

Е. Д. Высотский, К. А. Сущенко, Р. Л. Годун

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

## Экспертная оценка текущего уровня подкритичности скоплений топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» после установки нового безопасного конфайнмента

### Ключевые слова:

ядерная безопасность, скопления топливосодержащих материалов, нейтронная активность, уровень подкритичности.

Приведены результаты анализа и интерпретации изменений в динамике плотности потока нейтронов (ППН) утечки в штатных точках детектирования нейтронной активности скоплений топливосодержащих материалов после установки нового безопасного конфайнмента. Показано, что наличие в динамике ППН постоянного тренда может определяться только ростом эффективного коэффициента размножения ( $K_{эф}$ ) в процессе потери воды переувлажненной размножающей средой скоплений. Наблюдаемые на фоне тренда регулярные сезонные отклонения в скорости роста ППН незначительны и связаны с процессом появления (весна — лето) и высыхания (осень — зима) конденсационной влаги на поверхности скоплений. Предложены процедуры экспертной расчетно-экспериментальной оценки по тренду в динамике ППН текущего и прогнозируемого уровня подкритичности ядерно-опасного скопления (ЯОС), скрытого в зоне проплавления бетона опорной плиты шахты реактора. Для версии физической модели ЯОС получены консервативные оценки скорости ввода положительной реактивности и времени достижения аварийных значений подкритичности при потере воды размножающей средой.

### Введение

В зоне проплавления двухметрового монолита железобетона опорной плиты (ОП) шахты разрушенного 4-го реактора Чернобыльской АЭС находится ядерно-опасное скопление (ЯОС), вероятность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) в котором не может быть исключена [1].

ЯОС с массой топлива до 20 т урана образовалось на заключительной стадии аварии и представляет собой двухслойную композицию, скрытую под слоем «свежего 1986 г.» бетона. Верхний слой — черные лавообразные топливосодержащие материалы (ЛТСМ)

с массовой долей топлива до 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.

Основным фактором, определяющим динамику нейтронной активности ЯОС, являются процессы изменения массового содержания воды (замедлитель-поглотитель) в поровом пространстве их размножающей среды. Поровое пространство представляет собой систему газовых макро- и микропор,

© Е. Д. Высотский, К. А. Сущенко, Р. Л. Годун, 2020

объединенных между собой и внешней средой бесконечным кластером микротрещин (порядка 2,5 мкм) и поровых наноканалов (40–60 нм). Совокупность газовых макропор (сферической формы размером до 10 см) определяет влагоемкость и гетерогенность размножающей среды скоплений, а микротрещины и наноканалы — механизм объемной сорбции и скорость миграции воды в объеме скоплений [3, 4].

В июне 1990 г. после длительных и интенсивных атмосферных осадков в юго-восточной части подреакторного помещения 305/2 в месте образования и исхода потоков ЛТСМ была зарегистрирована повторная критичность. СЦР возникла в процессе поступления воды в скопление ТСМ, находящееся в зоне проплавления бетона ОП [5, 6]. До июня 1990 г. сухое скопление было глубоко подкритичным ( $K_{эф} < 0,7$ ), так как его температура выше 100 °С поддерживалась остаточным тепловыделением. В процессе поступления воды от атмосферных осадков в остывающую размножающую среду скопление при температуре менее 100 °С достигло состояния критичности. СЦР удерживалась в режиме осцилляций 32 ч с запасом реактивности ( $\rho$ ) порядка  $10^{-3} \beta$  и интенсивностью делений до  $10^{13}$  дел/с. При дальнейшем поступлении воды в количестве, превысившем диапазон оптимального увлажнения, скопление перешло в состояние подкритичности, уровень которой может находиться за пределами аварийных значений  $K_{эф} > 0,98$  [7, 8].

До установки нового безопасного конфинмента (НБК) 29.11.2016 г. полное увлажнение размножающей среды ЯОС удерживалось за счет регулярных поступлений атмосферных осадков и конденсата, что и обеспечивало стабильное состояние подкритичности ЯОС. После установки НБК и прекращения доступа в объект «Укрытие» атмосферных осадков наблюдается постоянный рост нейтронной активности, связанный с ростом  $K_{эф}$ , что подтверждает версию гашения СЦР при повторной критичности в результате переувлажнения размножающей среды ЯОС [9].

В настоящее время при неопределенном механизме обезвоживания ЯОС существует вероятность возвратной критичности с положительным температурным коэффициентом, ускоряющим разгон [10]. Наименее затратной временной мерой, минимизирующей риски возникновения возвратной критичности, является организация контроля, обеспечивающего эффективные процедуры обнаружения достижения опасных уровней подкритичности и последующего оперативного восстановления водного режима ЯОС [9].

## Динамика нейтронной активности ЯОС

Физическая модель ЯОС представлена композицией из двух (подкритической – слой ЛТСМ, и критической – керамика с массой топлива до 20 т урана с обогащением 1,15 % по  $^{235}\text{U}$ ) гетерогенных водо-урановых систем, скрытых в зоне проплавления ОП под слоем «свежего» бетона (1986 г.).

В объеме однородной размножающей среды систем равномерно распределены делящиеся материалы, примеси и внутренние источники нейтронов. Структура и плотность размножающей среды ЯОС определяется наличием широкого спектра микро- и макропор.

Мониторинг нейтронной активности ЯОС осуществляется непрерывным измерением плотности потока нейтронов (ППН) блоками детектирования (БД) штатной системы контроля ядерной безопасности (СКЯБ). БД размещены на доступной периферии зоны проплавления ОП через скважины. На рис. 1 приведена нормированная динамика ППН, детектируемая на периферии ЯОС, а также изменение температурно-влажностного режима в нижних помещениях объекта «Укрытие».

БД СКЯБ нейтронов штатной системы контроля ядерной безопасности установлены через скважины: БД 1 — в юго-восточном квадранте подреакторного помещения 305/2 над зоной проплавления; БД 3 и БД 6 — в бетоне ОП в юго-восточном и БД 7 — в юго-западном квадранте помещения 305/2; БД 4 — на поверхности скопления в соседнем помещении 304/3.

БД 1, 3, 6 детектируют нейтроны утечки от двух источников, расположенных в зоне проплавления ОП: критической переувлажненной массы керамики и глубоко подкритической переувлажненной размножающей среды слоя черных ЛТСМ. БД 1 детектирует нейтроны, появляющиеся на верхней поверхности слоя черных ЛТСМ; БД 3, 6 — на боковых поверхностях источников; БД 4 — на поверхности слоя черных ЛТСМ; БД 7 — непосредственно в слое коричневых ЛТСМ.

До установки НБК динамика ППН удерживалась с июня 1990 по ноябрь 2016 г. в пределах сезонных отклонений (от среднегодовых значений менее 5 % в периоды конденсата и испарения) за счет регулярных поступлений в зону проплавления ОП атмосферных осадков. После установки НБК и прекращения поступления воды наблюдается постоянный рост ППН утечки с коэффициентом

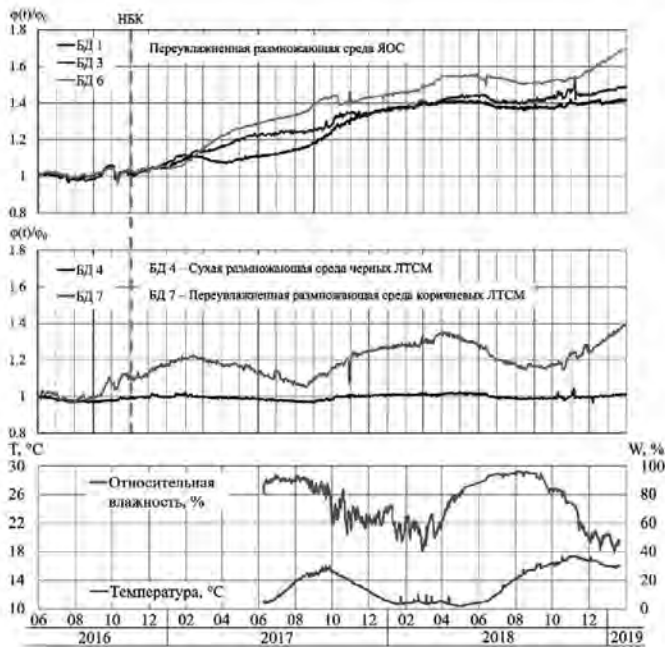


Рис. 1. Динамика ППН, температура и относительная влажность в нижних помещениях объекта «Укрытие»

корреляции временных реализаций показаний БД 1, 3, 6 более 0,8. Рост ППН определяется процессом потери влаги, сопровождающимся увеличением  $K_{эф}$  в переувлажненной размножающей среде. При этом в период конденсата скорость роста ППН сдерживается, а в период испарения возрастает. Рост ППН от минимальных значений при полном увлажнении зависит от длительности сухого периода и означает, что скопления в помещении 305/2 были постоянно переувлажнены. Отсутствие тренда в динамике ППН, детектируемого в БД 4, показывает, что в помещении 304/3 вода не поступала.

В расчетах нейтронно-физических параметров скопления моделируются как водо-урановые гетерогенные размножающие системы с низкообогащенным топливом, внутренним источником нейтронов и самопоглощением. Для таких систем существует оптимальное водо-урановое отношение, т. е. концентрация воды, при которой  $K_{эф}$  достигает максимального значения, а дальнейший рост концентрации приводит к переувлажнению и падению  $K_{эф}$  до значений, определяемых влагоемкостью размножающей среды. Для систем с критической массой топлива диапазон оптимального увлажнения ( $K_{эф} > 1$ ) определяется двумя значениями водо-уранового отношения [11].

На рис. 2, а приведены расчетные зависимости  $K_{эф}$  от концентрации воды (C) и плотности ( $\gamma$ ) размножающей

среды ЛТСМ: 1 — коричневые,  $\gamma = 2,7 \text{ г/см}^3$ , уран = 8%; 2 — коричневые,  $\gamma = 2,5 \text{ г/см}^3$ , уран = 8%; 3 — черные,  $\gamma = 2,5 \text{ г/см}^3$ , уран = 5%; 4 — черные,  $\gamma = 1,15 \text{ г/см}^3$ , уран = 5%. Экспериментальные значения плотности среды получены для проб, отобранных по глубине слоя в потоках ЛТСМ [1].

На рис. 2, б приведены расчетные зависимости  $K_{эф}$  от уровня объемного содержания воды и шага моделирующей решетки (1–0,5 см; 2–3 см; 3–4 см; 4–5 см) в критической массе керамики (> 50% урана,  $\gamma = 3,5 \text{ г/см}^3$ ). Зависимости  $K_{эф}$  от концентрации воды получены для версии физической модели в виде плоского, вписывающегося в зону проплавления бетона ОП, цилиндра  $2 \times 0,9 \text{ м}$  с массой урана до 20 т при обогащении  $^{235}\text{U} = 1,15\%$  и пористостью 52% от объема [7].

Очевидно, что в процессе обезвоживания ЯОС  $K_{эф}$  может расти только в случае уменьшения объемной концентрации воды в переувлажненной размножающей среде ЛТСМ и керамики с критической массой. 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  $K_{эф}$ .

### Процедура экспертной оценки уровня подкритичности

При мониторинге нейтронной активности изменение уровня подкритичности скоплений оценивается по результатам интерпретации динамики ППН утечки  $\phi(t)$ . В геометрии наблюдения, когда точки детектирования ППН находятся на периферии скоплений и влияние среды раздела является незначительным, динамика  $\phi(t)$  будет адекватно отображать изменение плотности нейтронов  $n(t)$  в источнике. Временные реализации  $n(t)$  интерпретируются на основании уравнений кинетики точечной модели для размножающей системы. Плотность нейтронов в объеме среды рассматривается как функция времени, пространственные зависимости  $n(t)$  не учитываются.

При медленном введении положительной реактивности ( $dK_{эф}/dt \ll \beta/c$ , где  $\beta = 0,0065$  — единица реактивности в эффективных долях запаздывающих  $v\omega$  нейтронов для водо-урановых систем) значение  $n(t)$  в подкритичности

$$n(t) = \frac{St}{1 - K_{эф}(t)}, \quad (1)$$

где  $S$  — интенсивность внутреннего источника нейтронов,  $l$  — среднее время жизни нейтронов.



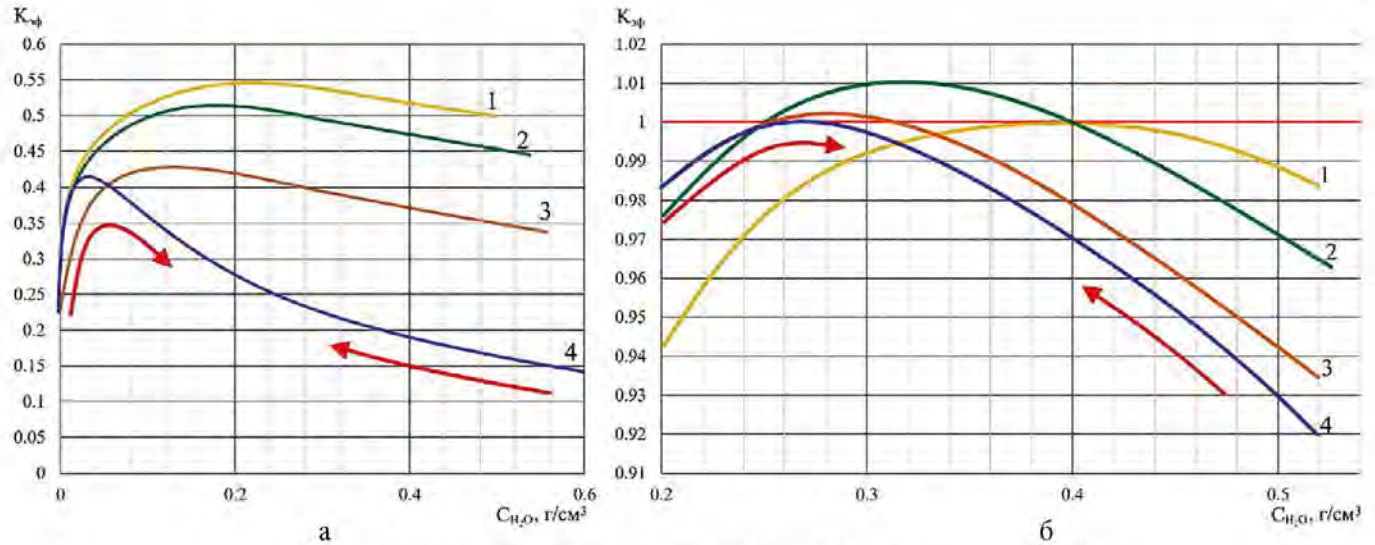


Рис. 2. Зависимость  $K_{эф}$  от концентрации воды в размножающей среде:  
а — ЛТСМ; б — керамики с критической массой

Скорость роста плотности нейтронов определяется соотношением

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

Таким образом, существует связь между динамическими параметрами размножающей системы в подкритичности: плотностью нейтронов; скоростью нарастания плотности; скоростью ввода реактивности и уровнем подкритичности  $(1 - K_{эф})$ . При заданных начальных условиях ( $K_{эф0}$ ) и определяемых по реализациям  $\varphi(t)$  двух динамических параметров ( $n$ ,  $dn/dt$ ) однозначно можно оценить два других параметра ( $K_{эф}$ ,  $dK_{эф}/dt$ ). В глубокой подкритичности при  $K_{эф} < 0,7$  скорость роста плотности нейтронов определяется скоростью ввода реактивности и практически не зависит от уровня подкритичности. Скорость ввода реактивности связана со скоростью потери воды размножающей средой расчетной зависимостью  $K_{эф}(C)$  (см. рис. 2), полученной с использованием кодов MCNP для физической модели размножающих систем [6].

В квазистатическом приближении и при условии адекватности динамики  $\varphi(t)$  и  $n(t)$  принимается, что

$$\frac{\varphi_i}{\varphi_{i+1}} \approx \frac{n_i}{n_{i+1}} \approx \frac{1 - K_{эф_{i+1}}}{1 - K_{эф_i}}, \quad (3)$$

где значение  $\varphi_i$  и  $K_{эф_i}$  в начале и  $\varphi_{i+1}$  и  $K_{эф_{i+1}}$  в конце интервала наблюдения  $\Delta t$ .

На рис. 3, а для слоя коричневых ЛТСМ (БД 7 в юго-западной части помещения 305/2), приведена динамика  $\varphi(t)$  и линия тренда с момента установки

НБК, а на рис. 3, б показана модельная зависимость  $K_{эф}(C)$ . За начальные условия принимаются значения  $\varphi(t_0)$  и расчетное значение  $K_{эф0}$  соответствующие максимальной концентрации воды, удерживаемой в размножающей среде скопления до установки НБК. Тогда на интервале наблюдения  $\Delta t = t_1 - t_0$  определяются:

текущее значение  $K_{эф1} = 1 - \frac{\varphi_0}{\varphi_1} (1 - K_{эф0})$ ;

скорость ввода реактивности  $\frac{dK_{эф}}{dt} = \frac{K_{эф1} - K_{эф0}}{\beta \Delta t}$ ,  $\beta/c$ ;

скорость потери воды  $\frac{dC}{dt} \approx \frac{C_0 - C_1}{\Delta t}$ ,  $\frac{г}{см^3 \cdot с}$ .

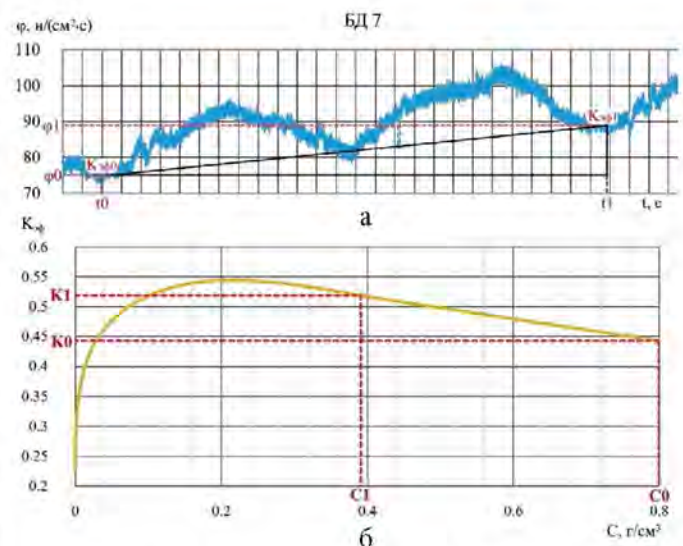


Рис. 3. Динамика ППН с линией тренда и (а) модельная зависимость  $K_{эф}(C)$  (б)



При оценке текущего уровня подкритичности ЯОС учитывается, что детектируемая на периферии скопления  $\varphi(t)$  включает в себя нейтроны, генерируемые двумя источниками: керамики с критической массой  $\varphi_k(t)$  и слоем черных ЛТСМ  $\varphi_l(t)$  (рис. 4). За начальные условия в  $t_0$  на интервале наблюдения принимаются значения при полном увлажнении размножающей среды в ЯОС:  $\varphi(t_0) = \varphi_{л0} + \varphi_{к0}$ ;  $\varphi_{л0}/\varphi_{к0} = 1/5 \div 1/2$ ;  $K_{л0} = K_l(C_{л0})$  и  $K_{к0} = K_k(C_{к0})$ ;  $(dC_l)/dt$ . При допущении, что скорость потери воды в ЛТСМ на интервале наблюдения не изменяется, тогда в конце интервала наблюдения  $t_1$  определяются:

уровень подкритичности слоя ЛТСМ:

$$\delta K_{л1} = 1 - K_{л1}, \text{ где } K_{л1} = K_l(C_{л0} - \Delta t \cdot \frac{dC_l}{dt});$$

ППН, генерируемая слоем ЛТСМ:

$$\varphi_{л1} = \varphi_{л0} \frac{1 - K_{л0}}{1 - K_{л1}};$$

ППН, генерируемая керамикой с критической массой:

$$\varphi_{к1} = \varphi(t_1) - \varphi_{л1};$$

текущая подкритичность керамики:

$$\delta K_{к1} = 1 - K_{к1}, K_{к1} = 1 - \frac{\varphi_{к0}}{\varphi_{к1}} (1 - K_{к0});$$

концентрация воды в керамике в конце интервала наблюдения:

$$C_{к1}(K_{к1}) \rightarrow K_k(C);$$

средняя скорость потери воды керамикой:

$$\frac{dC_k}{dt} = \frac{C_{к0} - C_{к1}}{\Delta t}, \text{ г/см}^3 \cdot \text{с};$$

средняя скорость ввода положительной реактивности в размножающую среду керамики:

$$\frac{dK_k}{dt} = \frac{K_{к1} - K_{к0}}{\beta \Delta t}, \beta/\text{с}.$$

Полученные оценки скорости ввода реактивности позволяют дать прогноз динамики роста интегральной ППН как минимум на текущем интервале сезонных колебаний в период конденсата (май — сентябрь) или испарения (октябрь — апрель).

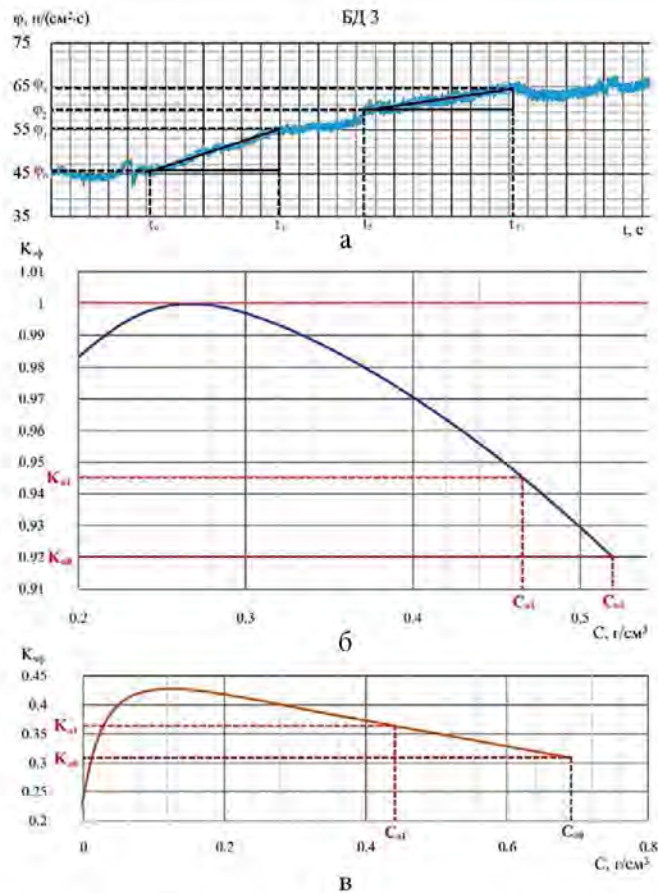


Рис. 4. Линии тренда в динамике  $\varphi(t)$  (а), модельная зависимость  $K_{эф}$  в ЛТСМ от концентрации воды  $K_l(C_l)$  (б) и модельная зависимость  $K_{эф}$  в керамике с критической массой от концентрации воды  $K_k(C_k)$  (в)

В таблице приведены результаты оценки параметров критичности для рабочей версии физической модели ЯОС [7] на трех интервалах наблюдения, в течение каждого из которых влияние сезонных колебаний влажности на ППН скопления исключено. На первом интервале наблюдения (11.2016–06.2017) скорость ввода реактивности в среде керамики с критической массой  $(dK_k)/dt$  находилась в пределах  $1,4 \cdot 10^{-7} - 1,7 \cdot 10^{-7} \beta/\text{с}$ , на втором (10.2017–06.2018) составляла  $3,8 \cdot 10^{-8} - 4,0 \cdot 10^{-8} \beta/\text{с}$ , на третьем (11.2018–07.2019) —  $3,6 \cdot 10^{-8} - 3,7 \cdot 10^{-8} \beta/\text{с}$ .

Результаты оценки параметров критичности ЯОС

№ $\Delta t_i$	$\Delta t_i$ , сут	$\varphi_i$	$\varphi_{i+1}$	$\frac{dC_l}{dt}$	$K_{ki}$	$K_{li}$	$C_{ki}$	$C_{li}$	$K_{ki+1}$	$K_{li+1}$	$C_{ki+1}$	$C_{li+1}$	$\frac{dC_k}{dt}$
1	204	46	55	$3 \cdot 10^{-9}$	0,918	0,310	0,52	0,69	0,936	0,321	0,486	0,637	$1,92 \cdot 10^{-9}$
2	234	60	65		0,942	0,328	0,472	0,599	0,948	0,341	0,460	0,539	$5,91 \cdot 10^{-10}$
3	191	65	69		0,947	0,351	0,461	0,496	0,951	0,362	0,452	0,447	$5,66 \cdot 10^{-10}$

В качестве исходных данных для первого интервала наблюдения были взяты: временной интервал  $\Delta t_1$ ,  $\phi_0$ ,  $\phi_1$ , скорость потери воды слоем ЛТСМ  $dC_n/dt$ , а также концентрации воды в средах ЛТСМ и керамики при полном увлажнении  $C_{л0}$  и  $C_{к0}$ . Исходные данные для второго и третьего интервалов наблюдения были определены из расчета на промежуточных интервалах наблюдения.

### Заключение

Динамика нейтронной активности с постоянным трендом к повышению, наблюдаемым после установки НБК, может определяться только ростом  $K_{эф}$  в процессе потери воды переувлажненной (при повторной критичности 1990 г. и удерживаемый в этом состоянии за счёт поступления атмосферных осадков вплоть до конца 2016 г.) размножающей средой керамики с критической массой. При сохранении структуры в части совокупной гетерогенности пористой среды керамики существуют риски возвратной критичности с СЦР, при которой запас реактивности составит не менее  $0,3\beta$ , а положительный температурный коэффициент ускорит разгон.

При механизме объемной сорбции допускается, что скорость потери воды на интервале наблюдения не изменяется. При этом экспертная оценка скорости ввода положительной реактивности по текущей динамике ППН утечки на интервалах наблюдения не превысила  $10^{-7} \beta/s$ . В настоящее время при максимальной скорости ввода реактивности период удвоения ППН составит не менее двух лет, что позволяет при обнаружении аварийных значений ( $K_{эф} \geq 0,95 \div 0,98$ ) принять меры по подавлению параметров критичности.

Алгоритм оценки текущего и прогнозируемого уровней подкритичности ЯОС реализован с применением кодов MAPLE и MCNP, для выполнения функции оперативной оценки параметров критичности ЯОС и прогноза ППН в точках детектирования на сезонных интервалах наблюдения (апрель — август, сентябрь — март).

В условиях отсутствия прямого доступа к размножающей среде ЯОС корректность прогнозных оценок времени возможного достижения аварийных значений подкритичности определяется выбором версии физической модели ЯОС, а также влиянием непрогнозируемого температурно-влажностного режима в помещениях комплекса НБК-ОУ. Верификация физической модели ЯОС в части неопределяемой экспериментально совокупной пористости (гетеро-

генности) и элементного состава будет проводиться на основании реальной динамики нейтронной активности ЯОС в условиях НБК-ОУ и версии образования критической массы как продукта взаимодействия расплава топлива (кориума) с бетоном ОП.

### Список литературы

1. Высотский Е. Д. Локализация ядерно-опасных скопленных топливосодержащих материалов / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, В. А. Краснов // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2007. — Вип. 7. — С. 66–75.
2. Михайлов А. В. К вопросу о материальных и энергетических источниках образования топливосодержащих материалов во время аварии на 4-м блоке ЧАЭС / А. В. Михайлов // Ядерна фізика та енергетика. — 2016. — Т. 17, № 4. — С. 54–363.
3. Гончар В. В. Исследование некоторых физических характеристик ЛТСМ объекта «Укрытие» / В. В. Гончар, А. Н. Двоглазов, А. В. Жидков // Объект «Укрытие» — 10 лет. Основные результаты научных исследований. — 1996. — С. 173–182.
4. Наноразмерные поровые каналы как составляющая порового пространства лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / С. В. Габелков, А. А. Ключников, Е. Е. Олейник, П. Е. Пархомчук, Г. Ф. Чемерский, В. Н. Щербин // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2014. — Вип. 22. — С. 70–73.
5. Фролов В. В. Аномальный инцидент 27–30 июля 1990 г. в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС / В. В. Фролов // Атомная энергия. — 1996. — Т. 80, вып. 3.
6. Боровой А. А. Опыт Чернобыля (работы на объекте «Укрытие») / А. А. Боровой, Е. П. Велихов. Ч. 1. — М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2012. — 168 с.
7. Нейтронно-физические характеристики ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, В. Н. Щербин, В. Б. Шостак // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2009. — Вип. 12. — С. 93–102.
8. Ядерно-опасные скопления топливосодержащих материалов в разрушенном четвертом блоке Чернобыльской АЭС / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, А. С. Лагуненко и др. // Радиохимия. — 2011. — Т. 53, № 2. — С. 178–183.
9. Высотский Е. Д. Динамика нейтронной активности и подкритичность ядерно-опасного скопления в условиях комплекса НБК-ОУ / Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2018. — Вип. 30. — С. 76–86.

10. Бабенко В. О. Вивчення можливості виникнення, розвитку та властивостей самопідтримної ланцюгової реакції в паливовмісних масах об'єкта «Укриття» / В. О. Бабенко, В. М. Павлович // Ядерна фізика та енергетика. — 2018. — Вип. 3. — С. 254–266.
11. Шостак В. Б. Определение величин параметров модели, описывающей ядерноопасные скопления топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие» / В. Б. Шостак, В. Н. Щербин, Е. Е. Олейник // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. — 2014. — Вип. 22. — С. 98–110.

**Є. Д. Висотський, К. О. Сущенко, Р. Л. Годун**

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

### **Експертна оцінка поточного рівня підкритичності скупчень паливовмісних матеріалів після встановлення нового безпечного конфайнмента**

Наведено результати аналізу та інтерпретації змін у динаміці щільності потоку нейтронів (ЩПН) у штатних точках детектування нейтронної активності скупчень паливовмісних матеріалів. Показано, що наявність у динаміці ЩПН витоку постійного тренду може визначатися тільки зростанням ефективного коефіцієнта розмноження ( $K_{\text{ef}}$ ) у процесі втрати води перезволоженим розмножуючим середовищем скупчень. Регулярні сезонні відхилення, що спостерігаються на фоні тренду, незначні й пов'язані з появою (весна — літо) і висиханням (осінь — зима) конденсаційної вологи на поверхні скупчень. Запропоновано процедури експертної розрахунково-експериментальної оцінки за динамікою ЩПН поточного і прогнозованого рівнів підкритичності ядерно-небезпечного скупчення (ЯНС), прихованого в зоні проплавлення бетону опорної плити шахти реактора. Для версії матеріальної моделі ЯНС отримано консервативні оцінки швидкості введення позитивної реактивності і часу досягнення аварійних значень підкритичності при втраті води розмножуючим середовищем.

*Ключові слова:* рівень підкритичності, розмножуюче середовище, неорганізовані скупчення паливовмісних матеріалів, динаміка щільності потоку нейтронів, щільність потоку нейтронів витоку, оцінка рівня підкритичності.

**Ye. D. Vysotskyi, K. O. Sushchenko, R. L. Godun**

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

### **Expert Assessment of the Current Criticality Level of Clusters of Fuel-Containing Materials after the New Safe Confinement Installing**

Results of the analysis and interpretation of changes of dynamics of the neutron flux density (NFD) at points of neutrons activity monitoring (which are located on the periphery of main clusters of fuel-containing materials, FCM) are presented. The presence of a constant growth trend in the dynamics of the NFD can be caused by an increase of the effective multiplication coefficient ( $K_{\text{eff}}$ ) in the process of water loss by a waterlogged breeding medium (FCM clusters). Under the condition of the presence of a critical composition in the penetration zone of the sub-reactor plate of the reactor shaft and the continued introduction of positive reactivity into this breeding medium, there are risks of an emergence of uncontrolled self-sustaining chain reaction (SCR) of neutron fission with difficultly predictable consequences. Thus, the change of neutron-physical parameters (due to changes of storage conditions) of nuclear hazardous fissile materials (NHFM) clusters requires an effective procedure for identifying the achievement of dangerous values of the subcriticality level. In connection with this, an algorithm for assessing the current and forecasted level of subcriticality of the NHFM cluster according to the NFD dynamics (recorded at the periphery of this FCM) is proposed. The proposed algorithm is based on the use of existing dependencies (obtained from the results of calculation and experimental work), as well as taking into account the kinetics of the neutron activity of the breeding system. For the version of material model of a NHFM cluster, the conservative estimates of the positive reactivity input rate as well as the time to reach emergency values of subcriticality due to the water loss in breeding medium were obtained. Under the assumption of a constant rate of the water concentration decrease in breeding medium, the conservative estimate of rate of positive reactivity introduction (according to the current registered NFD dynamics) did not exceed  $10^{-7}$   $\beta/s$ . Thus, at the maximum rate of reactivity input, the current period for NFD doubling is at least 2 years, which allows for the detection of emergency values to take measures on criticality parameters suppression. For effective timely identification of dangerous changes in the level of subcriticality of NHFM clusters, it is recommended

to introduce the proposed methodology into the software of a state nuclear safety monitoring system of the Shelter object.

*Keywords:* subcriticality level, unorganized accumulations of fuel containing materials, neutron flux density dynamics, leakage neutron flux density, estimation of subcriticality level.

## References

1. Vysotskiy Ye. D., Klyuchnikov O. O., Krasnov O. V. (2007). [Localization of nuclear-dangerous accumulations of fuel-containing materials]. *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 7, pp. 66–75. (in Russ.)
2. Mikhailov A. V. (2016). On the issue of material and energy sources of formation of fuel-containing materials during the accident on the 4th unit of the Chornobyl NPP. *Nuclear Physics and Energy*, vol. 17, no. 4, pp. 54–63. (in Russ.)
3. Gonchar V. V., Dvoylazov A. N., Zhidkov A. V. (1996). [Investigation of some physical characteristics of LTSM of the Shelter object]. In: *Shelter object — 10 years. Key research findings*, pp. 173–182. (in Russ.)
4. Gabielkov S. V., Kliuchnykov O. O., Oliynyk Ye. Ye., Parkhomchuk P. E., Chemersky G. F., Shcherbin V. M. (2014). [Nanosized pore channels as a component of pore space of lava-like fuel-containing materials of «Shelter» object]. *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 22, pp. 70–73. (in Russ.)
5. Frolov V. V. (1996). [Anomalous incident on 27–30, June 1990 in the Shelter object at Chornobyl NPP]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy], vol. 80, no. 3, pp. 216–219. (in Russ.)
6. Borovoj A. A., Velikhov E. P. (2012). *Opyt Chornobylya (raboty na obekte "Ukrytie")* [Chornobyl experience (works at the Shelter object)]. Part 1. Moscow: Kurchatov Institute, 168 p. (in Russ.)
7. Vysotskiy Ye. D., Klyuchnikov O. O., Shcherbin V. M., Shostak V. B. (2009). Neutron-physical characteristics of nuclear-dangerous accumulations of fuel-containing materials. *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 12, pp. 93–102. (in Russ.)
8. Vysotskiy Ye. D., Klyuchnikov O. O., Lagunencko A. S. (2011). [Nuclear-dangerous accumulations of fuel-containing materials in the destroyed fourth block of the Chornobyl NPP]. *Radiochemistry*, vol. 53, no. 2, pp. 178–183. (in Russ.)
9. Vysotskiy Ye. D., Godun R. L., Doroshenko A. O. (2018). [Dynamics of neutron activity and subcriticality of nuclear-dangerous accumulation in the conditions of the NSC-SO complex]. *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 30, pp. 76–86. (in Russ.)
10. Babenko V. O., Pavlovykh V. M. (2018). [The study of the possibility of occurrence, development and properties of self-sustaining chain reaction in the fuel-containing masses of the Shelter object]. *Nuclear Physics and Energy*, vol. 3, pp. 254–266 (in Ukr.)
11. Shostak V. B., Shcherbin V. M., Oleinik E. E. (2014). [Determination of parameter values of a model describing nuclear-dangerous accumulations of fuel-containing materials in the Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], vol. 22, pp. 98–110.

Надійшла 11.12.2019

Received 11.12.2019