

В. А. Бабенко^{1,2}, В. Н. Павлович^{2,3*}

¹ *Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, Украина*

² *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина*

³ *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

*Ответственный автор: pavlovich@kinr.kiev.ua

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙСЯ ЦЕПНОЙ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ В ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАССАХ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» В СЛУЧАЕ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ПОСТУПЛЕНИЯ ВОДЫ

Изучены характерные особенности возникновения и развития самоподдерживающейся цепной ядерной реакции (СЦР) в топливосодержащих массах объекта «Укрытие», а также ее основные свойства для ряда возможных режимов ее протекания в случае переменной скорости поступления воды в систему либо ее вытекания. На основе численного анализа и расчетов согласно используемой системе дифференциальных уравнений для главных характеристик системы показано, что изменения скорости залива воды могут приводить к очень существенным и весьма разнообразным изменениям в режимах развития СЦР по сравнению с возможными режимами при постоянной скорости залива. Расчеты, в частности, показывают, что в системе при определенных достаточно разумных с физической точки зрения условиях могут иметь место значительные по величине всплески потока нейтронов, которые могут представлять серьезную опасность. Также показано, что увеличение скорости залива воды в режиме постоянных колебаний может привести к переходу системы в «закритическое» состояние, т.е. подкритическое состояние с большим количеством воды в системе.

Ключевые слова: цепная ядерная реакция, топливосодержащие массы, поток нейтронов.

Введение

Данная работа посвящена дальнейшему изучению основных свойств и возможных режимов развития самоподдерживающейся цепной ядерной реакции (СЦР) в топливосодержащих массах (ТСМ) объекта «Укрытие» и является непосредственным продолжением наших предыдущих работ [1, 2]. При этом, если ранее скорость поступления воды в систему (либо ее вытекания) считалась постоянной на протяжении всего рассматриваемого временного интервала развития СЦР, то в настоящей работе рассмотрены возможности и особенности развития СЦР, связанные со вполне вероятным и допустимым изменением скорости залива воды в систему в определенные моменты времени. Очевидно, что вследствие изменения внешних условий (выпадения осадков и т.п.) подобные изменения скорости поступления воды являются вполне возможными и, более того, скорее всего имеют место в действительности.

Оказывается, что согласно расчетам по используемой нами модели, изменения скорости залива воды могут приводить к очень существенным и весьма разнообразным изменениям в режимах развития СЦР по сравнению с исходно возможными простейшими режимами при постоянной скорости залива. Так, в частности, ока-

зываются возможными переходы одного типа простого режима СЦР в другой, так что в системе могут иметь место существенно более сложные и интересные «комбинированные» режимы развития СЦР, когда один из исследованных нами ранее простых режимов может переходить в другой. Например, возможны «комбинированные» режимы СЦР, когда устойчивые колебания с одной постоянной амплитудой могут сменяться устойчивыми колебаниями с другой постоянной амплитудой или колебаниями с переменной амплитудой. Все эти сложные «комбинированные» режимы развития СЦР связаны с возможностью изменения скорости залива либо вытекания воды из системы. В настоящей работе будут рассмотрены некоторые из них.

Следует при этом особо отметить, что колебания с переменной амплитудой представляют собой переходной процесс с достаточно большой постоянной времени, поскольку анализ фазовых траекторий показывает, что при постоянной скорости залива фазовая траектория всегда стремится к предельному циклу. Существенным выводом здесь является то, что упомянутый в [2] переход системы в «закритическое» состояние оказывается возможным либо при залповом заливе системы водой, либо при изменении (увеличении) скорости залива в режиме постоянных колебаний.

© В. А. Бабенко, В. Н. Павлович, 2018

**Основные уравнения,
определяющие динамику развития СЦР
в случае переменной скорости
поступления либо вытока воды**

Основные кинетические уравнения для главных физических величин $n(t)$, $m(t)$ и $T(t)$, определяющих динамику развития СЦР в рассматриваемой системе, были сформулированы и подробно исследованы нами в работах [1, 2] для случая постоянной скорости v залива ТСМ водой либо же ее вытекания также с постоянной скоростью (в последнем случае скорость просто принимается равной отрицательному значению). В случае переменной скорости поступления воды в систему $v(t)$ (либо ее вытекания) эти уравнения никак не меняются по своей форме – теперь надо лишь считать скорость залива водой переменной величиной, зависящей от времени, $v = v(t)$. Выпишем здесь для удобства и полноты изложения данную систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho(t)}{\bar{\tau}} n + f, \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = v(t) - \theta(T - T_{ev}) \left(\frac{dm}{dt} \right)_{ev}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & (MC_{FCM} + mC_{H_2O}) \frac{dT}{dt} + \lambda \theta(T - T_{ev}) \left(\frac{dm}{dt} \right)_{ev} + \\ & + v(t) C_{H_2O} (T - T_i) + \kappa (T - T_e) = \varepsilon_f \Sigma_f v_T n. \end{aligned} \quad (3)$$

При этом для большинства дальнейших расчетов используются начальные условия в нулевой момент времени $t = t_0 = 0$ для сухих ТСМ, которые имеют вид [2]

$$n(0) = n_0 = \frac{f\tau}{\rho_0}, \quad m(0) = m_0 = 0, \quad T(0) = T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (4)$$

В приведенных выше уравнениях основные характеристики системы $n(t)$, $m(t)$ и $T(t)$ – это зависящие от времени концентрация нейтронов, масса воды в единице объема системы и температура системы соответственно.

Остальные фигурирующие в уравнениях (1) – (4) функции и величины имеют следующий смысл: функция $\rho(t)$, задаваемая в виде $\rho = -\rho_0 (1 - m/m_1)(1 - m/m_2)$, – это реактивность системы (которая зависит от массы воды, а значит, и от времени); ρ_0 – абсолютная величина

начальной реактивности системы; константа f – мощность постоянного внутреннего источника нейтронов; $\bar{\tau}$ – феноменологическая временная константа для учета наличия запаздывающих нейтронов; $T_{ev} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура кипения воды; M – масса единицы объема ТСМ (ее плотность); константы C_{FCM} и C_{H_2O} – удельные теплоемкости ТСМ и воды соответственно; λ – удельная теплота парообразования; T_i – температура поступающей воды; T_e – температура, соответствующая теплопередаче; κ – коэффициент теплообмена; ε_f – средняя энергия, выделяемая в результате одного акта деления; Σ_f – макроскопическое сечение деления среды; v_T – скорость тепловых нейтронов. Используемая также нами в дальнейшем функция $\theta(x)$ – это единичная ступенчатая тэта-функция Хэвисайда. Конкретные численные значения фигурирующих величин приведены в [2]. При этом для расчетов также используются некоторые свойства и результаты исследований стационарных размножающих свойств ТСМ, которые уже неоднократно производились [1, 3 - 8], в том числе и в наших предыдущих работах [1, 3 - 5].

Мы далее будем считать, что скорость поступления воды в систему может меняться лишь скачкообразным образом в определенные моменты времени от одного постоянного значения к другому, или, иначе говоря, скорость залива воды является постоянной на некоторых интервалах времени и скачком изменяется от старого значения к новому при переходе к следующему временному интервалу. Таких временных интервалов изменения скорости залива мы в настоящей работе будем рассматривать не более трех.

В простейшем случае, когда скорость залива воды меняется за все время развития динамики в системе лишь один раз, функцию скорости $v(t)$ можно представить с помощью тэта-функции Хэвисайда $\theta(t)$ в виде

$$v(t) = v_1 + (v_2 - v_1) \theta(t - t_1), \quad (5)$$

где v_1 – это скорость поступления воды в систему на первом интервале времени $0 < t < t_1$; v_2 – скорость поступления воды в систему на втором временном интервале $t_1 < t < \infty$. Более подробно формула (5) записывается в виде

$$v(t) = \begin{cases} v_1, & 0 < t < t_1 \\ v_2, & t_1 < t < \infty \end{cases}. \quad (6)$$

Если скорость залива либо вытекания воды меняется за время развития динамики в системе два раза, то функцию скорости $v(t)$ можно представить аналогично формуле (5) в виде трех слагаемых с тэта-функциями:

$$v(t) = v_1 + (v_2 - v_1)\theta(t - t_1) + (v_3 - v_2)\theta(t - t_2), \quad (7)$$

где предполагается выполнение условия $0 < t_1 < t_2$. Подробная запись формулы (7) имеет вид

$$v(t) = \begin{cases} v_1, & 0 < t < t_1 \\ v_2, & t_1 < t < t_2 \\ v_3, & t_2 < t < \infty \end{cases}. \quad (8)$$

Выбор конкретных значений скорости и рассматриваемых временных отрезков обсудим в следующем разделе.

Возможные режимы развития СЦР и их свойства в случае изменения скорости залива либо вытекания воды в определенные моменты времени

В работе [2] было показано, что основными возможными простейшими режимами развития СЦР являются режим одиночной вспышки нейтронного потока в системе с различной амплитудой в точке максимума и режим колебаний плотности нейтронов, причем в большинстве случаев колебания происходят с постоянной амплитудой, однако имеются и случаи, когда амплитуда колебаний меняется с течением времени (переходной процесс, о котором говорилось выше). Возможными также являются режим экспоненциального роста потока нейтронов в отдельных исключительных случаях, а также наиболее простой и тривиальный из возможных режимов изменения плотности нейтронов в системе – режим простого аperiодического затухания потока нейтронов с течением времени.

Оказывается, что в рассматриваемой системе возможны также существенно более сложные и интересные «комбинированные» режимы развития СЦР, когда один из вышеперечисленных режимов может переходить в другой либо когда устойчивые колебания с одной постоянной амплитудой могут сменяться устойчивыми колебаниями с другой постоянной амплитудой или колебаниями с переменной амплитудой. Все эти сложные «комбинированные» режимы развития СЦР связаны с возможностью изменения скорости залива либо вытекания воды из системы. Мы рассмотрим некоторые из этих возможностей.

Расчеты показывают, что наиболее разнооб-

разные и заслуживающие внимания «комбинированные» режимы развития СЦР реализуются в том случае, если скорость поступления воды в систему изменяется скачком в точке, соответствующей некоторому локальному максимуму во временной зависимости потока нейтронов, или, по крайней мере, в точке, близкой к такому максимуму. В случае колебательного режима развития СЦР с более-менее высокой частотой такое приближенное совпадение изменения скорости залива воды с точкой максимума является вполне возможным.

Мы, таким образом, выберем в качестве исходного некоторый типичный и характерный режим колебаний плотности потока нейтронов в изучаемой системе, показанный на рис. 1, а затем будем считать, что в некоторый момент времени $t = t_1 = t_{\max} = 215959,16$ с, соответствующий некоторому локальному максимуму, скорость залива меняется скачком от исходного значения $v = v_1$ до некоторого нового значения $v = v_2$. В зависимости от этого нового значения v_2 в системе оказываются возможными как небольшое изменение исходного режима устойчивых колебаний с переходом в устойчивые колебания другой амплитуды и/или частоты, так и существенное кардинальное изменение режима развития СЦР с переходом в весьма разнообразные режимы с очень большими возможными амплитудами – возможными являются как неустойчивые колебания с затуханием, так и одиночные последующие вспышки либо же сразу переход в режим затухания. Значения физических характеристик системы, соответствующие режиму СЦР, выбранному в качестве исходного типичного режима, следующие:

$$m_1 = 0,34 \text{ г/см}^3, \quad m_2 = 0,36 \text{ г/см}^3, \quad (9)$$

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{ev} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ г/(\text{см}^3 \cdot \text{с})}, \quad (10)$$

$$t_1 = t_{\max} = 215959,16 \text{ с}, \quad v = v_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ г/(\text{см}^3 \cdot \text{с})}, \quad (11)$$

$$\rho_0 = 0,3, \quad \rho_{\max} = 0,000245. \quad (12)$$

На рис. 2 показано типичное возможное изменение исходного режима устойчивых колебаний в случае некоторого небольшого увеличения скорости поступления воды в систему в момент $t = t_1$. В данном случае режим СЦР на втором временном отрезке является аналогичным режимом устойчивых колебаний, но с большей амплитудой. Логарифмический масштаб при этом несколько затушевывает различие первичного и

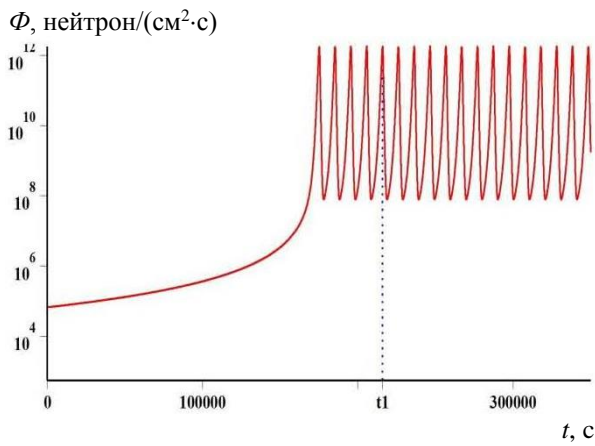


Рис. 1. Типичная зависимость потока нейтронов от времени в случае режима устойчивых колебаний с постоянной амплитудой, принятая в качестве исходной (с параметрами (9) - (12)). Значение скорости залива воды на втором временном отрезке совпадает со значением на первом отрезке: $v_2 = v_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ г/(см³ · с).

вторичного режимов, поскольку в действительности амплитуда колебаний на втором отрезке примерно в три раза больше амплитуды на начальном временном отрезке. Для более наглядной иллюстрации возможных характерных отличий приведем рис. 3, соответствующий несколько иным значениям физических характеристик системы. Здесь уже амплитуда колебаний на втором временном этапе превосходит амплитуду первичных колебаний примерно на семь порядков, т.е. различие в размахе колебаний является

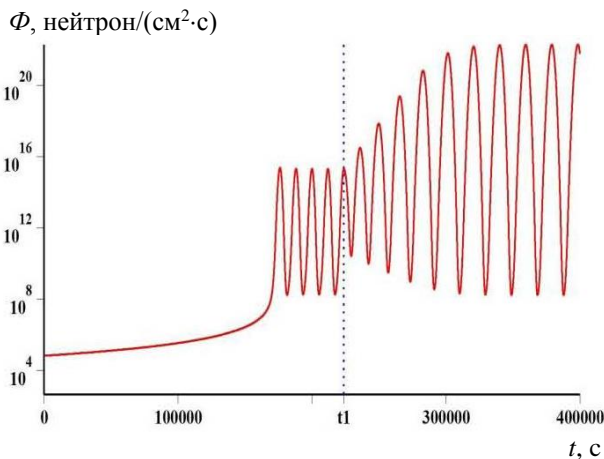


Рис. 3. Временная зависимость потока в случае перехода режима колебаний с постоянной амплитудой в режим колебаний с гораздо большей амплитудой в момент $t_1 = 223815,86$ с. Параметры системы: $m_1 = 0,34$ г/см³, $m_2 = 0,38$ г/см³, $v_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ г/(см³ · с), $v_2 = 3 \cdot 10^{-6}$ г/(см³ · с), $(dm/dt)_{ev} = 4 \cdot 10^{-6}$ г/(см³ · с), $\rho_{max} = 0,000929$.

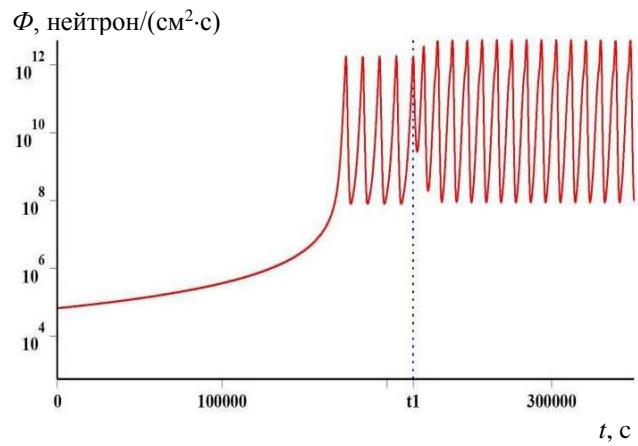


Рис. 2. Зависимость плотности потока нейтронов от времени в случае перехода режима устойчивых колебаний с постоянной амплитудой в аналогичный режим колебаний с большей амплитудой (с параметрами (9) - (12)). Значение скорости залива воды на втором временном отрезке $v_2 = 4,3 \cdot 10^{-6}$ г/(см³ · с).

просто огромным. Таким образом, режим устойчивых колебаний плотности потока нейтронов с постоянной амплитудой может переходить в такой же режим колебаний, но уже с большей амплитудой, причем разница в амплитудах начального и вторичного режимов может быть весьма значительной – отличие может составлять много порядков. Очевидно, что если скорость поступления воды в систему уменьшится, то и амплитуда колебаний плотности потока нейтронов также должна уменьшиться (рис. 4).

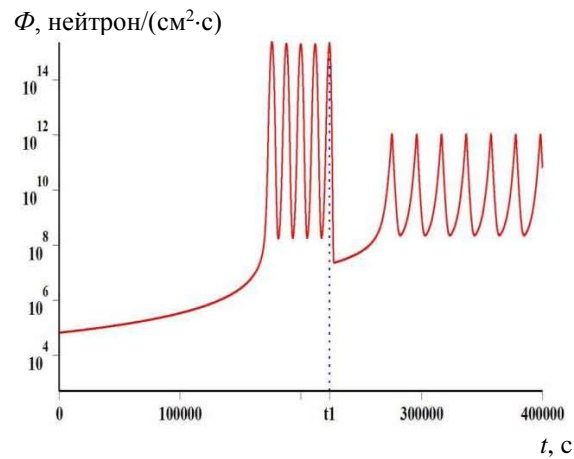


Рис. 4. Временная зависимость потока в случае перехода режима устойчивых колебаний с постоянной амплитудой в аналогичный режим колебаний с меньшей амплитудой и частотой. Параметры системы: $t_1 = 223815,86$ с, $m_1 = 0,34$ г/см³, $m_2 = 0,38$ г/см³, $v_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ г/(см³ · с), $v_2 = 0,2 \cdot 10^{-6}$ г/(см³ · с), $(dm/dt)_{ev} = 4 \cdot 10^{-6}$ г/(см³ · с), $\rho_{max} = 0,000929$.

Здесь следует сделать несколько замечаний. Совершенно понятно, что потоки нейтронов с амплитудами большими 10^{16} - 10^{17} нейтрон/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$) являются нереальными и не могут быть реализованы, в частности в ТСМ. Поскольку такие потоки в некоторых частных случаях являются решениями рассматриваемой нами модели, то это означает, что модель не учитывает некоторых важных для развития процесса СЦР особенностей поведения ТСМ, в частности возможности разрушения материалов. Другие эффекты, ограничивающие величину потока нейтронов, будут отмечены в заключении. Однако важным является то, что незначительные весьма реальные изменения параметров модели (скорости залива воды, максимальной реактивности, скорости испарения) могут привести к аномально большому нереальному росту плотности потока нейтронов.

Следующая возможность изменения режима СЦР реализуется при дальнейшем увеличении

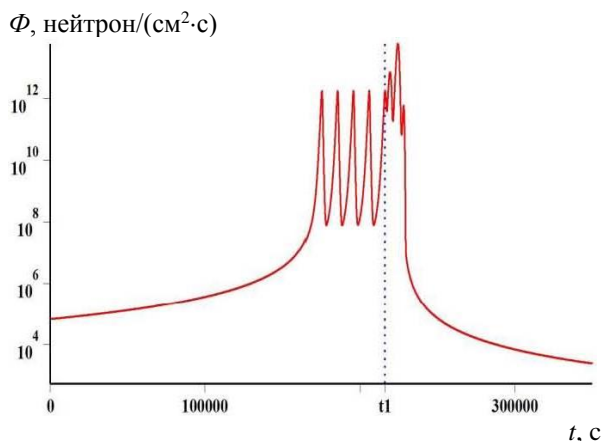


Рис. 5. Зависимость плотности потока нейтронов от времени в случае перехода режима устойчивых колебаний с постоянной амплитудой в режим колебаний с первоначально возрастающей амплитудой и последующим затуханием (с параметрами (9) - (12)). Значение скорости залива на втором временном отрезке $v_2 = 15 \cdot 10^{-6}$ г/($\text{см}^3 \cdot \text{с}$).

При дальнейшем увеличении скорости v_2 поступления воды в систему на втором временном этапе до значений, больших скорости испарения (10), вторичный режим развития СЦР становится режимом одиночной нейтронной вспышки (рис. 7). Как видно из этого рисунка, вспышка потока нейтронов на втором временном этапе развития СЦР может также достигать весьма значительных величин, как и в рассмотренном предыдущем режиме вторичных колебаний. Таким образом, в системе при определенных достаточно разумных с физической точки зрения условиях могут иметь место весьма значительные по величине всплески потока нейтронов,

скорости поступления воды на втором этапе по сравнению с исходным режимом (9) - (12). А именно режим устойчивых колебаний может переходить в режим колебаний с меняющейся во времени амплитудой, причем после некоторого небольшого числа «остаточных» колебаний осуществляется переход в режим простого затухания. Таким образом, дальнейшее увеличение скорости залива воды v_2 на втором временном этапе может приводить к существенно большим и все более возрастающим амплитудам вторичных колебаний с переменной амплитудой (рис. 5 и 6). Причем, если вначале этот рост амплитуды вторичных колебаний является еще более-менее умеренным, то с приближением скорости залива на втором этапе к скорости испарения воды (10) в системе становятся возможными вторичные колебания очень большой амплитуды перед тем, как система переходит в режим затухания потока нейтронов (см. рис. 6).

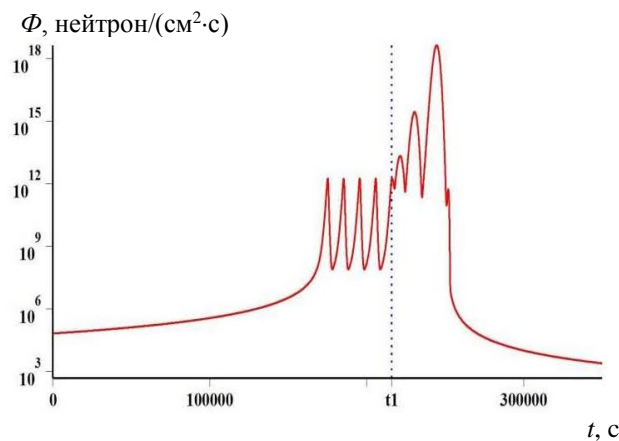


Рис. 6. Зависимость потока нейтронов от времени в случае перехода режима устойчивых колебаний с постоянной амплитудой в режим колебаний с первоначально резко возрастающей амплитудой и последующим затуханием (с параметрами (9) - (12)). Значение скорости залива на втором временном отрезке $v_2 = 18,5 \cdot 10^{-6}$ г/($\text{см}^3 \cdot \text{с}$).

которые могут представлять серьезную опасность (с учетом сделанных выше замечаний). На рис. 5 - 7 система переходит в сверхкритическое состояние с большим количеством воды, чем и объясняется затухание потока нейтронов.

Если на втором временном этапе скорость поступления воды в систему не увеличивается, а, наоборот, уменьшается по сравнению с первоначальным значением (11), то исходный режим устойчивых колебаний с постоянной амплитудой переходит в аналогичный режим колебаний, но уже с меньшей амплитудой и меньшей частотой (большим периодом), как было показано на рис. 4 для типичного случая уменьшения скорости залива воды.

При дальнейшем уменьшении скорости залива и последующем переходе к режиму вытока воды, когда скорость v_2 на втором временном отрезке становится отрицательной, вторичный режим развития СЦР становится простым режимом непосредственного аperiodического затухания, как показано на рис. 8, и особого интереса не представляет. Таким образом, в этом случае вторичные колебания в системе просто исчезают. Действительно, как это обсуждалось в нашей предыдущей работе [2], режим устойчивых коле-

баний является просто невозможным для случая вытока воды из системы. В самом деле, как нетрудно видеть, для осуществления режима колебаний необходим постоянный приток воды в систему, который может возвращать ее в надкритическое состояние. Если же такой приток воды отсутствует, то рано или поздно, очевидно, вода из системы просто вытечет и система перейдет в чисто сухое состояние, которое по определению и по самим физическим свойствам ТСМ мы считаем сугубо подкритическим.

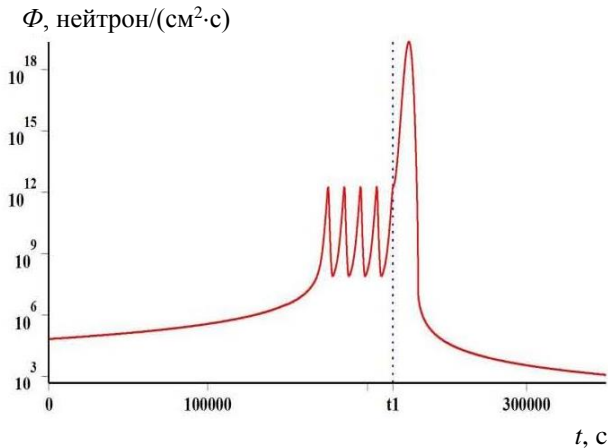


Рис. 7. Зависимость потока нейтронов от времени в случае перехода режима устойчивых колебаний с постоянной амплитудой в режим одиночной нейтронной вспышки большой амплитуды (с параметрами (9) - (12)). Значение скорости залива воды на втором временном отрезке $v_2 = 22 \cdot 10^{-6}$ г/(см³·с).

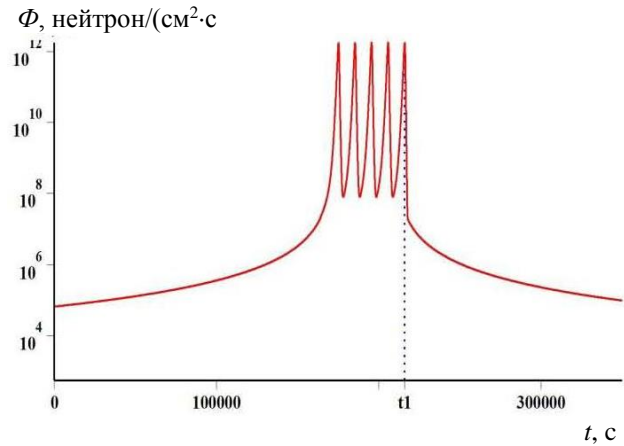


Рис. 8. Зависимость плотности потока нейтронов от времени в случае перехода режима устойчивых колебаний с постоянной амплитудой сразу и непосредственно в режим затухания (с параметрами (9) - (12)). Значение скорости вытока воды на втором временном отрезке $v_2 = -2 \cdot 10^{-6}$ г/(см³·с).

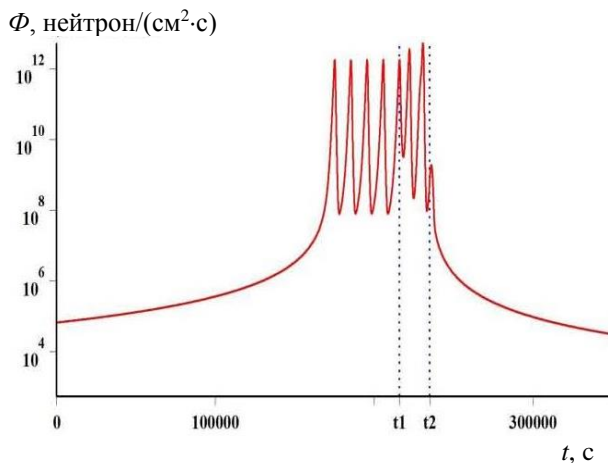


Рис. 9. Временная зависимость потока нейтронов в случае перехода режима устойчивых колебаний в режим колебаний с меняющейся амплитудой и последующей небольшой вспышкой при вытоке воды ($v_3 < 0$). Значения параметров из формул (9) - (12), а также $t_2 = 235000$ с, $v_2 = 4,4 \cdot 10^{-6}$ г/(см³·с), $v_3 = -4,4 \cdot 10^{-6}$ г/(см³·с).

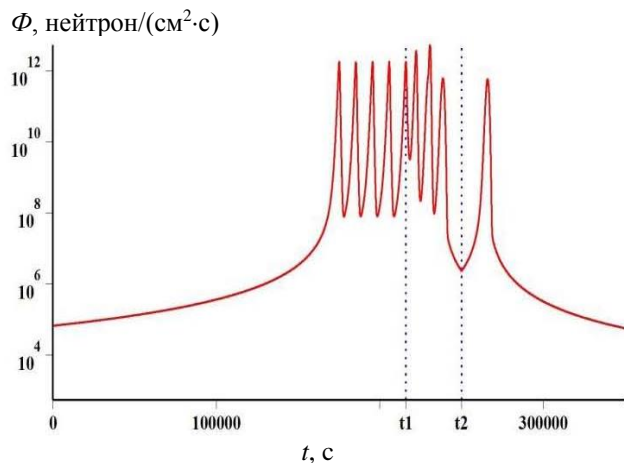


Рис. 10. Временная зависимость потока нейтронов в случае перехода режима устойчивых колебаний в режим колебаний с меняющейся амплитудой и последующей нейтронной вспышкой при вытоке воды ($v_3 < 0$). Значения параметров из формул (9) - (12), а также $t_2 = 250000$ с, $v_2 = 4,4 \cdot 10^{-6}$ г/(см³·с), $v_3 = -4,4 \cdot 10^{-6}$ г/(см³·с).

Однако, согласно [2], при вытекании воды из системы возможен режим одиночной нейтронной вспышки, причем ее амплитуда может при соответствующих условиях достигать весьма значительных величин. Оказывается, что такой режим одиночной вспышки становится возможным при вытекании воды из системы в закритическом состоянии ($v_3 < 0$) на последнем временном этапе развития СЦР, если скорость залива/вытока

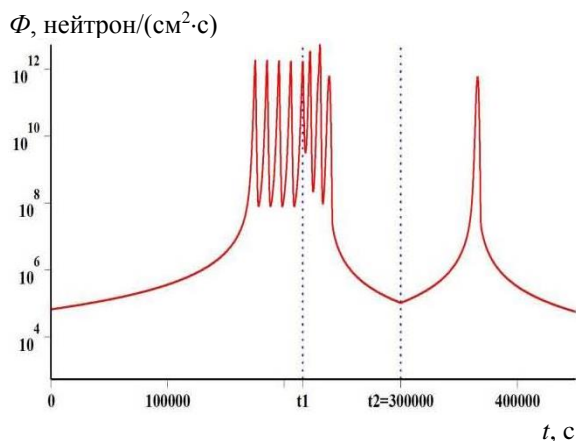


Рис. 11. Временная зависимость потока нейтронов в случае перехода режима устойчивых колебаний в режим колебаний с меняющейся амплитудой и последующей нейтронной вспышкой при вытоке воды ($v_3 < 0$). Значения параметров из формул (9) - (12), а также $t_2 = 300000$ с, $v_2 = 4,4 \cdot 10^{-6}$ г/(см³·с), $v_3 = -4,4 \cdot 10^{-6}$ г/(см³·с).

Как видно из этих рисунков, действительно на последнем интервале при вытоке воды является возможной достаточно интенсивная одиночная вспышка потока нейтронов с амплитудой, достигающей величины амплитуды устойчивых колебаний на первом временном этапе $0 < t < t_1$. При этом чрезвычайно интересной и существенной особенностью данного режима (см. рис. 11 и 12) является возможное наличие весьма длительной временной задержки между началом вытока воды из системы (началом последнего временного интервала) и временем самой нейтронной вспышки. В принципе, при соответствующем выборе физических параметров системы, эта временная задержка может достигать сколь угодно больших величин, что в особенности видно из рис. 12. Таким образом, весьма плавное и незначительное изменение потока нейтронов на протяжении весьма длительного времени, сопровождающее казалось бы медленный и неопасный простой выток воды из системы, вполне может в определенный момент времени смениться интенсивной одиночной нейтронной вспышкой большой амплитуды.

воды поменяется еще один раз в некоторый последующий момент времени $t = t_2 > t_1$ согласно формуле (7). Соответствующие возможные режимы развития СЦР показаны на рис. 9 - 12 для некоторых значений t_2 начала третьего временного интервала, а также для некоторых значений скорости v_3 вытока воды на этом последнем временном этапе.

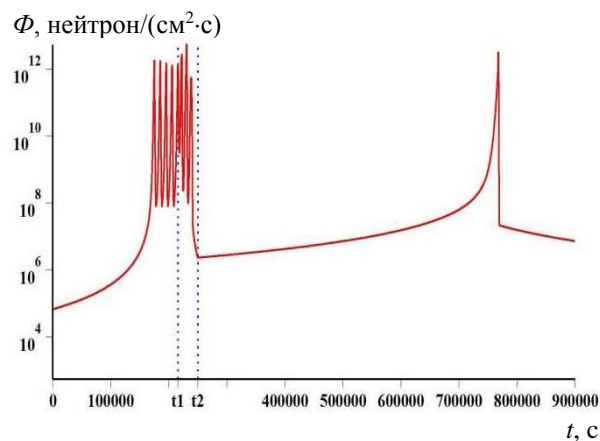


Рис. 12. Временная зависимость потока нейтронов в случае перехода режима устойчивых колебаний в режим колебаний с меняющейся амплитудой и последующей нейтронной вспышкой при вытоке воды ($v_3 < 0$). Значения параметров из формул (9) - (12), а также $t_2 = 250000$ с, $v_2 = 4,4 \cdot 10^{-6}$ г/(см³·с), $v_3 = -0,1 \cdot 10^{-6}$ г/(см³·с).

Основные выводы и заключение

Основным вопросом, который возникает при анализе поведения ТСМ при различных условиях, является следующий: возможно ли в принципе возникновение СЦР в ТСМ. Нам известно, что многие исследователи и практические работники объекта «Укрытие» не верят в эту возможность. Тем не менее впервые объяснение инцидента 1990 г. возникновением СЦР было предложено Фроловым [9]. А после обнаружения «критмассовых» скоплений и расчета их размножающих характеристик [5 - 7] совместно с первыми оценками кинетики протекания реакции стало ясно, что возникновение СЦР в объекте «Укрытие» вполне возможно. Более того, результаты данной работы показывают, что картина развития СЦР согласно представленной модели (см. рис. 5) весьма близка к экспериментально обнаруженной в объекте «Укрытие» в 1990 г. (см. рис. 1 [2]). Таким образом, исходя из вышесказанного можно достаточно определенно говорить о возникновении СЦР в ТСМ объекта «Укрытие».

Итак, в настоящей работе нами были изучены основные характерные особенности возникнове-

ния и развития СЦР, а также ее основные свойства для случая возможного изменения скорости поступления воды в ТСМ (либо ее вытекания). На основе численного анализа и расчетов согласно основной системе уравнений (1) - (3) показано, что изменения скорости залива воды могут приводить к очень существенным и весьма разнообразным изменениям в режимах развития СЦР по сравнению с исходно возможными режимами при постоянной скорости залива.

Так, основные возможные режимы развития СЦР при постоянной скорости залива, такие как режим одиночной вспышки нейтронного потока в системе с различной возможной амплитудой в точке максимума, а также режим колебаний плотности потока нейтронов могут переходить один в другой, так что в системе могут иметь место существенно более сложные и интересные «комбинированные» режимы развития СЦР, когда один из исследованных нами ранее режимов переходит в другой либо когда устойчивые колебания с одной постоянной амплитудой сменяются устойчивыми колебаниями с другой постоянной амплитудой или колебаниями с переменной амплитудой. Все эти сложные «комбинированные» режимы развития СЦР оказываются связанными с возможностью изменения скорости залива либо вытока воды из системы.

В частности, режим устойчивых колебаний плотности нейтронов с постоянной амплитудой может переходить в такой же режим колебаний, но уже с гораздо большей амплитудой, причем разница в амплитудах начального и вторичного режимов может быть весьма значительной – отличие может составлять много порядков. Аналогично этому режим устойчивых колебаний может переходить также в режим колебаний и с гораздо меньшей амплитудой. Также режим устойчивых колебаний может переходить в режим колебаний с меняющейся во времени амплитудой, причем амплитуда этих «вторичных» колебаний может достигать весьма значительных величин. Возможен также переход режима колебаний во вторичный режим одиночной нейтронной вспышки, причем, опять же, амплитуда вспышки потока нейтронов на заключительном временном этапе развития СЦР может быть очень и очень большой.

Таким образом, в системе при определенных, достаточно разумных с физической точки зрения условиях могут иметь место весьма значительные по величине всплески потока нейтронов, которые могут представлять серьезную опасность. Особо интересным и необычным свойством развития СЦР в данных условиях является возможность возникновения достаточно интенсивной одиночной нейтронной вспышки на последнем временном интервале при простом вытекании воды из системы, причем интервал вре-

мени вплоть до возникновения вспышки может быть очень длительным. Т.е. достаточно плавное и незначительное изменение потока нейтронов на протяжении весьма длительного времени, сопровождающее казалось бы медленный и неопасный простой выток воды из системы, вполне может в определенный момент времени смениться интенсивной одиночной нейтронной вспышкой большой амплитуды.

Следует также отметить, что предложенная система уравнений (1) - (3) не учитывает некоторые физические эффекты, которые могут повлиять на кинетику возникновения и протекания СЦР. В частности, не учитывается возможное повышение давления паров воды внутри ТСМ при резком нагреве и зависимость скорости испарения воды от давления, а значит, и от температуры. Данный вопрос достаточно подробно обсуждался в [10], где указывалось на экспериментально доказанную прозрачность пористых ТСМ для паров воды, так что повышение давления в ТСМ будет незначительным (конечно, при реальных потоках нейтронов). В рассмотренной модели не учитываются также температурные эффекты реактивности и запаздывающие нейтроны (см. [10]).

В заключение обсудим возможную связь полученных результатов с экспериментальной ситуацией, которая наблюдалась в объекте «Укрытие» в 1990 г. и может возникнуть после возведения нового безопасного конфайнмента (НБК). Наиболее близкая к экспериментально наблюдаемой (рис. 1 [2]) картина представлена на рис. 5 и 9, где показано изменение амплитуды нейтронных осцилляций при увеличении скорости залива ТСМ водой с последующим переходом в «закритическое» состояние – подкритическое состояние с большим количеством воды в системе. При этом наиболее вероятной является картина рис. 9, где скорость поступления воды в систему увеличивается примерно в два раза.

Несмотря на схожесть экспериментальной и расчетной картин изменения потока нейтронов, однозначного ответа о конечном состоянии ТСМ после нейтронного инцидента не существует. Это связано как с недостаточными экспериментальными данными о завершении инцидента, так и с неточностью всех параметров, используемых при расчетах. Однако анализ 25-летних измерений нейтронного потока в различных помещениях объекта «Укрытие» показывает, что счетность нейтронных детекторов регулярно увеличивается в летнее («сухое») время и уменьшается в осенне-зимний влажный сезон. Такое поведение является характерным для «закритического» состояния с большим количеством воды, хотя частично такое поведение можно также качественно объяснить температурными эффектами реактивности, в частности эффектом Доплера. Также

хорошо известно, что из всех скважин, пробуренных в район помещения 305/2, постоянно вытекает теплая вода, что говорит о постоянном увлажнении ТСМ. Таким образом, многие экспериментальные наблюдения указывают на то, что после нейтронного инцидента ТСМ находятся в подкритическом состоянии с большим количеством воды – «закритическом» состоянии.

Особым вопросом, требующим обсуждения, является вопрос о поведении ТСМ после возведения НБК. Если внутри НБК после его герметизации будет установлен режим постоянной температуры и влажности, то естественным следствием для ТСМ будет их осушение, поскольку одним из основных путей поступления воды в ТСМ в последнее время была конденсация. С формальной точки зрения это означает, что скорость поступления воды в ТСМ становится отрицательной, и вода вытекает. Таким образом, в течение длительного времени в ТСМ поддерживался приблизительно постоянный уровень воды, который определялся скважинами, пробуренными к помещению 305/2. После возведения НБК и

начала осушения вода начнет вытекать из ТСМ, причем известно, что пути вытока воды не ограничиваются скважинами. Подобная ситуация представлена на рис. 11 и 12, откуда видно, что даже после длительного пребывания в закритическом переувлажненном состоянии после начала осушения система должна пройти через надкритическое состояние с возникновением достаточно мощного нейтронного импульса. При этом все проведенные нами расчеты с различными значениями параметров показывают, что амплитуда этого импульса не превышает амплитуды колебаний потока нейтронов, которые предшествовали переходу в закритическое состояние. Если же ТСМ находятся в сухом подкритическом состоянии, то никаких отрицательных последствий осушения, естественно, не возникнет.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность Е. Д. Высотскому и А. В. Михайлову за ценное обсуждение рассматриваемых в статье вопросов и полученных результатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.A. Babenko et al. Fuel-Containing Masses of Chernobyl Unit 4: Multiplying Properties and Neutron Characteristics. *Nucl. Sci. Eng.* 133(3) (1999) 301.
2. В.А. Бабенко, В.Н. Павлович. Изучение возможности возникновения, развития и свойств самоподдерживающейся цепной ядерной реакции в топливосодержащих массах объекта «Укрытие». *Ядерна фізика та енергетика* 18(3) (2017) 254.
3. В.А. Бабенко и др. Исследование размножающих свойств топливосодержащих масс 4-го блока ЧАЭС. Препр. / НАН Украины. Ин-т ядерных исслед.; КИЯИ-97-1. (К., 1997) 30 с.
4. В.А. Бабенко, Л.Л. Енковский, В.Н. Павлович. Ядерная энергетика. Тенденции в мире и особенности Украины. *ЭЧАЯ* 38(6) (2007) 1517.
5. В.А. Бабенко и др. Моделирование массовых и геометрических параметров скопления топливосодержащих материалов в юго-восточной части помещения 305/2 разрушенного 4-го блока ЧАЭС. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля* 9 (2008) 36.
6. Е.Д. Высотский, А.А. Ключников, В.Н. Щербин, В.Б. Шостак. Нейтронно-физические характеристики ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля* 12 (2009) 93.
7. Е.Д. Высотский и др. Ядерно-опасные скопления топливосодержащих материалов в разрушенном четвертом блоке Чернобыльской АЭС. *Радиохимия* 53(2) (2011) 178.
8. В.Б. Шостак, В.Н. Щербин, Е.Е. Олейник. Определение величин параметров модели, описывающей ядерно-опасное скопление топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие». *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля* 22 (2014) 98.
9. В.В. Фролов. Аномальный инцидент 27 - 30 июня 1990 г. в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. *Атомная энергия* 80(3) (1996) 216.
10. О.Я. Верцимаха, В.Н. Павлович. Возникновение и развитие самоподдерживающейся цепной реакции в топливосодержащих массах 4-го блока ЧАЭС. *Ядерная и радиационная безопасность* 1(1) 1999.

В. О. Бабенко^{1,2}, В. М. Павлович^{2,3*}

¹ *Институт теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ, Україна*

² *Институт проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна*

³ *Институт ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

*Відповідальний автор: pavlovich@kinr.kiev.ua

ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ САМОПІДТРИМНОЇ ЛАНЦЮГОВОЇ ЯДЕРНОЇ РЕАКЦІЇ В ПАЛИВОВІСНИХ МАСАХ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» У ВИПАДКУ ЗМІННОЇ ШВИДКОСТІ ЗАЛИВАННЯ ВОДОЮ

Вивчено характерні особливості виникнення та розвитку самопідтримної ланцюгової ядерної реакції (СЛР) у паливовісних масах об'єкта «Укриття», а також її основні властивості для ряду можливих режимів її проті-

кання у випадку змінної швидкості заливання води в систему або її витoku. На основі чисельного аналізу та розрахунків згідно з використаною системою диференціальних рівнянь для головних характеристик системи показано, що зміна швидкості заливання води може приводити до дуже суттєвих і різноманітних змін у режимах розвитку СЛР у порівнянні з можливими режимами при постійній швидкості заливання. Розрахунки, зокрема, показують, що в системі при деяких достатньо розумних з фізичної точки зору умовах можуть мати місце велими значні за величиною сплески потоку нейтронів, які можуть становити серйозну загрозу. Також показано, що збільшення швидкості заливання води в режимі постійних коливань може привести до переходу системи в «закритичний» стан, тобто підкритичний стан із великою кількістю води в системі.

Ключові слова: ланцюгова ядерна реакція, паливовмісні маси, потік нейтронів.

V. A. Babenko^{1,2}, V. N. Pavlovych^{2,3*}

¹ *Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

² *Institute for Safety Problems of NPPs, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

³ *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: pavlovich@kinr.kiev.ua

STUDY OF THE PROPERTIES OF SELF-SUSTAINING NUCLEAR CHAIN REACTION IN THE FUEL-CONTAINING MASSES OF THE “UKRYTTYA” OBJECT FOR THE CASE OF VARYING VELOCITY OF WATER INFLOW

The main peculiarities of ignition and development of self-sustaining nuclear chain reaction (SCR) in fuel-containing masses (FCM) of Chernobyl “Ukryttya” were studied for the case of varying velocity of water incoming into the system or its outcoming. On the basis of analysis and numerical solution of the corresponding system of differential equations for the main characteristics of the system, it was shown that the variations of water inflow could lead to very sufficient and various changes in SCR development comparing to possible modes at constant velocities of water inflow. In particular, the calculations show that the neutron bursts with great amplitude could take place in the system under definite sufficiently reasonable physical conditions. It was also shown that the increase of velocity of water inflow into the FCM in the mode of constant oscillations can lead to transition into “beyond critical” state which is the subcritical state with big quantity of water.

Keywords: nuclear chain reaction, fuel-containing masses, neutron flux.

REFERENCES

1. V.A. Babenko et al. Fuel-Containing Masses of Chernobyl Unit 4: Multiplying Properties and Neutron Characteristics. *Nucl. Sci. Eng.* 133(3) (1999) 301.
2. V.A. Babenko, V.N. Pavlovych. Study of Ignition Possibility, Development and Properties of Self-Sustaining Nuclear Chain Reaction in the Fuel-Containing Masses of the Object “Ukryttya”. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 18(3) (2017) 254. (Rus)
3. V.A. Babenko et al. Investigation of Multiplicating Properties of Fuel Containing Masses of the 4th Block at Chernobyl Atomic Power Plant. Preprint KINR-97-1 (Kiev, 1997) 30 p. (Rus)
4. V.A. Babenko, L.L. Jenkovszky, V.N. Pavlovych. Nuclear Power Industry: Tendencies in the World and Ukraine. *Physics of Particles and Nuclei* 38(6) (2007) 795.
5. V.A. Babenko et al. Modelling of Mass and Geometrical Parameters of a Aggregation of Fuel-Containing Materials in the Southeast Part of a Premise 305/2 Destroyed 4-th unit Chernobyl NPP. *Problemi Bezpeki Atomnikh Elektrostansiy yj Chornobilya* 9 (2008) 36. (Rus)
6. E.D. Vysotskij, A.A. Klyuchnikov, V.N. Shcherbin, V.B. Shostak. Neutron-Physical Characteristics of Nuclear Dangerous Accumulations of Fuel Contained Materials. *Problemi Bezpeki Atomnikh Elektrostansiy yj Chornobilya* 12 (2009) 93. (Rus)
7. E.D. Vysotskii et al. Nuclear-Hazardous Accumulations of Fuel-Containing Materials in the Destroyed Fourth Unit of the Chernobyl NPP. *Radiochemistry* 53(2) (2011) 206.
8. V.B. Shostak, V.N. Shcherbin, E.E. Olejnik. Determination of Size of Parameters of Model of Describing Nuclear-Dangerous Accumulation of Fuel Contained Materials in Object ‘Ukryttya’. *Problemi Bezpeki Atomnikh Elektrostansiy yj Chornobilya* 22 (2014) 98. (Rus)
9. V.V. Frolov. Anomalous Incident on June 27 - 30, 1990 in the Object ‘Cover’ at the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Atomic Energy* 80(3) (1996) 215.
10. O.Ya. Vertsimakha, V.N. Pavlovych. Ignition and Development of Self-Sustained Chain Reaction in Fuel Containing Masses of 4-th Block of the Chernobyl NPP. Nuclear and Radiation Safety 1(1) (1999). (Rus)

Надійшла 19.07.2017

Received 19.07.2017