

О ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВНЕРЕАКТОРНОГО ОБРАЩЕНИЯ С ЯДЕРНЫМИ ДЕЛЯЩИМИСЯ МАТЕРИАЛАМИ В ПРИСУТСТВИИ СЛАБОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ

Ю.В. Волков*, В.В. Фролов**

**Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*

***ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Изучены факторы, влияющие на задержку разгонного процесса при линейном вводе надкритичности в систему с делящимися материалами и слабым внутренним источником собственного нейтронного излучения. Предложен простой метод оценки среднего времени задержки разгонного процесса и коэффициента размножения, при котором этот процесс начинает развиваться.

Внереакторное обращение с ядерными делящимися материалами (ЯДМ) – это обширная промышленная деятельность, включающая их получение, изготовление изделий из них, хранение и транспортирование. При проектировании и эксплуатации оборудования с ЯДМ приоритетное внимание уделяется обеспечению ядерной (критмассовой) безопасности (ЯБ). Первая и основная задача этого вида безопасности заключается в предотвращении самоподдерживающейся цепной реакции деления (СЦР) строгими мерами ограничения, благодаря которым частота возникновения СЦР должна быть крайне мала (не более 10^{-1} год⁻¹ на все установки мировой атомной промышленности). С начала развития производства ЯДМ и до настоящего времени в мире произошли 22 ядерные аварии с возникновением СЦР: в России (СССР) – 13, в США – 7, в Великобритании – 1, в Японии – 1 [1].

Неисключаемость абсолютно случаев возникновения СЦР с необходимостью приводит к рассмотрению ее потенциальных последствий и решению второй задачи ЯБ – ограничению этих последствий. Известно, что произведение частоты возникновения СЦР на величину ее последствий образует уровень риска обращения с ЯДМ в конкретных условиях. Такую двухкомпонентную оценку уровня риска практикуют, рассматривая максимальную проектную аварию (МПА), в которой учитывают, прежде всего, технические отказы оборудования и ошибки персонала, т.е. достаточно реальные цепочки возможных событий.

Представляет интерес анализ максимально возможной аварии (МВА) и максимальной гипотетической аварии (МГА), в которых постулируется воздействие на систему с ЯДМ техногенных и природных явлений, а также преднамеренных действий персонала и диверсантов, что может привести к вводу в систему большой

положительной реактивности. Однако максимум последствий аварии зависит не только от внешних воздействий, но и от внутренних характеристик самой системы с ЯДМ. Как показывает анализ произошедших аварий, масштабы последствий тем больше, чем больше величина достигнутой надкритичности в процессе аварийного разгона.

Известно [2], что возникновение и развитие первой незатухающей цепочки делений (ПНЦД) происходит с задержкой после момента достижения системой критического состояния. Величина этой задержки определяется интенсивностью постороннего источника нейтронов, т.е. нейтронов, которые не рождаются в процессе делений в данной системе. Чем меньше интенсивность, тем больше задержка в возникновении ПНЦД. А, следовательно, при монотонном росте положительной реактивности, тем больше достигнутая надкритичность в момент появления ПНЦД.

При обращении с ЯДМ вне реактора посторонним источником нейтронов может служить собственное нейтронное излучение (СНИ). Оно возникает при спонтанном делении четно-четных ядер (^{238}U , ^{240}Pu и др.), а также в результате (α , n) реакций на легких элементах под действием α -частиц, испускаемых ядрами урана и плутония. Наименьшей интенсивностью СНИ обладает металлический уран высокого обогащения. Например, для сборки из такого урана массой 55 кг и обогащением 93% по ^{235}U интенсивность СНИ составляет $\sim 46 \text{ с}^{-1}$.

В статье рассматривается влияние на кинетику СЦР интенсивности СНИ, а именно, изучено влияние интенсивности СНИ на задержку разгонного процесса при линейном вводе надкритичности в систему ЯДМ. Предложен простой метод оценки среднего времени задержки разгонного процесса и коэффициента размножения, при котором возникает ПНЦД.

В соответствии с работами [2, 3, 4], среднее время $\bar{\theta}$ до появления ПНЦД определяется по формуле

$$\bar{\theta} = \frac{1}{S(1-q_b)}, \quad (1)$$

где S – интенсивность постороннего источника нейтронов, q_b – вероятность вырождения ветвящегося процесса делений. Формулой (1) выражается тот простой факт, что из пуассоновского потока нейтронов постороннего источника отбираются только те нейтроны, которые с вероятностью $1 - q_b$ могут вызвать ПНЦД. Согласно работе [3], вероятность q_b подчиняется уравнению

$$1 - \frac{k}{\bar{\nu}} - q_b + \frac{k}{\bar{\nu}} \sum_{\nu=0}^6 \chi(\nu) q_b^{\nu} = 0, \quad (2)$$

где k – коэффициент размножения нейтронов в делящейся среде с учетом запаздывающих нейтронов, т.е. при $k = 1$ система критична на запаздывающих нейтронах, $\bar{\nu}$ – среднее число вторичных нейтронов на один акт деления, $\chi(\nu)$ – распределение числа вторичных нейтронов на один акт деления. Из (2) видно, что q_b не зависит ни от доли запаздывающих нейтронов, ни от постоянных распада предшественников, ни от времени жизни мгновенных нейтронов, а зависит только от введенного коэффициента размножения и от распределения числа вторичных нейтронов деления.

В [3] показано, что уравнение (2), кроме очевидного $q_b = 1$, имеет еще одно решение $q_b \neq 1$ только при $k > 1$. Для всех $k \leq 1$ всегда $q_b = 1$, и в соответствии с формулой (1), $\bar{\theta} = \infty$. Поэтому для разгонов, связанных с ростом k , имеет смысл рассматривать только периоды времени, когда $k(t) > 1$.

Согласно работе [2], величину q_b можно оценить по простой формуле

$$q_b \approx 1 - \frac{\frac{k-1}{k}}{\frac{v(v-1)}{2\bar{v}}} \quad (3)$$

В [3] показано, что оценка (3) является «квадратичным приближением» точного решения уравнения (2), и дает завышенные оценки величины q_b , а соответственно $\bar{\theta}$. Поскольку при анализе аварийных разгонов чаще всего интересуются достигнутым за время задержки ПНЦД коэффициентом размножения k , то оценки q_b по формуле (3) являются консервативными и идут в запас ядерной безопасности.

С учетом того, что для всех делящихся изотопов $\frac{v(v-1)}{2\bar{v}} \approx 1$, сочетание формул (1), (3) дает следующую оценку

$$\bar{\theta} \approx \frac{k}{S(k-1)}. \quad (4)$$

Пусть имеет место линейный ввод положительной реактивности. Тогда, если время отсчитывать от момента достижения системой с ЯДМ критичности ($k = 1$), то при $t > 0$

$$k(t) = 1 + at, \quad (5)$$

где a – скорость ввода положительной реактивности.

Скорости аварийного ввода положительной реактивности обычно таковы, что заметное изменение величины k происходит за времена масштаба секунды и более, а характерное время достижения асимптотического значения q_b вероятностью вырождения процесса делений составляет величину порядка

$$\frac{l}{k(1-\beta)-1} \leq 10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ с},$$

где l – время жизни мгновенных нейтронов. Поэтому не будет заметной погрешности, если предположить, что зависит от времени t параметрически, через зависимость $k = f(t)$.

В этом предположении подстановка (5) в (4) дает простую формулу

$$\bar{\theta}(t) \approx \frac{1}{S} \left(1 + \frac{1}{at} \right) \quad (6)$$

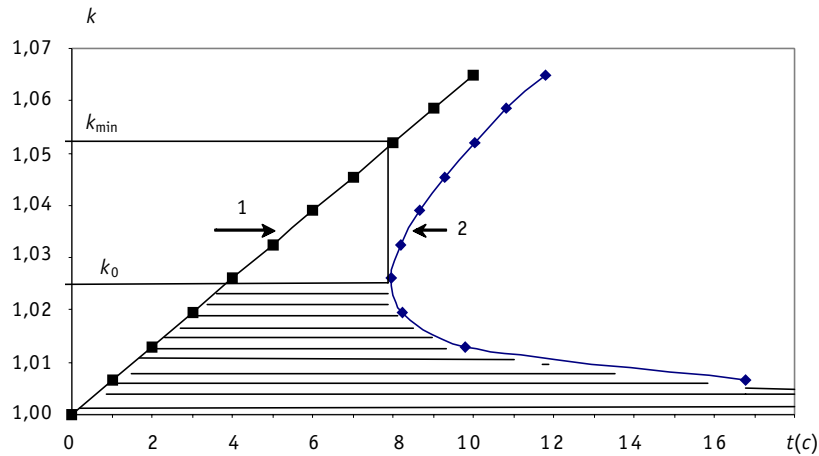
для оценки среднего времени задержки появления и развития ПНЦД при достигнутом значении k . Видно, что с ростом t , а соответственно k , время задержки ПНЦД уменьшается от ∞ при $k = 1$ до $1/S$ при очень больших значениях t . Физически это понятно, т.к. при больших k почти каждый нейтрон источника вызывает ПНЦД и время задержки ПНЦД определяется только темпом поступления в систему нейтронов СНИ.

Полное **среднее** время задержки появления ПНЦД после достижения критичности есть сумма

$$t_{\text{пнцд}} = t + \bar{\theta}(t).$$

С учетом (5)

$$t_{\text{пнцд}} = \frac{S(k-1)^2 + ka}{aS(k-1)}. \quad (7)$$


 Рис. 1. Иллюстрация зависимостей $k(t)$ (1) и $t_{\text{пнцд}} = f(k)$ (2)

Зависимость (7) иллюстрируется на рис. 1 для случая, когда $S = 10$ (1/с), $a = 0.0065$ (1/с). Из него видно, что функция $t_{\text{пнцд}} = f(k)$ имеет минимум при

$$k_0 = 1 + \sqrt{\frac{a}{S}}. \quad (8)$$

Подстановка (8) в (7) дает возможность оценить **в среднем** минимальное время от момента достижения критического состояния до момента образования ПНЦД и начала разгонного процесса:

$$t_{\text{пнцд}}^{\min} = \frac{2 + \sqrt{\frac{a}{S}}}{\sqrt{aS}}. \quad (9)$$

Эта оценка несколько более консервативна, чем приведенная в [5]:

$$t_{\text{пнцд}}^{\min} \approx \frac{1.22}{\sqrt{aS}}.$$

Подставив (9) в (5), получим оценку:

$$k_{\min} = 1 + at_{\text{пнцд}}^{\min}.$$

Физический смысл величины k_{\min} таков – это **в среднем** минимальный k , с которого может начаться разгонный процесс. На рис. 1 заштрихованная область между зависимостями $k(t)$ (прямая 1) и $t_{\text{пнцд}} = f(k)$ (кривая 2), лежащая ниже величины k_0 , есть область нереализуемых (**в среднем**) времен задержек в развитии ПНЦД, т.к. за эти времена будут достигнуты такие значения k , которые дают меньшие величины $t_{\text{пнцд}}$. Из рис. 1 видно, что в этом примере ($S = 10$ (1/с), $a = 0.0065$ (1/с)) разгон произойдет на мгновенных нейтронах **в среднем** через ≈ 8 с после достижения критического состояния, при этом, исходным для разгона будет **в среднем** $k \approx 1.052$, т.е. исходная надкритичность будет $\approx 8\beta$.

Зависимости от величины S для различных скоростей ввода положительной реактивности a приведены на рис. 2. Видно, что времена задержек в развитии ПНЦД могут различаться для различных скоростей ввода положительной реактивности на порядки, при этом, если скорости различаются, например, на два порядка, то времена задержек только на один. Это видно также из формулы (9).

Зависимости k_0 и k_{\min} от величины S для различных скоростей ввода положительной реактивности a приведены на рис. 3. Видно, что k_0 и k_{\min} могут существен-

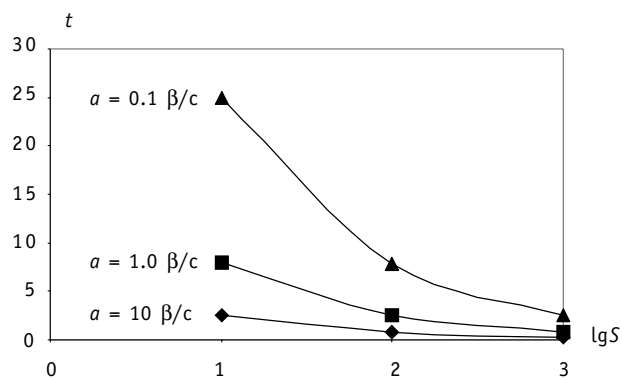


Рис. 2. Зависимости $t_{\text{пнцд}}^{\text{min}}$ от величины S для различных скоростей ввода положительной реактивности a

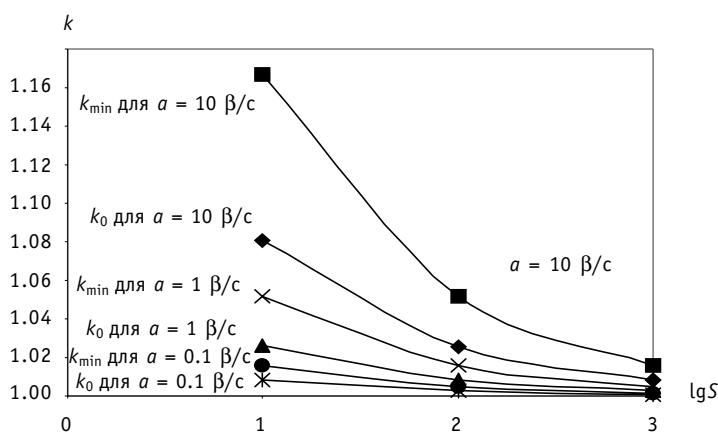


Рис. 3. Зависимости k_0 и k_{min} от величины S для различных скоростей ввода положительной реактивности a

но различаться при малых S и больших a . Однако с ростом S эта разница быстро уменьшается.

Таким образом, здесь получены простые соотношения, позволяющие с разумным консерватизмом оценить время задержки ПНЦД после начала разгонного процесса с линейным вводом положительной реактивности в систему с ЯДМ в присутствии слабого постороннего источника нейтронов, а также величину достигнутого коэффициента размножения. Эти соотношения могут быть полезны для экспресс – оценок при решении вопросов обеспечения ядерной безопасности при обращении с ЯДМ.

Литература

1. Обзор ядерных аварий с возникновением СЦР. Совм. отчет США и России. LA-13638. – 2003.
2. Hansen G. Assembly of fissionable material in the presence of a weak neutron source// Nucl. Sci. Engng. – 1960. – V. 8. – P. 709-719.
3. Волков Ю.В., Назаров В.К. Замыкание стохастической теории точечного реактора нулевой мощности/Препринт ФЭИ-1888. – 1988.
4. Волков Ю.В. Стохастическая кинетика реактора со слабым источником и ядерная безопасность//Атомная энергия. – 1992. – Т. 72. – Вып.1.
5. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1976.

Поступила в редакцию 13.09.2004

УДК 621.039.51

On Safety Non-reactor Management of Fissile Materials when a Weak Neutron Source is Available \ Yu.V. Volkov, V.V. Frolov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 5 pages, table, 3 illustrations. – References, 5 titles.

The authors have studied factors contributing into delay of accelerating process when a linear input of super criticality into a system containing fissile materials takes place, there being a weak inherent internal neutron source.

A straightforward procedure of assessing mean time of delay for the acceleration process as well as the multiplication factor at which the process starts developing have been proposed

УДК 621.039.526

Physical Model of Stress-strain State of BN-type Reactor Absorber Pins in Conditions of Absorber-cladding Mechanical Interaction \ A.A. Touzov, A.A. Kamaev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 12 titles.

The main problem arising at evaluating the control rod absorber elements efficiency of the BN-type reactors for conditions of absorber high burn up is a correct account of swelling absorber cladding mechanical interaction. To solve this task there has been developed a physical model of complicated stressed-strained state calculation for the absorber element under steady operation conditions. Main hypotheses have been formulated for the scheme of cladding loading due to inner pressure of the absorber stack with taking into account of swelling and creep effects and unidirectional plastic strains for cladding. The list of initial data required has been defined.

An analysis of published domestic and foreign data for recorded cases of cladding failure as a result of mechanical interaction with absorber has been carried out. Based on the analysis results the test model for verification of the calculation procedure element efficiency evaluation has been chosen, and initial data for calculations have been prepared.

УДК 502.3: 546.42

Analysis of Forecast of Sr-90 Run-off with the Techa River Water \ Yu.G. Mokrov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 4 table, 1 illustration. – References, 8 titles.

Analysis of the Techa River contamination forecast made 10 years ago, is made with the use of a simple prediction model based on hydrological monitoring of the river system and expert assessments of ^{90}Sr inflow into the open hydrographic system. It is shown that prediction estimated obtained earlier correspond to up-to-date tasks on Sr-90 runoff in the Techa River middle stream (Muslyumovo village). The conclusion is approved that at the moment the Techa River system in the sate of radioactive contamination stabilization. For future predictions it is proposed to use verified data on ^{90}Sr filtration capacity from the from the Techa Reservoir cascade in the open hydrographic system.

УДК 621.039.75

Deactivating Polymeric Coats on the Basis of Butylacrilate Latexes \ M.A. Tuleshova, V.K. Milinchuk; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 6 pages, 4 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.

In the article the results of investigation of formation and surface properties of deactivating polymeric coats on the basis of butylacrilate latexes on modeling solid substrates (steel 3, stainless steel, micarta, poly (methyl methacrylate) (PMMA)) is given. Set that the heating-up period of films depends on minimum temperature of formation of a film. The interfacial tensions of latex films lie in an interval from 32 up to 43 mJ/m², solid substrates – from 37 – 46 mJ/m². The share polar builders of interfacial tension for all polymeric films is approximately identical and makes ~ 70 %; for solid