внутри которого рассматриваемая модель согласуется с тем, как протекала нейтронная аномалия 1990 г.

3. Показано, что в рамках представленных моделей обезвоживание и деградация размножающей среды, а в некоторых случаях и изменения температуры скопления ТСМ, могут привести к возвратной критичности и возникновению СЦР с достаточно быстрой кинетикой. Полученные результаты позволяют прогнозировать процессы и события, которые приведут к такому результату.

4. Полученные результаты позволяют определять численные значения полей нейтронов и гамма-квантов, источником которых является скопление ТСМ с высоким содержанием топлива с помощью расчетов. Решение обратной задачи позволит сузить рассчитанные диапазоны величин параметров, используя численные значения измерений этих полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заключение* экспертной комиссии о причинах аномального события в пом. 304/3 объекта «Укрытие» в июле 1990 г. / ИБРАЭ РАН. – М., 1992. – 67 с.
2. *Фролов В.В.* Аномальный инцидент 27 - 30 июня 1990 г. в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. – 1996. - Т. 80, вып. 3.
3. *Высотский Е.Д., Ключников А.А., Щербин В.Н., Шостак В.Б.* Нейтронно-физические характеристики ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2009. - Вип. 12. – С. 93 – 102.
4. *Высотский Е.Д., Ключников А.А., Лагуненко А.С. и др.* Ядерно-опасные скопления топливосодержащих материалов в разрушенном четвертом блоке Чернобыльской АЭС // Радохимия. – 2011. – Т. 53, № 2. – С. 178 – 183.
5. *Верцімаха О.Я., Павлович В.М., Щербін В.М.* Про можливісті виникнення та розвитку самопідтримуючої ланцюгової реакції в ПММ 4-го блока ЧАЕС // Сб. доп. наук.-практ. конф. «Наука. Чернобыль-97» - К., 1998. – С. 163 - 167.
6. *Высотский Е.Д., Довыдьков А.И., Довыдьков В.А. и др.* Анализ путей доступа к топливосодержащим материалам в помещении 305/2. объекта "Укрытие". Часть 1. Исследовательские скважины в помещении 305/2 - Чернобыль, 2011. – 28 с. - (Препр. / НАН Украины. ИПБ АЭС; 11-1).
7. *Высотский Е.Д., Михайлов А. В.* Температурные аномалии в зонах критмассового риска // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2011. - Вип. 16. – С. 101 – 109.
8. *Высотский Е.Д., Довыдьков А.И., Довыдьков В.А. и др.* Анализ путей доступа к топливосодержащим материалам в помещении 305/2 объекта "Укрытие". Часть 1. Исследовательские скважины в подреакторной плите - Чернобыль, 2011. – 36 с. - (Препр. / НАН Украины. ИПБ АЭС; 11-2).
9. *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.
10. *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.
11. *Лагуненко А.С.* Поиск и исследование скрытых скоплений топливосодержащих материалов разрушенного 4-го блока Чернобыльской АЭС: дис. ... канд. техн. наук / ИПБ АЭС НАН України. - К., 2008. – 148 с.
12. *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 і Чернобиля. - 2007. – Вип.8. – С. 77—85.
13. *Ананич П.И., Герасько В.Н., Гульник С.И. и др.* Расчетно-экспериментальные исследования некоторых характеристик нейтронных полей в местах скопления лавообразных топливосодержащих материалов в подреакторном помещении 304/3 объекта "Укрытие" - Чернобыль, 1998. – 11 с. - (Препр. / НАН Украины. МНТЦ "Укрытие"; 98-3).

14. *Ананич П.И., Герасько В.Н., Гульник С.И. и др.* Расчетные исследования по обоснованию ядерной безопасности при работе системы пылеподавления в помещениях объекта "Укрытие". - Чернобыль, 1997. - 23 с. - (Препр. / НАН Украины. МНТЦ "Укрытие"; 97-3).
15. *Анализ текущей безопасности объекта "Укрытие" и прогнозные оценки развития ситуации:* (Отчет о НИР) / МНТЦ "Укрытие" НАН Украины. - Арх. № 3836. – Чернобыль, 2001.
16. *Гончар В.В., Двоглазов А.М. Жидков А.В. и др.* Исследование некоторых физических характеристик ЛТСМ объекта "Укрытие" // Объект "Укрытие" – 10 лет. Основные результаты научных исследований. - Чернобыль, 1996. - С. 173 - 182.
17. *Жидков А. В.* Топливосодержащие материалы объекта "Укрытие" сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния // Проблемы Чернобиля. - 2001. - Вып. 7. - С. 23 – 40.
18. *Бабенко В.А., Верцимаха О.Я., Енковский Л.Л. и др.* Исследование размножающих свойств топливосодержащих масс 4-го блока ЧАЭС – Киев, 1997. - 30 с. - (Препр. / НАН Украины. Ин-т ядерных исследований; КИЯИ-97-1).
19. *Павлович В.Н., Бабенко В.А., Высотский Е. Д. и др.* Модель распределения плотности потока нейтронов в объеме топливосодержащих материалов помещения 305/2 объекта "Укрытие" // Проблемы безопасности атомных электростанций в Чернобиля - 2005. - Вып. 2. - С. 55 - 60.

В. Б. Шостак, В. М. Щербін, Є. Є. Олійник

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИН ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ, ЩО ОПИСУЄ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНЕ СКУПЧЕННЯ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ В ОБ'ЄКТІ «УКРИТТЯ»

Представлено результати розрахунків нейтронно-фізичних характеристик моделі просторового розташування об'ємів, заповнених бетоном, металом і паливовмісними матеріалами (ПВМ) з низьким і високим вмістом палива в зоні проплавлення фундаментної плити шахти реактора в південно-східній частині приміщення 305/2 об'єкта «Укриття» і в областях, що безпосередньо примикають до зони проплавлення, масові і геометричні параметри яких відповідають реальним умовам існування прихованого скупчення. Аналізується можливість опису динаміки розвитку і самопогашування нейтронної аномалії, зареєстрованої в 1990 р., залежно від можливих величин параметрів гетерогенності суміші ПВМ з високим вмістом палива.

Ключові слова: паливовмісні матеріали, нейтронна аномалія, критичність.

V. B. Shostak, V. M. Scherbin, Ye. Ye. Oliynyk

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

DETERMINATION OF SIZES OF PARAMETERS OF MODEL OF DESCRIBING NUCLEAR-DANGEROUS ACCUMULATION OF FUEL CONTAINED MATERIALS IN OBJECT «UKRYTTYA»

Results of calculation of neutron-physical characteristics of model of spatial location of volumes of filled: by a concrete, metal and fuel contained materials with low and high fuel in fusion penetration area of fundamental flag of reactor shaft in south-east part of apartment 305/2 and in the areas of directly joining to the area fusion penetration, the mass and geometrical parameters of which answer the real terms of existence of the hidden accumulation are given. Possibility of description of dynamics of development and independent extinguishing of neutron anomaly, which was registered in 1990 is analyzed, depending on the possible sizes of parameters of heterogeneity of mixture of fuel contained materials with contains a lot of fuel.

Keywords: fuel contained materials, neutron anomaly, criticality.

REFERENCES

1. *Conclusion of expert commission about reasons of anomalous event in pom. 304/3 object «Shelter» in July 1990 / IBRAE RAN.* - Moskva, 1992. – P. 67. (Rus)
2. *Frolov V.V.* the Anomalous incident of June, 27 - 30, 1990 in an object «Shelter» Chernobyl'skoy AES of // Atomnaya energiya. – 1996. - Vol. 80. - Iss. 3. (Rus)
3. *Vysotskiy E.D., Kliuchnykov O.O., Shcherbin V.M., Shostak V.B.* Neutron and physical characteristics of nuclear-dangerous accumulation of fuel containing materials // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl). – 2009. - Iss. 12. – P. 93 – 102. (Ukr)
4. *Vysotskiy E.D., Kliuchnykov A.A., Lagumenko A.S. et. al.* The nuclear-dangerous accumulations of fuel-containing materials in the blasted fourth block of Chernobyl'skoy AES // Radiokhimiya. - 2011. - Vol. 53, № 2. - P. 178 - 183. (Rus)

5. *Vercimakha O.Ya., Pavlovich V.M., Scherbin V.M.* About possibilities of origin and development of supporting chain reaction in PMM of 4th block of ChAES // *Sbirnyk dopovidei naukovopraktichnoi konferentsii «Science. Chornobil-97»*. - Kyiv, 1998 - P. 163 - 167. (Ukr)
6. *Vysotskiy E.D., Dovydkov A.I., Dovydkov S.A. et. al.* Analysis of access paths to fuel-containing materials in room 305/2 object "Shelter". Part 1. Research wells at 305/2. - Chornobyl, 2011. - 28 p. - (Prepr. / NAS of Ukraine. IPB AES; 11-1). (Rus)
7. *Vysotskiy E.D., Mikhaylov O.V.* Temperature anomalies in zones critical mass risk // *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl)*. - 2011. - Iss. 16. - P. 101 - 109. (Ukr)
8. *Vysotskiy E.D., Dovydkov A.I., Dovydkov S.A. et. al.* Analysis of access paths to fuel-containing materials in room 305/2 object "Shelter". Part 1. Research wells at under-reactor plate. - Chornobyl, 2011. - 36 p. - (Prepr./ NAS of Ukraine. IPB AES; 11-2). (Rus)
9. *Vysotskiy E.D., Kliuchnykov O.O., Krasnov V.O.* Localization of nuclear-dangerous accumulations of fuel containing materials // *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl)*. - 2007. - Iss.7. - P. 66 - 75. (Ukr)
10. *Pazukhin E.M.* Lava-like fuel containing mass of the 4 Unit of the Chernobyl NPP: topography, physical and chemical properties, scenario of formation, influence on environment: dis. d-ra tekhn. nauk. - Chornobyl, 1999. - 293 p. (Rus)
11. *Lagunencko O.S.* Search and study of the hidden accumulations of fuel containing materials of the destroyed Chornobyl NPP Unit 4: dis. kand. tekhn. nauk / IPB AES NAS of Ukrainy. - Kyiv, 2008. - 148 p. (Ukr)
12. *Vysotskiy E.D., Krasnov V.O., Lagunencko O.S., Pazukhin E.M.* Fuel in room 305/2 of Chernobyl Nuclear Power Station Unit 4. Zonrs critical mass risk. Clarification of the scenario of lava-like of fuel containing materials // *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl)*. - 2007. - Iss. 8. - P. 77 - 85. (Ukr)
13. *Ananich P.I., Geras'ko V.N., Gul'nik S.I. et. al.* Calculation-experimental researches of some descriptions of the neutron fields in the lava-like of fuel containing materials concentrations in the underreactor room 304/3 object "Shelter". - Chornobyl, 1998. - 11 p. - (Prepr. / NAS of Ukraine. ISTC "Shelter"; 98-3). (Rus)
14. *Ananich P.I., Geras'ko V.N., Gul'nik S.I. et. al.* Calculation researches on the ground of nuclear safety with the work of dusterpression system in the room of object "Shelter". - Chornobyl, 1997. - 23 p. - (Prepr. / NAS of Ukraine. ISTC "Shelter"; 97-3). (Rus)
15. *Analysis of current safety of object "Shelter" and prognosis estimations of development of situation (Report) / NAS of Ukraine. ISTC "Shelter"*. - Chornobyl, 2001. - Arkh. № 3836. (Rus)
16. *Gonchar V.V., Dvoeglazov A.M., Zhidkov A. et. al.* Research of some physical descriptions of LTSM of object "Shelter" // Object "Shelter" - 10 years. Basic results of scientific researches. - Chornobyl, 1996. - P. 173 - 182. (Rus)
17. *Zhidkov A. V.* Fuel containing materials of object "Shelter" today: *Importance* physical properties and possibilities of prognostication of their state of // *Problemy Chornobylya*. - 2001. - Iss. 7. - P. 23 - 40. (Rus)
18. *Babenko V.A., Vercimakha O.Ya., Enkovskiy L.L. et. al.* Investigation of multiplying properties of fuel containing the masses in 4-th unit of Chernobyl NPP. - Kiev, 1997. - 30 p. - (Prepr. / NAS of Ukraine. Institute of nuclear researches; KIYAI-97-1). (Rus)
19. *Pavlovich V.N., Babenko V.A., Vysotskiy E.D. et. al.* Model of neutron flow density distribution in fuel-containing materials of room 305/2 object of "Ukrytyya" // *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl)*. - 2005. - Iss. 2. - P. 55 - 60. (Rus)

Надійшла 08.01.2014

Received 08.01.2014