

## К ВОПРОСУ О РОСТЕ КРИТИЧНОСТИ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОБЪЕКТЕ «УКРЫТИЕ»

А. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. И. Одинокин

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль*

Проведен сравнительный анализ применения уравнения кинетики и квазистатической модели описания поведения топливосодержащих материалов для оценки скорости изменения их подкритичности на объекте «Укрытие». В качестве примера исследована аномальная ситуация, возникшая в помещении 304/3 в период с 19 по 29 июня 1990 г. как наиболее серьезная на объекте «Укрытие» за весь послеаварийный период.

Штатная система контроля состояния топливосодержащих материалов (ТСМ) «Сигнал» на объекте «Укрытие» снабжена звуковыми и световыми сигнализаторами оповещения, которые должны автоматически включаться при достижении эффективного коэффициента размножения нейтронов ( $K_{эф}$ ) в скоплениях ТСМ контрольного значения 0,9 (сигнал «Внимание») и граничного значения 0,95 (сигнал «Опасно») [1]. Пороговые значения срабатывания аварийной сигнализации или пороговые значения плотности потока нейтронов (ППН) в нейтронных информационно-измерительных каналах (ИИК) СК ТСМ «Сигнал» определяются, исходя из назначения системы контроля над параметрами ТСМ с целью своевременного предупреждения персонала объекта «Укрытие» не только о возникновении аварийной ситуации, но и о вероятном росте критичности скоплений ТСМ. Возможность проведения персоналом мероприятий, обеспечивающих предотвращение самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР), определяется в основном временным интервалом от момента оповещения до момента достижения  $K_{эф}$  значения, близкого единице.

Таким образом, актуальной, с точки зрения ядерной и радиационной безопасности, является задача определения возможных времен достижения контрольных и граничных значений  $K_{эф}$  в скоплениях ТСМ.

Решение этой задачи возможно на базе дифференциального уравнения кинетики точечной модели реактора в подкритическом состоянии, хотя решение этого уравнения в аналитическом виде для общего случая крайне сложно, и в работах [2 - 4] рассматриваются только частные случаи и, как правило, с существенными допущениями и приближениями. В работе [5] представлено численное решение по специальным программам системы уравнений, описывающих динамику изменений состояния ТСМ для различных гипотетических моделей их структуры и при различных возможных сценариях внешних воздействий (залива ТСМ водой), приводящих к росту реактивности ТСМ. Однако рассматриваемые в настоящей статье временные интервалы, полученные для разных режимов (моделей структуры и скорости залива), отличаются друг от друга порой на несколько порядков. Отдать же предпочтение тому или иному режиму, т.е. определить наиболее вероятный режим для возможных моделей ТСМ и ситуаций на объекте «Укрытие», весьма проблематично.

Более простое решение может быть получено при использовании в описании модели поведения скоплений ТСМ квазистатического приближения, которое подробно рассмотрено в [4] и использовано в [1, 6].

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа двух подходов описания динамики размножающих свойств ТСМ при возникновении аномальной ситуации на базе уравнения кинетики точечной модели делящихся материалов и в квазистатическом приближении. Этот анализ проведем на конкретном примере.

Наиболее серьезной после аварии на 4-м блоке ЧАЭС является аномальная ситуация, зарегистрированная в помещении 304/3 в период с 19 по 29 июня 1990 г., связанная с прошедшими перед этим проливными дождями, вследствие которых произошел залив ТСМ водой. Предполагается, что развитие возможных в будущем аномальных ситуаций (если они не связаны с механическими подвижками ТСМ) будет протекать по тому же сценарию, и поэтому обобщение данной конкретной ситуации, на наш взгляд, вполне корректно.

Приведем хронологию рассматриваемого события [7]. Начиная с 24 июня 1990 г., в помещении 304/3 был отмечен рост ППН. Скорость счета на выходе нейтронного ИИК системы «Финиш-И» выросла с 2,5 до 4 с<sup>-1</sup>. С 13 ч до 15 ч 27 июня наблюдался резкий подъем до 14 с<sup>-1</sup>, а затем скорость счета сохранялась до 9 ч 28 июня. Затем вновь произошел рост скорости счета до 25 с<sup>-1</sup>. Утром 29 июня начался непрерывный рост скорости счета: в 9 ч - 29 с<sup>-1</sup>, в 11 ч - 41 с<sup>-1</sup>, в 13 ч - 48 с<sup>-1</sup>. С 15 ч до 19 ч скорость счета достигла значения 70 с<sup>-1</sup> и в дальнейшем вышла за пределы линейности тракта. После перехода на другой диапазон измерений были зафиксированы скорости счета: в 22 ч 55 мин - 114 с<sup>-1</sup>, в 23 ч - 148 с<sup>-1</sup>, в 23 ч 24 мин - 156 с<sup>-1</sup>. В дальнейшем на ТСМ помещения 304/3 был подан водный раствор поглотителя нейтронов (азотнокислого гадолиния) и скорость счета упала до исходного значения. Систематизируя эти данные, а также приведенные в [7] графические данные, можно оценить динамику рассматриваемого события, принимая за начало отсчета времени начало роста скорости счета 24 ч 00 мин 24 июня со скоростью счета 2,5 с<sup>-1</sup>. График, иллюстрирующий хронологическое развитие рассматриваемой ситуации, представлен на рис. 1 (кривая 1).

Аппроксимация всей кривой одной аналитической функцией не дает приемлемой точности, поэтому разобьем эту кривую на два участка.

Анализ характера кривой показывает возможность ее аппроксимации линейной зависимостью на участке  $0 \leq t \leq 5100$  ( $N(0) = 2,5$ ;  $N(5100) = 4$ ) и экспоненциальной зависимостью на остальном участке. Таким образом, при  $0 \leq t \leq 5100$  имеем

$$N(t) = \frac{4 - 2,5}{5100} \cdot t + 2,5 = 2,94 \cdot 10^{-4} \cdot t + 2,5,$$

а при  $t > 5100$  скорость счета представим в виде  $N(t) = A + B \cdot e^{\gamma t}$ , где  $A, B, \gamma$ - неизвестные параметры, подлежащие определению. В представленных формулах скорость счета  $N$  выражена в с<sup>-1</sup>, время  $t$  - в минутах.

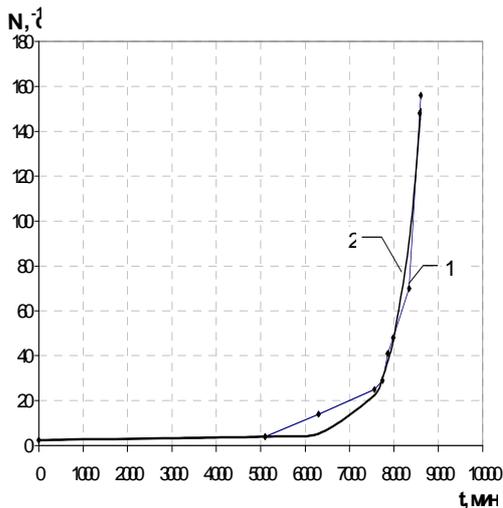


Рис. 1. График динамики развития ситуации в помещении 304/3 в период с 19 по 29 июня 1990 г. и аппроксимирующая его кривая.

Выразим  $A$  и  $B$  через  $\gamma$ , наложив условия равенства в точке  $t = 5100$  обеих ветвей функций  $N(t)$  и их производных. Эти условия приводят к системе уравнений

$$A + B \cdot e^{5100\gamma} = 4,$$

$$\gamma B e^{5100\gamma} = 2,94 \cdot 10^{-4},$$

откуда находим  $B = \frac{2,94 \cdot 10^{-4}}{\gamma} e^{-5100\gamma}$ ,  $A = 4 - \frac{2,94 \cdot 10^{-4}}{\gamma}$ ,

и функция  $N(t)$  на втором участке примет вид

$$N(t) = 4 - \frac{2,94 \cdot 10^{-4}}{\gamma} (1 - e^{\gamma(t-5100)}).$$

Численное решение этого уравнения по методу наименьших квадратов дает значение  $\gamma \approx 0,002$  мин<sup>-1</sup> и окончательно для второго участка получим (см. рис.1, кривая 2):

$$N(t) = 3,85 + 5,5 \cdot 10^{-6} e^{0,002 t} \quad (1)$$

Для анализа рассматриваемого события воспользуемся уравнением кинетики размножающей среды [4], приведенным к скорости счета системы контроля (т.е. в предположении пропорциональности скорости счета и плотности нейтронов в среде)

$$\frac{dN}{dt} = N \frac{K_{эф} - 1}{L} + S, \quad (2)$$

здесь  $S$  ( $c^{-2}$ ) надо понимать как произведение интенсивности источника на эффективность детектора, а  $K_{эф}$  и  $L$  - зависящие от времени переменные - эффективный коэффициент размножения нейтронов и среднее время жизни нейтрона в системе соответственно, временная зависимость которых определяется временным законом введения реактивности.

При рассмотрении процессов, происходящих в ТСМ, принято не учитывать влияние запаздывающих нейтронов, так как их вклад сказывается только при подкритичности меньшей доли запаздывающих нейтронов:  $\delta K_{эф} = 1 - K_{эф} < \beta = 0,0065$ , т.е. при  $K_{эф} > 0,9935$ . Для рассматриваемой в настоящей статье задачи ситуация, соответствующая значению  $K_{эф} = 0,95$ , уже рассматривается как предаварийная, и значения  $K_{эф} > 0,99$  недопустимы.

Используем данные литературных источников [8] и [9], в которых получено аналитическое выражение взаимосвязи  $L$  и  $K_{эф}$

$$L = 2 \cdot 10^{-5} \cdot (3 \cdot 10^{-2} + 4 \cdot K_{эф} + 3 \cdot K_{эф}^2),$$

где  $L$  выражено в секундах.

В нашем случае, при глубоко подкритичном состоянии ТСМ, начальное значение  $K_{эф} \approx 0,35$  [6], поэтому первым членом в скобках (который, как минимум, на порядок меньше остальных членов) можно пренебречь:

$$L = 2 \cdot 10^{-5} \cdot (4 \cdot K_{эф} + 3 \cdot K_{эф}^2). \quad (3)$$

Подставив выражения (1) и (3) в (2), после преобразований получим

$$\left[ 1,1 \cdot 10^{-8} + 0,275 \cdot \frac{1 - K_{эф}}{K_{эф} (4 + 3K_{эф})} \right] \cdot e^{0,002 \cdot t} = 1,925 \cdot 10^5 \cdot \frac{K_{эф} - 1}{K_{эф} (4 + 3K_{эф})} + S. \quad (4)$$

Параметр  $S$ , связанный с интенсивностью источника, является постоянной величиной на всех этапах рассматриваемой ситуации (включая период до начала роста скорости счета), т.е. не зависит от времени, и его можно определить из начальных условий: до начала роста скорости счета  $dN/dt = 0$ ,  $N = 2,5$  при  $K_{эф} = 0,35$ . Подставляя эти данные в формулу (2) с учетом формулы (3), получим

$$S = 2,5 \cdot (1 - 0,35) / [2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,35 \cdot (4 + 1,05)] = 4,6 \cdot 10^4. \quad (5)$$

Из выражения (4) с учетом (5) получим

$$t = 5 \cdot 10^2 \ln \frac{1,925 \cdot 10^5 (K_{эф} - 1) + 4,6 \cdot 10^4 K_{эф} (4 + 3K_{эф})}{1,1 \cdot 10^{-8} K_{эф} (4 + 3K_{эф}) + 0,275 (1 - K_{эф})} \approx 5 \cdot 10^2 \ln \left( \frac{5,01 K_{эф}^2 + 13,68 K_{эф} - 7}{1 - K_{эф}} \cdot 10^5 \right). \quad (6)$$

Получим эту же зависимость в квазистатическом приближении [4], в соответствии с которым

$$N = \frac{SL}{1 - K_{эф}};$$

(здесь все обозначения те же, что и выше). В работе [6] принималось постоянство величины  $L$  (как и  $S$ ) на всех этапах рассматриваемой ситуации. В этом случае из соотношения (4)

$$N = N_0 \frac{1 - K_{эф0}}{1 - K_{эф}}, \quad (7)$$

где  $N_0$  и  $K_{эф0}$  - значения  $N$  и  $K_{эф}$  в произвольный момент времени  $t_0$ . Принимая за  $t_0$  начало процесса, когда  $N = N_0 = 2,5 \text{ с}^{-1}$  и  $K_{эф} = K_{эф0} = 0,35$  и подставляя выражение (1) в (7), получим

$$3,85 + 5,5 \cdot 10^{-6} e^{0,002 \cdot t} = 2,5 \cdot (1 - 0,35)/(1 - K_{эф}),$$

откуда

$$t(K_{эф}) = 5 \cdot 10^{-2} \ln \left[ \left( \frac{0,28}{1 - K_{эф}} - 0,7 \right) 10^6 \right]. \quad (8)$$

Используя формулы (6) и (8), можно получить зависимости  $K_{эф}$  от времени. Графики этих зависимостей приведены на рис. 2.

Кривая 1 соответствует уравнению кинетики точечной модели подкритического реактора с учетом взаимосвязи среднего времени жизни нейтронов и  $K_{эф}$  по формуле (3), кривая 2 - квазистатическому приближению при постоянном времени жизни нейтронов.

Результаты расчетов по формулам (6) и (8) приведены в таблице. В ней же представлены времена достижения эффективным коэффициентом размножения нейтронов значений, указанных в первом столбце:  $t = t(K_{эф})$ , причем  $t = 0$  соответствует значению  $K_{эф} = 0,35$ . Там же представлены временные интервалы  $\Delta t$  между соседними значениями  $K_{эф}$ , а также скорости роста реактивности как в абсолютных единицах, так и в единицах  $\beta$ . В последней строчке представлены значения временных интервалов между критическим и контрольным значениями  $K_{эф}$  (0,98 и 0,9 соответственно). Все данные получены в двух вариантах: при использовании уравнения кинетики точечной модели подкритического реактора (т.е. без учета запаздывающих нейтронов) и в квазистатическом приближении. В качестве сравнения приведены те же параметры, значения которых получены на основании данных работы [5] для двух режимов: «устойчивых колебаний» и «подкритической вспышки» (в этих данных  $t = 0$  соответствует значению  $K_{эф} = 0,77$ ). Наиболее близок к рассмотренной ситуации режим «устойчивых колебаний».

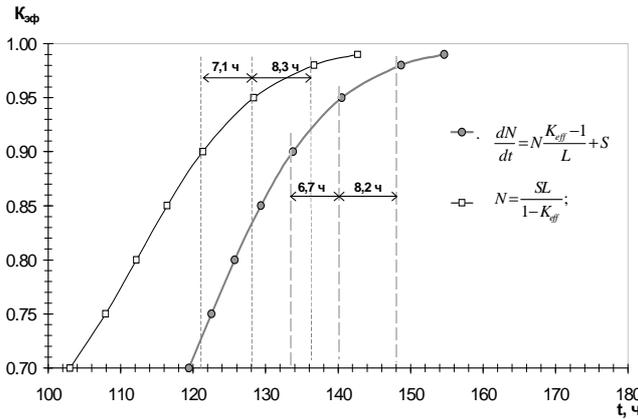


Рис. 2. Расчет значений  $K_{эф}$  с использованием уравнения кинетики и в квазистатическом приближении.

Как видно из приведенной таблицы, временные значения для двух вариантов существенно отличаются друг от друга, что нужно учитывать при оценке соответствия текущих значений счетности размножающим свойствам ( $K_{эф}$ ) контролируемых ТСМ. Однако временные интервалы между соответствующими значениями  $K_{эф}$  близки друг другу (в квазистатическом приближении эти значения несколько выше), причем с ростом  $K_{эф}$  разница в этих величинах стремится к нулю, что указывает на одинаковый характер временных зависимостей. В любом случае времени у персонала, обслуживающего объект «Укрытие», достаточно, чтобы проанализировать ситуацию и принять необходимые решения и меры, направленные на обеспечение радиационной и ядерной безопасности.

## Результаты модельных расчетов

K <sub>эф</sub>	Уравнение кинетики точечного реактора $\frac{dN}{dt} = N \frac{K_{эф} - 1}{L} + S$				Квазистатическое приближение $N = \frac{SL}{1 - K_{эф}}$				Режим устойчивых колебаний ( $\nu = 5 \cdot 10^{-6}$ г/с · см <sup>3</sup> )				Режим подкритичной вспышки ( $\nu = 10^{-8}$ г/с · см <sup>3</sup> )			
	t, ч	$\frac{d\rho}{dt} \times 10^{-6}$		Δt, ч	t, ч	$\frac{d\rho}{dt} \times 10^{-6}$		Δt, ч	t, ч	$\frac{d\rho}{dt} \times 10^{-6}$		Δt, ч	t, ч	$\frac{d\rho}{dt} \times 10^{-8}$		Δt, ч
		с <sup>-1</sup>	β/с			с <sup>-1</sup>	β/с			с <sup>-1</sup>	β/с			с <sup>-1</sup>	β/с	
0,77	123,8	7,31	1125		109,6	5,53	851		0	12,5	1923		0	2,43	374	
0,8	125,7	6,41	986	1,9	112,2	5,2	800	2,5	1,4	11,3	1738	1,4	488,9	1,98	305	489
0,9	133,8	3,18	489	8,1	121,3	2,98	458	9,2	5,3	9,24	1422	3,9	2453,8	1,85	285	1965
0,95	140,5	1,51	232	6,7	128,4	1,47	226	7,1	7,7	5,6	862	2,4	3474,4	1,22	188	1020
0,98	148,7	0,486	75	8,2	136,7	0,483	74	8,3	9,6	3,3	508	1,9	4440,0	0,73	112	965
$t(0,98) - t(0,9) = 14.9$				$t(0,98) - t(0,9) = 15.4$				$t(0,98) - t(0,9) = 4.3$				$t(0,98) - t(0,9) = 1986$				



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Августов В.В., Кучмагра А.А., Молчанов О.С. и др.* Обоснование выбора пороговых значений контролируемых параметров системы контроля топливосодержащих материалов на объекте «Укрытие» // Проблемы Чернобиля. - 2000. - Вып. 6. - 2000. - С.140 - 152.
2. *Владимиров В.И.* Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов. - М.: Энергоиздат, 1981. - 288 с.
3. *Климов А.Н.* Ядерная физика и ядерные реакторы. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 350 с.
4. *Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В.* Научно-технические основы управления ядерными реакторами. - М.: Энергоиздат, 1981. - 360 с.
5. *Верцімаха О.Я., Павлович В.М., Щербін В.М.* Про можливості виникнення та розвитку самопідтримуючої ланцюгової реакції в ПММ 4-го блока ЧАЕС // Науково-практична конференція «Наука. Чернобыль-97», Київ, 11 - 12 лют. 1998 р. - Київ, 1998. - С. 230.
6. *Высотский Е.Д., Шевченко В.Г.* Методические основы контроля подкритичности топливосодержащих масс. - Чернобыль, 1998. - 23 с. - (Препр. / НАН Украины. МНТЦ «Укрытие»; 98-1).
7. *Арзуманов С.С., Беляев С.Т., Бондаренко Л.Н. и др.* Исследовательская система нейтронного контроля ядерно-физического состояния топливосодержащих масс 4-го блока ЧАЭС. - М., 1992. - 48 с. - (Препр. / Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова; ИАЭ-5452/3).
8. *Бодовский В.П., Ключников А.А., Кучмагра А.А. и др.* Развитие методов шумовой диагностики скоплений ядерноопасных делящихся материалов объекта «Укрытие» // Проблемы Чернобиля. - 2002. - Вып. 9. - С. 196.
9. *Кучмагра А.А.* Разработка, исследования и внедрение технических средств контроля для обеспечения ядерной и радиационной безопасности объекта «Укрытие»: Дис. ... канд. техн. наук / МНТЦ «Укрытие» НАН Украины. - Чернобыль, 2003. - С. 39.

Поступила в редакцию 17.11.04,  
после доработки - 25.11.04.

**6 16c ДО ПИТАННЯ ПРО РІСТ КРИТИЧНОСТІ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ  
НА ОБ'ЄКТІ "УКРИТТЯ"**

**О. А. Кучмагра, О. С. Молчанов, Г. І. Одинокін**

Проведено порівняльний аналіз застосування рівняння кінетики і квазістатичної моделі опису поведінки паливовмісних матеріалів для оцінки швидкості зміни їх підкритичності на об'єкті «Укриття». Як приклад досліджено аномальну ситуацію, що виникнула в приміщенні 304/3 у період із 19 по 29 червня 1990 р. як найбільш серйозна на об'єкті «Укриття» за весь післяаварійний період.

**6 16 TO QUESTION ABOUT GROWTH OF CRITICISM FUEL-CONTAINING MATERIALS  
ON OBJECT "UKRYTTYA"**

**A. A. Kuchmahra, O. S. Molchanov, G. S. Odinokin**

The comparative analysis of application of equalization of kinetics and kvazistatistical model of the description conduct FCM for estimation of speed of change of the subcriticism FCM on object «Ukryttya» is conducted. As an example an anomalous situation is explored, arising up in premises 304/3 in period with 19 to 29 June, 1990 year, as most serious on object "Ukryttya" for all pastaccident period.