

Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Украина

ДИНАМИКА НЕЙТРОННОЙ АКТИВНОСТИ И ПОДКРИТИЧНОСТЬ ЯДЕРНО-ОПАСНОГО СКОПЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КОМПЛЕКСА НБК-ОУ

Приводятся результаты анализа и интерпретации данных штатного мониторинга нейтронной активности ядерно-опасного скопления (ЯОС) топливосодержащих материалов в зоне проплавления бетона опорной плиты шахты реактора до и после установки нового безопасного конфайнмента (НБК) в штатное положение. Установлено что сезонные тренды и локальные аномалии плотности потока нейтронов (ППН) определяются режимом поступления и удержания воды в зоне проплавления опорной плиты. Показано, что динамика нарастания ППН на периферии зоны проплавления, наблюдаемая после установки НБК, определяется вводом положительной реактивности в процессе потери воды переувлажненной (при повторной критичности 1990-го года) размножающей средой ЯОС. При условии сохранения надкритической композиции и продолжающемся росте ППН существуют риски возвратной критичности и возникновения самоподдерживающейся цепной реакции с непредсказуемыми последствиями. Предложены критерии обнаружения аномалий в динамике ППН, связанных с опасными изменениями уровня подкритичности ЯОС.

Ключевые слова: ядерно-опасное скопление, нейтронная активность, самоподдерживающаяся цепная реакция, топливосодержащие материалы, система контроля ядерной безопасности.

Введение

Ядерная безопасность каждого скопления в объекте «Укрытие» определяется только как доказанная гарантия отсутствия (или возможности оперативного исключения) условий возникновения самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) деления. После установки НБК и прекращения доступа в объект «Укрытие» атмосферных осадков все помещения, в которых обнаружены скопления топливосодержащих материалов (ТСМ), могут быть признаны ядерно-безопасными за исключением юго-восточной части подреакторного помещения 305/2 - места образования и исхода потоков черных лавообразных ТСМ (ЛТСМ). Здесь в зоне проплавления двухметрового монолита железобетона опорной плиты (ОП) находится ядерно-опасное скопление (ЯОС), вероятность возникновения СЦР в котором не может быть исключена. В условиях отсутствия доступа непосредственно к размножающей среде скопления обнаружение и оценка параметров критичности ЯОС (объем, композиция, материальный состав, масса и массовая доля топлива, плотность, гетерогенность, влагоемкость) основывались на анализе многолетней динамики нейтронной активности и температуры на периферии зоны проплавления, а также на результатах вариационных расчетов материальной модели критической сборки, вписывающейся в эту зону [1]. При этом основными исходными данными являлись: характеристики нейтронной аномалии 1990-го года, идентифицированной как «повторная» критичность в юго-восточной части помещения 305/2; пробы из кернов в забоях скважин в ОП; температурные и нейтронные градиенты в ОП, которые позволили определить возможное расположение и массовое содержание топлива в композиции ЯОС [2]. После установки НБК и прекращения доступа в зону проплавления дождевой и талой воды на периферии ЯОС наблюдается постоянный рост плотности потока нейтронов (ППН). При продолжении роста ППН в процессе обезвоживания размножающей среды ЯОС возможность возникновения возвратной критичности не может быть исключена.

Композиция ЯОС

На рис. 1 приведена рабочая версия размещения и состава ЯОС. Скопление представляет собой двухслойную композицию, скрытую под слоем «свежего 1986 г.» бетона. Верхний слой – черные ЛТСМ с массовой долей топлива 5 % урана, образовавшиеся в результате растворения фрагментов топливных каналов в силикатном расплаве и сформировавшие большой горизонтальный поток. Нижний слой – критическая масса керамики с долей топлива от 50 % урана, являющаяся продуктом взаимодействия расплава топлива (кориума) с бетоном ОП. Объем, который занимает критическая масса, ограничивается зоной проплавления ОП ниже отметки 9,1 м. Глубина проплавления (по тепловому пятну и состоянию стальной обшивки парораспределительного коридора) может достигать отметки 8,0 м. В границах зоны проплавления, ниже отметки 9,1 м, может быть размещена критическая сборка в геометрии плоского цилиндра с радиусом до 2 м и высотой 0,9 м.

© Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко, 2018

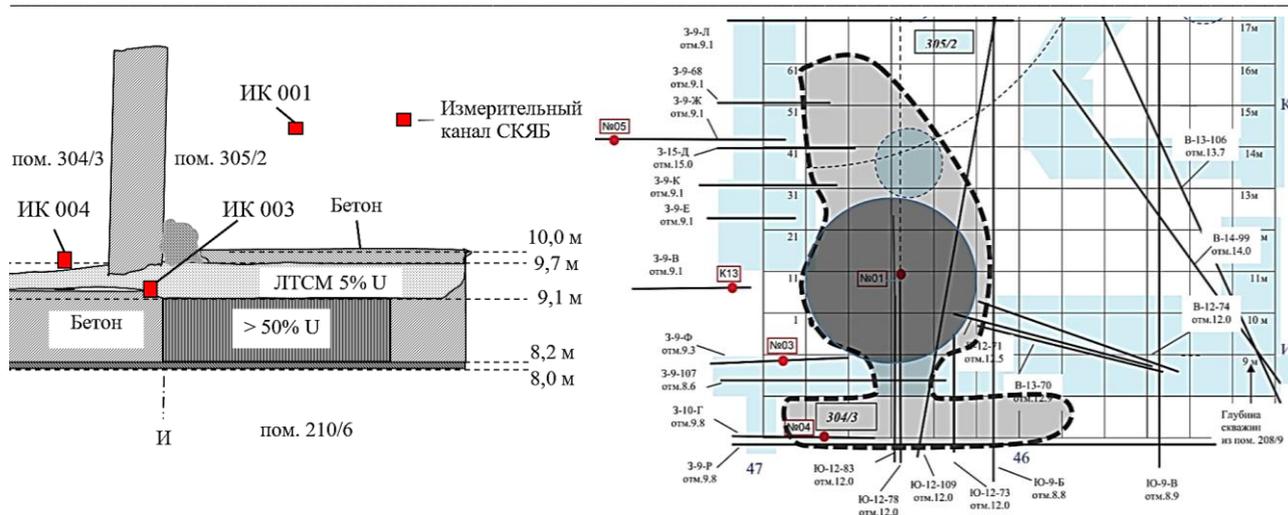


Рис. 1. Модель размещения ЯОС в ОП, точек детектирования нейтронов и датчиков температуры на периферии зоны проплавления.

ЯОС с массой топлива 15 - 20 т урана ($1,15\% \text{ }^{235}\text{U}$) рассматривается как две (с подкритической и надкритической композициями) гетерогенные водо-урановые системы, в объеме однородной топливной среды, которых равномерно распределены делящиеся материалы, примеси и внутренние источники нейтронов. Структура и плотность размножающей среды ЯОС определяется наличием широкого спектра микро- и макропор.

Основным фактором, определяющим многолетнюю динамику нейтронной активности ЯОС, являются процессы поступления и удержание влаги в пористой размножающей среде. Существующая система макро- и микропор образует бесконечный кластер, по открытым поровым каналам которого происходит поступление воздуха и воды в объемы скопления. Характеристики доступной микропористости (микропоры до 10 мкм, микротрещины шириной до 2,5 мкм, наноканалы 40 - 60 нм) определяют скорость насыщения водой, а макропоры (газовые пустоты с диаметром до нескольких сантиметров) – влагоемкость и совокупную гетерогенность размножающей среды. Экспериментальные исследования доступной пористости сантиметровых образцов ЛТСМ, которые не имели видимых макроскопических полостей и сквозных трещин показали наличие до 20 % доступной микропористости от объема образца. При этом длительность процессов водонасыщения и обезвоживания образцов составляла десятков часов. Предполагается, что структура пористой среды определяет механизм поступления и удержания влаги (равномерно по объему скопления) от массового содержания которой зависит эффективный коэффициент размножения ($K_{эф}$) системы.

Кинетика размножающей системы в подкритичности

Характерной особенностью при увлажнении подкритических водо-урановых систем с низкообогащенным топливом является наличие оптимального водо-уранового отношения, т.е. концентрации воды, при которой $K_{эф}$ достигает максимальных значений, и дальнейший рост концентрации приводит к переувлажнению и падению $K_{эф}$ до значений, определяемых влагоемкостью размножающей среды. Для систем с критической композицией диапазон оптимального увлажнения определяется двумя значениями водо-уранового отношения, где $K_{эф} \geq 1$.

ЯОС объединяет две подкритические системы, в объемы полностью переувлажненной среды (при «повторной» критичности 1990-го года) которых при потере воды может вводиться положительная реактивность ($\delta K = 1 - K_{эф}$). При этом можно допустить, что нижний слой – переувлажненная критическая масса керамики – будет удерживать воду до полного высыхания черных ЛТСМ. Введение реактивности в процессе обезвоживания керамики может продолжаться вплоть до возникновения условий критичности ($K_{эф} \geq 1$).

На рис. 2 приведены расчетные зависимости $K_{эф}$ от концентрации воды в размножающей среде черных ЛТСМ ($< 5\%$ урана). Экспериментальные значения плотности среды получены для проб, отобранных по глубине горизонтального потока черных ЛТСМ [3].

В процессе обезвоживания ЯОС $K_{эф}$ будет расти только в случае уменьшения объемной концентрации воды в переувлажненной размножающей среде. Если уход воды приводит к потере массы

увлажненной среды, то $K_{эф}$ будет падать. В непереувлажненной среде любой механизм ухода воды приводит только к уменьшению $K_{эф}$.

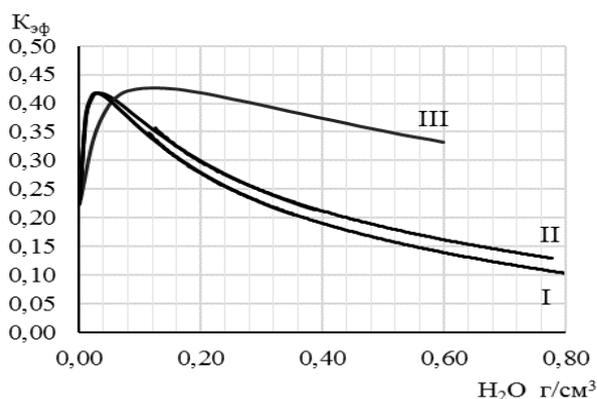


Рис. 2. Расчетная зависимость $K_{эф}$ от концентрации воды и плотности размножающей среды черных ЛТСМ.

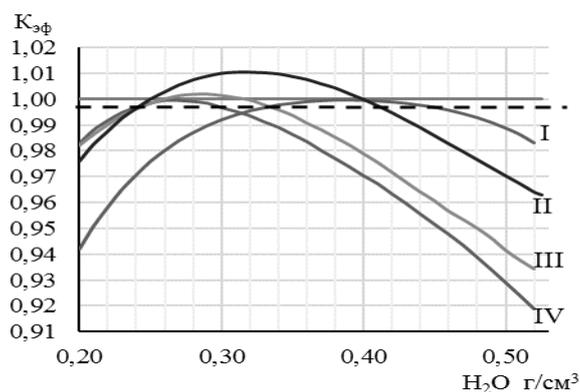


Рис. 3. Расчетные зависимости $K_{эф}$ от концентрации воды в керамике с критической массой топлива.

Для глубоко подкритической переувлажненной системы в процессе потери воды плотность нейтронов будет расти до достижения оптимального водо-уранового соотношения и далее падать до полного высыхания размножающей среды. Скорость изменения плотности нейтронов будет определяться только скоростью введения реактивности при потере воды. В табл. 1 приведены значения $K_{эф}$ для полностью увлажненной, оптимально увлажненной и сухой размножающей сред черных ЛТСМ с плотностью, возрастающей по глубине слоя. Кратность возможного роста и падения плотности нейтронов не превышает 1,5 от начала процесса обезвоживания.

Таблица 1. $K_{эф}$ для различных размножающихся сред черных ЛТСМ

Размножающая среда	Плотность γ , г/см ³	Полное увлажнение		Оптимальное увлажнение		Кратность роста, п/см ³ $\frac{1 - K_{эф1}}{1 - K_{эф2}}$	Сухая среда		Кратность спада, п/см ³ $\frac{1 - K_{эф1}}{1 - K_{эф3}}$	
		H ₂ O, г/см ³	$K_{эф1}$	H ₂ O, г/см ³	$K_{эф2}$		H ₂ O, г/см ³	$K_{эф3}$		
Черные ЛТСМ C _U 5 %	I	1,16	0,795	0,11	0,034	0,417	1,52	-	0,22	1,33
	II	1,25	0,778	0,135	0,037	0,417	1,48	-	0,22	1,33
	III	2,3	0,591	0,33	0,115	0,4273	1,169	-	0,23	1,34

На рис. 3 приведены расчетные зависимости $K_{эф}$ от концентрации воды в керамике с критической массой топлива (> 50 % урана) для версии материальной модели в геометрии плоского цилиндра и шагом решетки от 0,5 до 5 см, моделирующей возможную совокупную гетерогенность размножающей среды [4]. При допущении, что подкритичность переувлажненной размножающей среды обеспечивалась с 1990 г. удержанием воды в полном объеме, то непредсказуемый процесс потери может привести к возвратной критичности.

В табл. 2 приведены расчетные значения $K_{эф}$ при полном увлажнении, при допустимом увлажнении и при аварийном значении подкритичности.

Таблица 2. Расчетные значения $K_{эф}$ при полном увлажнении и при допустимом увлажнении

Размножающая среда	Гетерогенность, шаг решетки, см	Плотность γ , г/см ³	Максимальная влагоемкость		Допустимое увлажнение		Кратность роста, п/см ³ $\frac{1 - K_{эф1}}{1 - K_{эф2}}$	Увлажнение при аварийной подкритичности		Кратность роста, п/см ³ $\frac{1 - K_{эф1}}{1 - K_{эф3}}$	
			H ₂ O, г/см ³	$K_{эф1}$	H ₂ O, г/см ³	$K_{эф2}$		H ₂ O, г/см ³	$K_{эф3}$		
Керамика C _U > 50 %	I	0,5	4,1	0,520	0,983	0,480	0,98	0,85	0,5	0,994	2,83
	II	2	4,1	0,520	0,963	0,425	0,98	1,85	0,44	0,994	6,17
	III	4	4,1	0,520	0,935	0,350	0,98	3,25	0,36	0,994	10,83
	IV	5	4,1	0,520	0,918	0,320	0,98	4,1	0,34	0,994	13,67

Плотность нейтронов (n) при медленном введении положительной реактивности в подкритическую систему определяется в квазистатистическом приближении из соотношения

$$n_i = S / (1 - K_{эф}), \quad (1)$$

где S – интенсивность внутреннего источника нейтронов; l – среднее время жизни нейтронов в среде.

Скорость увеличения плотности нейтронов (dn/dt) определяется скоростью ввода реактивности ($dK_{эф}/dt$) и текущим уровнем подкритичности ($1 - K_{эф}$):

$$dn/dt = [S / (1 - K_{эф})^2] (dK_{эф}/dt). \quad (2)$$

Из этого следует, что при постоянной и малой скорости введения положительной реактивности в подкритическую систему ($dK/dt \ll 1\beta/c$, где $\beta = 0,0065$ – единица реактивности в эффективных долях запаздывающих нейтронов) скорость нарастания плотности нейтронов увеличивается при приближении к критическому состоянию. Мерой скорости нарастания плотности нейтронов для системы может быть величина периода

$$T = \frac{1 - K_{эф}}{dK_{эф}/dt}. \quad (3)$$

На рис. 4 и 5 приведены графики расчетных значений динамических параметров, ориентировочно описывающих кинетику системы при достижении разных степеней подкритичности [5]. За начальный уровень подкритичности ($\delta K = 1 - K_{эф}$) при расчетах графиков взято значение 10β ($K_{эф} \approx 0,935$). С этого уровня вводится реактивность с постоянной и малой скоростью $10^{-5}\beta - 10^{-7}\beta/c$.

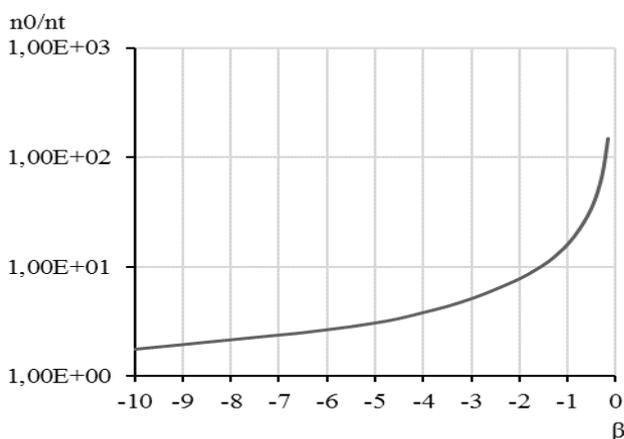


Рис. 4. Зависимость кратности увеличения плотности нейтронов от уровня подкритичности ТСМ в единицах β .

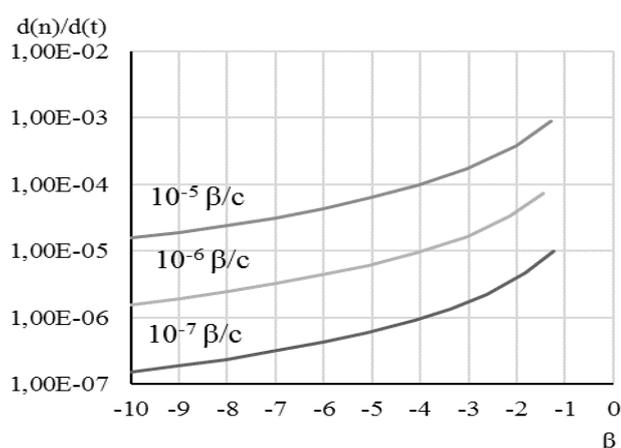


Рис. 5. Зависимость скорости нарастания плотности нейтронов от уровня подкритичности и скорости ввода реактивности.

На основании приведенных графиков, для системы с подкритичностью от 3β и более, можно принять допущения:

1) кратность увеличения плотности нейтронов n_i на каждом i -м шаге введения реактивности не зависит от скорости введения реактивности и пропорциональна отношению уровня подкритичности в начале и конце i -го интервала введения

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} \approx \frac{\delta K_{эф i}}{\delta K_{эф i+1}}; \quad (4)$$

2) кратность уменьшения периода разгона T_i пропорциональна отношению уровня подкритичности в начале i -го интервала к уровню подкритичности в конце i -го интервала введения реактивности. Величина периода при глубокой подкритичности системы ($\delta K_{эф} \gg 20\beta$) определяется в основном скоростью ввода реактивности и уменьшается с уменьшением величины подкритичности

$$\frac{T_i}{T_{i+1}} \approx \frac{\delta K_{эф i}}{\delta K_{эф i+1}}. \quad (5)$$

При подкритичности системы менее чем 3β интенсивность процессов разгона нарастает, а при подходе к условиям критичности ($\delta K_{эф} < \beta$) на временные характеристики разгона начинают влиять запаздывающие нейтроны. Состояние ТСМ с уровнем подкритичности менее 3β ($K_{эф} \geq 0,98$) не должно допускаться.

Оценки скорости ввода реактивности в систему при обезвоживании составили величину порядка 10^{-5} п/с. Эту величину можно считать верхней при ориентировочной оценке аномалий для ЛТСМ, находящихся выше отметки 9,0 м.

Кратность увеличения и скорость нарастания плотности нейтронов на интервале введения реактивности нарастает при приближении критичности.

Рост плотности нейтронов будет определяться процессом потери воды переувлажненной критической массы керамики, начальная подкритичность которой может находиться в зависимости от гетерогенности среды в пределах от 3 до 10 β . В предположении, что скорость введения реактивности при потере воды будет постоянной и более медленной, чем при высыхании слоя черных ЛТСМ, кратность увеличения плотности нейтронов при достижении аварийных значений ($K_{эф} = 0,98$, $\delta K = 3\beta$) составит более 5 раз, а скорость нарастания плотности увеличится более чем на порядок. Критериями идентификации уровня подкритичности является кратность увеличения и скорость нарастания плотности нейтронов околоскритической системы.

Эффективность нейтронного мониторинга ЯОС

Постоянный мониторинг нейтронной активности осуществляется на доступной периферии ЯОС штатными блоками детектирования (БД) системы контроля ядерной безопасности (СКЯБ) интегрированной автоматизированной системы контроля (ИАСК). БД выполнены на базе камеры деления в оболочке из замедлителя, работающей в импульсном режиме. БД представляет собой всеволновый детектор, изменение скорости счета в котором будет адекватно изменениям полного по энергии ППН. Процессы, в которых изменяется спектр и ППН в точке детектирования могут быть связаны или не связаны с изменением $K_{эф}$ в контролируемом источнике нейтронов. Так, БД на поверхности источника нейтронов в переувлажненном состоянии может регистрировать как изменение спектра, так и увеличение плотности нейтронов при образовании водного отражателя, при этом $K_{эф}$ не изменяется. Для корректной оценки скорости счета камеры деления с оболочкой из утеплителя, расположенной вне размножающей среды, требуется детальный расчет спектра $\phi(E)$. Для оценки влияния на детектируемую ППН возможной деформации спектра при потере воды критической массы керамики были проведены модельные расчеты спектра как на поверхности источника, так и в точках детектирования [1].

Эффективность камеры деления (КД) пропорциональна среднему сечению деления ^{235}U для интегральной ППН с энергетическим спектром $\phi(E)$. В качестве характеристики спектра использовались измеряемые кадмиевые отношения (R_{cd}) и экспериментальная зависимость коэффициента эффективности КД от R_{cd} .

В результате расчетов были получены энергетические спектры нейтронов источников и спектры в точках детектирования. На рис. 6 приведены спектры ППН на поверхности источника ($C_U = 52\%$) для сухой среды модели ЯОС и полностью увлажненной со значительной деформацией спектра в тепловую область.

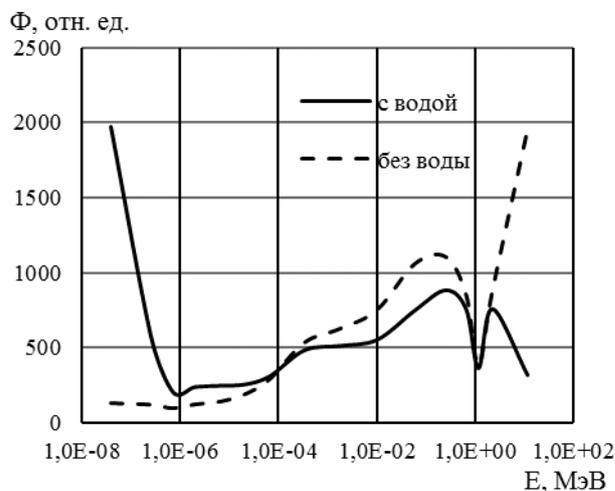


Рис. 6. Энергетический спектр нейтронов утечки на поверхности керамики ($C_U = 52\%$, отметка +9,00).

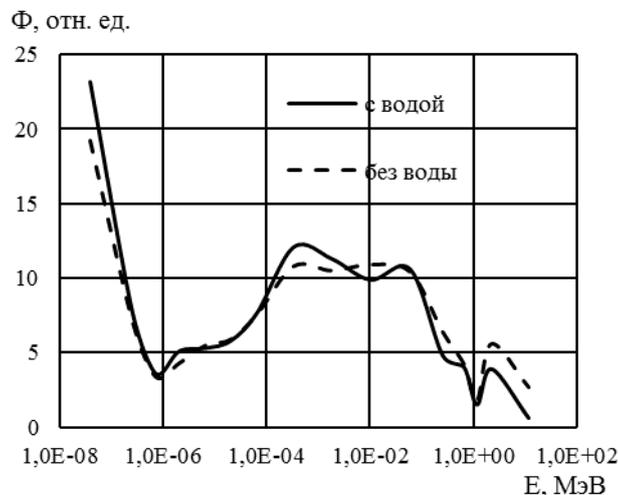


Рис. 7. Энергетический спектр нейтронов в точке детектирования ($C_U = 52\%$, отметка +12,00 пом. 305/2).

На рис. 7 приведены энергетические спектры нейтронов в точке детектирования на отметке +12,00 от источника $C_U = 52\%$ с водой и без воды. Деформация спектра ППН от источника в жесткую область при обезвоживании фактически не проявляется в точке детектирования, поэтому при полном высыхании слоя ЛТСМ динамика регистрируемой ППН будет однозначно определяться нейтронами утечки с поверхности керамики с критической массой топлива.

На внешней поверхности слоя ЛТСМ (отметка +9,70) расчетные оценки вклада абсолютных значений ППН от источников (с $C_U = 52\%$ и $C_U = 4,7\%$) составляли 9200 и 4500 $n/(cm^2 \cdot c)$ соответственно. Абсолютные значения ППН в точках детектирования определяются индивидуально и зависят от поглощения в среде раздела (ЛТСМ, бетон, разрушенный бетон, воздух) и угловой ориентации КД относительно источников.

Нейтронная активность ЯОС

До установки «Арки» в проектное положение нестабильность нейтронной активности ЯОС проявлялась на временных реализациях ППН в виде регулярных сезонных трендов, на фоне которых возникали локальные аномалии, сопровождающие процессы поступления и удержания дождевой и талой воды в объекте «Укрытие» в зоне проплавления ОП.

Сезонные тренды определяются динамикой относительной влажности и температуры внутри объекта «Укрытие» и практически совпадают с периодом конденсации (май – сентябрь) и испарения (сентябрь – апрель). Отклонения в трендах от среднегодовых значений не превышают 5% и не имеют информационной значимости при контроле подкритичности ЯОС [6].

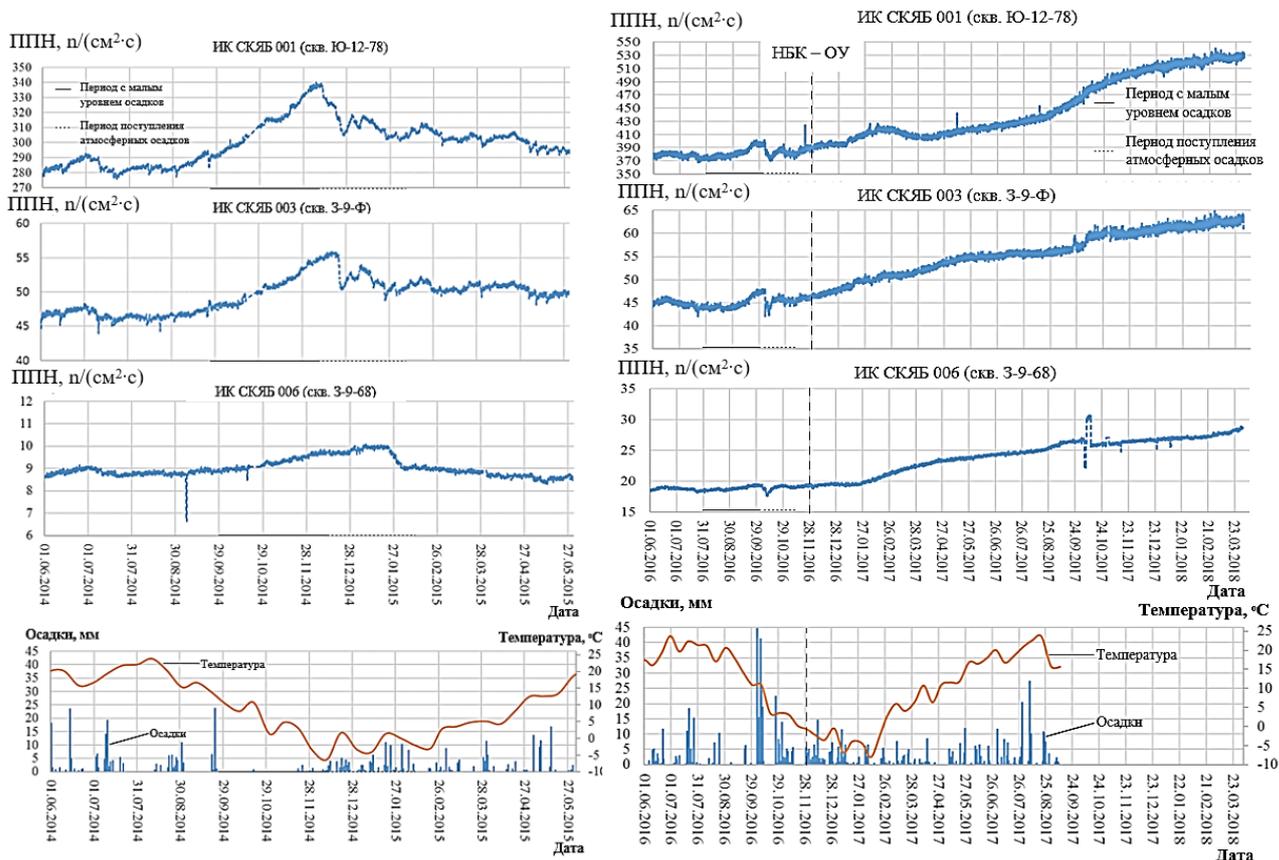


Рис. 8. Динамика ППН в точках детектирования каналами СКЯБ нейтронной активности в зоне проплавления ОП юго-восточной части помещения 305/2.

Локальные аномалии на временных реализациях ППН в точках детектирования на отметках +15,00, +12,00 и +9,00 показывают, что маршруты водотоков на ОП проходили через шахту реакторов. Задержка и скорость поступления воды определялась периодичностью и интенсивностью осадков. Появление стоков воды из скважин на отметке +9,00 из зоны проплавления ОП происходило с задержкой до суток и всегда сопровождалось падением ППН, но не ниже определенного уровня. Этот уровень (при постоянном присутствии воды ниже отметки +9,00) означал максимальное переув-

лажнение слоя черных ЛТСМ в отметках +9,00 – +9,70, прикрывающих критическую массу керамики в зоне проплавления. Сухие периоды всегда сопровождались ростом ППН с индивидуальной динамикой для каждой точки детектирования.

На рис. 8 приведена динамика ППН в точках детектирования каналами СКЯБ за идентичные периоды 2014 - 2015 и 2016 – 2017 гг.

БД СКЯБ регистрируют нейтроны утечки, появляющиеся: на верхней поверхности слоя черных ЛТСМ (отметка +12,00, NFD001); на боковых поверхностях источников (отметка +9,30, NFD003); непосредственно в слое ЛТСМ (забой скважины на отметке +9,10, NFD007). ППН, регистрируемая каждым БД, включает в себя нейтроны, генерируемые в объеме керамики, и нейтроны, генерируемые в слое ЛТСМ. Рост ППН от минимальных значений зависит от длительности сухого периода и означает, что скопления в зоне проплавления постоянно переувлажнены. При условии удержания воды ниже отметки +9,00, нейтронная активность керамики стабильна, а вся динамика локальных аномалий определялась изменениями $K_{эф}$ в слое черных ЛТСМ в процессе поступления или потери воды размножающейся средой.

Постоянный рост ППН, наблюдаемый после установки НБК, будет продолжаться до момента достижения оптимальной концентрации воды в слое ЛТСМ при максимальном $K_{эф}$ порядка 0,43. Далее идет падение ППН до полного обезвоживания слоя с минимальным $K_{эф}$ сухой среды порядка 0,24. Потеря воды из критической переувлажненной массы керамики может начаться только после полного осушения слоя черных ЛТСМ. При этом скорость потери воды будет значительно меньше, так как ниже отметки +8,80 (Ю-9-Б) процесс обезвоживания может идти только за счет испарения с верхней поверхности керамики в слой ЛТСМ. В то же время кратность и скорость роста ППН на каждом интервале введения положительной реактивности будет возрастать при приближении к критичности, равной $1 - 3 \beta$.

Выводы

1. В процессе обезвоживания ЯОС $K_{эф}$ будет расти только в случае уменьшения концентрации воды ($\text{г}/\text{см}^3$) в переувлажненной размножающей среде. Если уход воды приводит к потере массы увлажненной среды, то $K_{эф}$ будет падать. В непереувлажненной среде любой механизм ухода воды (замедлителя) приводит только к уменьшению $K_{эф}$.

2. Допускается, что в условиях НБК продолжительность и последовательность стадий удаления воды из порового пространства может обеспечить режим уменьшения концентрации воды в переувлажненной размножающей среде керамики, сохраняя таким образом параметры (массы и геометрии) критической композиции керамики. В таком случае это приведет к возвратной критичности и возникновению СЦР, мощность нейтронной вспышки при которой будет определяться запасом реактивности, оцениваемой как $0,3 \dots 0,5 \beta$.

3. После установки НБК, прекращение доступа дождевой и талой воды в зону проплавления ОП определило динамику нейтронной активности ЯОС с постоянным ростом ППН. Наблюдаемый рост ППН сопровождает процесс потери воды переувлажненной размножающей средой слоя черных ЛТСМ и будет продолжаться до достижения оптимального увлажнения с последующим незначительным падением до полного обезвоживания размножающей среды. Процесс потери воды керамикой с критической массой топлива может начаться только после полного осушения слоя ЛТСМ. При этом скорость введения положительной реактивности в результате снижения избыточной концентрации воды в размножающей среде значительно снизится, так как испарение может идти только с поверхности керамики. При постоянной и медленной скорости ввода реактивности ($dK_{эф}/dt \ll \beta/c$) в околокритическую систему скорость нарастания и кратность увеличения плотности нейтронов растет при приближении к критическому состоянию.

4. Критериями при экспертной оценке достижения аварийного уровня подкритичности ($\delta K_{эф} < 3 \beta$) являются кратность увеличения и коррелирующая скорость нарастания ППН утечки в точках детектирования нейтронной активности ЯОС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исследование* ядерно-физических параметров и разработка методов и способов контроля и управления подкритичностью в зонах критмассового риска : (Закл. отчет о НИР) / ИПБ АЭС НАН Украины; отв. исполнит. Е. Д. Высотский. - Инв. № 3998. - Чернобыль, 2010. - 127 с.
2. *Фролов В. В.* Аномальный инцидент 27 - 30 июня 1990 г. в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС / В. В. Фролов // Атомная энергия. - 1996. - Т. 80, вып. 3. - С. 216 - 219.
3. *Проведение* расчетов и разработка технических предложений по методам влияния на подкритичность ядерно-опасных материалов объекта «Укрытие» : (Отчет о НИР) / ИРЕП НАН Беларуси. - № 01/96-2 от 16.10.96. - Минск, 1997. - С. 98 - 107.
4. *Исследование* нейтронно-физических и физико-химических характеристик ядерно-опасных скоплений и разработка способов подавления их параметров критичности: (Закл. отчет о НИР) / ИПБ АЭС НАН Украины. - Инв. № 4021. - Чернобыль, 2015. - 127 с.
5. *Высотский Е. Д.* Методические основы контроля подкритичности топливосодержащих масс / Е. Д. Высотский, В. Г. Шевченко. - Чернобыль, 1998. - 23 с. - (Препринт / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 98-1).
6. *Оценка* изменения динамики испарения-конденсации влаги в ОУ под НБК, поведения ТСМ в изменившихся условиях и оценка изменения пылеобразования : (Закл. отчет о НИР) / ИПБ АЭС НАН Украины; отв. исполнит. В. О. Краснов. - Инв. № 374-17. - Чернобыль, 2017. - 222 с.

Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, А. О. Дорошенко

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

ДИНАМІКА НЕЙТРОННОЇ АКТИВНОСТІ І ПІДКРИТИЧНІСТЬ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНОГО СКУПЧЕННЯ В УМОВАХ КОМПЛЕКСУ НБК-ОУ

Наводяться результати аналізу та інтерпретації даних штатного моніторингу нейтронної активності ядерно-небезпечного скупчення (ЯНС) паливовмісних матеріалів у зоні проплавлення бетону опорної плити шахти реактора до і після установки нового безпечного конфайнмента (НБК) у штатне положення. Установлено що сезонні тренди і локальні аномалії щільності потоку нейтронів (ЩПН) визначаються режимом надходження та утримання води в зоні проплавлення опорної плити. Показано, що динаміка наростання ЩПН на периферії зони проплавлення, яка спостерігається після установки НБК, визначається введенням позитивної реактивності у процесі втрати води перезволоженого (при повторній критичності 1990-го року) розмножуючого середовища ЯНС. За умови збереження надкритичної композиції і тривалого зростання ЩПН існують ризики поворотної критичності та виникнення самопідтримуючої ланцюгової реакції із непередбачуваними наслідками. Запропоновано критерії виявлення аномалій у динаміці ЩПН, пов'язаних із небезпечними змінами рівня підкритичності ЯНС.

Ключові слова: ядерно-небезпечне скупчення, нейтронна активність, самопідтримуюча ланцюгова реакція, паливовмісні матеріали, система контролю ядерної безпеки.

E. D. Vysotsky, R. L. Godun, A. O. Doroshenko

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

THE DYNAMICS OF NEUTRON ACTIVITY AND SUBCRITICALITY OF A NUCLEAR-DANGEROUS CLUSTER IN THE CONDITIONS OF NSC-SO COMPLEX

It is presented the results of analysis and interpretation of monitoring of the dynamics of neutron activity of a potentially nuclear-dangerous cluster of fuel-containing materials (that located in zone of penetrating of concrete slab of the reactor's vault) before and after installation of the new secure confinement (NSC) "Arka". It is shown that the constant growth (after the installation of the NSC) of neutron activity accompanies the process of water's quit from the over-moist multiplying environment and accordingly the NFD increasing is a result of positive reactivity's introducing that can lead to recurrent criticality and self-sustaining chain reaction with unpredictable consequences. Based on the results of experimental data and model calculations, the effectiveness of neutron monitoring (at the detection points) was estimated. A forecast (regarding the further neutron activity) was also made and it was obtained the criteria for expert assessment of dangerous changes of the level of sub-criticality of this cluster of FCM.

Keywords: nuclear-dangerous cluster, neutron activity, self-sustaining chain reaction, fuel-containing materials, nuclear safety monitoring system.

REFERENCES

1. *The investigation* of nuclear-physical parameters and the development of methods for monitoring and controlling subcriticality in zones of risks of critical mass: (SRW final report) / IPB AES NAN Ukrainy; responsible executor. Ye. V. Vysotskij - Inv. № 3998. - Chernobyl, 2010. – 127 p. (Rus)
2. *Frolov V. V. An abnormal incident on June 27 - 30 1990 inside the "Shelter" object of Chornobyl NPP/ V. V. Frolov // Atomnaya energiya.* - 1996. - Т. 80. - Iss. 3. - P. 216 - 219. (Rus)
3. *Carrying out of calculations and the developing of technical proposals of methods for influencing on subcriticality of nuclear dangerous materials of "Shelter" Object: (SRW report) / IREP NAN Belarussia.* - № 01/96-2 of 16.10.96. - Minsk, 1997. - P. 98 - 107. (Rus)
4. *Investigation* of neutron-physical and physically-chemical characteristics of nuclear-dangerous clusters and the development of methods of suppressing of their criticality parameters: (SRW final report) / IPB AES NAN Ukrainy. - Inv. № 4021. - Chernobyl, 2015. - 127 p. (Rus)
5. *Vysotskij Ye. D. The methodical bases of control of subcriticality of fuel-containing masses / Ye. D. Vysotskij, V. G. Shevchenko.* - Chernobyl, 1998. - 23 p. (Rus)
6. *An assessment* of changes during the evaporation-condensation dynamics of moisture inside the "Shelter" under the NSC, the behavior of FCM during changing of storage conditions, and the assessment of changes of dust formation : (SRW final report) / IPB AES NAN Ukrainy; responsible executor V. O. Krasnov. - Inv. № 374-17. - Chernobyl, 2017. - 222 p. (Rus)

Надійшла 23.04.2018

Received 23.04.2018