

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ОДНОГРУППОВАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ РЕАКТОРА С РАСШИРЕННОЙ ОБЛАСТЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ

Е.Б. Копосов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: evgkuposov@gmail.com

Предложена модифицированная одногрупповая модель кинетики реактора, в которой эффективная постоянная распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов является функцией возмущения реактивности. Показано, что причиной ее изменения является трансформация спектров ядер-предшественников запаздывающих нейтронов. Описаны и апробированы алгоритмы нахождения указанной зависимости. Рассмотрены варианты аппроксимации получаемой функции полиномами различной степени, оценены погрешности нахождения обратного периода при аппроксимациях. Показано, что даже использование простой линейной аппроксимации позволяет применять модифицированную одногрупповую модель вплоть до мгновенной критичности при разумном уровне погрешностей в отличие от одногрупповых моделей с неизменными постоянными распада ядер-предшественников. Показано, что использование модифицированной одногрупповой модели кинетики позволяет рассчитывать период реактора с существенно большей точностью, чем по принятой формуле, значительно расширяя область ее применения.

Ключевые слова: ядерный реактор, реактивность, кинетика, динамика, процесс, расчет, модель.

MODIFIED ONE-GROUP MODEL OF REACTOR KINETICS WITH EXTENDED FIELD OF APPLICATION

E.B. Kuposov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: evgkuposov@gmail.com

The modified one-group model of reactor kinetics is proposed in which the effective decay constant of precursor nuclei of delayed neutrons is a function of perturbation in reactivity. It is shown that a cause of its variation is the transformation of spectra of delayed-neutron precursor nuclei. The algorithms for finding the mentioned function are described and approved. The variants of the obtained function approximation with different-degree polynomials are considered; the errors of finding the reverse period with these approximations are estimated. It is shown that even using the simple linear approximation allows the modified one-group model to be applied up to the prompt criticality with the reasonable error value in contrast to the one-group models with unchangeable decay constants of precursor nuclei. It is shown that using the modified one-group model of kinetics makes it possible to calculate the reactor period with the substantially higher accuracy than using the conventional formula, which extends significantly the area of its application.

Keywords: nuclear reactor, reactivity, kinetics, dynamics, process, calculation, model.

Использование шестигрупповой модели кинетики реактора [1, 2]

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \sum_i \lambda_i c_i + q, \\ \frac{dc_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\ell} n - \lambda_i c_i, \quad i = 1 \dots 6, \end{aligned} \quad (1)$$

позволяет с достаточной точностью описывать переходные процессы в широком диапазоне возмущающих воздействий по реактивности.

Однако широко используется и одногрупповое приближение [3]

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \lambda c + q, \\ \frac{dc}{dt} &= \frac{\beta}{\ell} n - \lambda c,\end{aligned}\tag{2}$$

снижающее порядок системы дифференциальных уравнений с седьмого до второго. Но при этом упрощение модели приводит, как обычно, к сужению области ее применения. В зависимости от способа сведения шести постоянных распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов λ_i к одной эффективной постоянной распада λ используют эффективное значение λ для малых возмущений реактивности из соотношения

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\beta} \sum_i \frac{\beta_i}{\lambda_i},$$

которое при делении ^{235}U тепловыми нейтронами равно $0,0767 \text{ с}^{-1}$ [1].

Для больших возмущений используют выражение для эффективного значения постоянной распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов

$$\lambda' = \frac{1}{\beta} \sum_i \beta_i \lambda_i,$$

которое при делении ^{235}U тепловыми нейтронами равно $0,405 \text{ с}^{-1}$ [1].

Оба выражения для λ и λ' получают из уравнения обратных часов при условии, что соотношение между асимптотическим периодом реактора и реактивностью сохраняется таким же, как при шести группах запаздывающих нейтронов, но в первом случае для малых реактивных возмущений (а следовательно, и малых ω — установившихся обратных периодах), а во втором — для больших.

Представленное на рис. 1 [4] сравнение зависимостей установившегося обратного периода от положительного возмущения реактивности для обоих вариантов постоянной распада (кривые 1 и 3 — для λ' и λ) с результатами шестигруппового приближения (кривая 2) иллюстрирует вышесказанное — при малых $\hat{\rho}_0$ зависимости $\omega(\hat{\rho}_0)$ для λ и шести групп запаздывающих нейтронов близки, при высоких значениях $\hat{\rho}_0$ зависимость для λ' стремится к зависимости для шести групп запаздывающих нейтронов.

Более информативную картину с оценкой области возможного применения при заданной предельной погрешности можно получить, построив графики относительных погрешностей нахождения установившегося обратного периода ω для обоих одногрупповых приближений

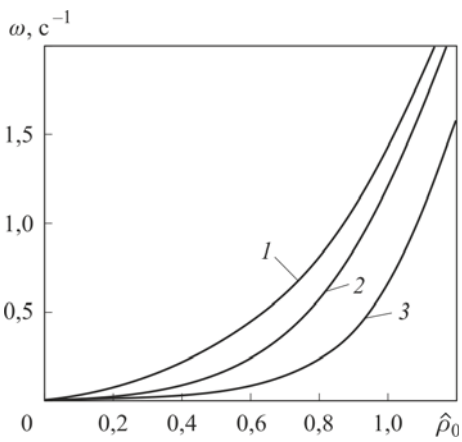


Рис. 1. Зависимости обратного периода реактора ω от нормированного положительного возмущения реактивности $\hat{\rho}_0 = \rho/\beta$ для шестигруппового (кривая 2) и для одногрупповых приближений (кривая 3 для λ и кривая 1 для λ')

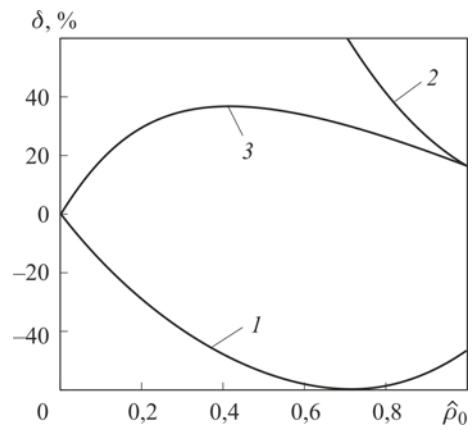


Рис. 2. Относительные погрешности нахождения обратного периода для одногрупповых приближений (кривые 1 – λ , 2 – λ' и 3 – для λ , вычисляемой по уравнению (4))

(рис. 2). Использование параметра обратного периода для оценки погрешности одногрупповой модели (2) в сравнении с шестигрупповой объясняется тем, что именно этот параметр определяет скорость происходящих процессов и в наибольшей степени основную часть переходных процессов в области до мгновенной критичности. И именно этот параметр использовался для получения известных соотношений для λ и λ' . При этом, конечно, даже нулевая погрешность нахождения обратного параметра не обеспечивает полной идентичности процессов, описываемых различными моделями.

Отметим, что в области малых возмущений погрешность одногруппового приближения (рис. 2, кривая 1) быстро растет по модулю с увеличением $\hat{\rho}_0$ и достигает недопустимых значений для модели с λ при не слишком больших значениях $\hat{\rho}_0$, а в области высоких возмущений погрешность выходит на допустимый уровень ($\hat{\rho}_0 = \beta$) для модели с λ' (см. рис. 2, кривая 2).

Одновременно с этим в широкой области промежуточных значений $\hat{\rho}_0$ погрешности применения одногрупповых приближений недопустимо велики и одногрупповое приближение не может быть использовано для адекватного описания переходных процессов. Если ограничить допустимую относительную погрешность значением, например 20 %, то возможная область применения одногрупповой модели при заданном уровне допустимой погрешности исключает интервал возмущений $0,13 < \hat{\rho}_0 < 0,98$, т.е. большую часть области до мгновенной критичности. Здесь и далее $\hat{\rho}_0$ – нормированное (на долю запаздывающих нейтронов β) значение начального возмущения.

Физически причина изменения эффективной постоянной распада при изменении возмущения состоит в изменении структуры групп ядер-предшественников [5] — изменении относительного вклада различных групп ядер-предшественников, или, пользуясь терминологией [5], спектра. Действительно, при отсутствии возмущения в стационарном состоянии концентрацию ядер-предшественников можно определить из уравнений для c_i системы (1) при равенстве производной нулю:

$$c_i = \frac{\beta_i n}{\ell \lambda_i}.$$

При наличии ступенчатого возмущения по реактивности в области установившегося периода выполняется соотношение [6]

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{c_i}{T} = c_i \omega,$$

и тогда значение концентрации ядер-предшественников определяется выражением

$$c_i = \frac{\beta_i n}{\ell (\lambda_i + \omega)},$$

в котором концентрация ядер-предшественников в области установившегося периода является функцией от установившегося обратного периода, а следовательно, и возмущения реактивности.

На рис. 3 приведены зависимости концентрации различных групп ядер-предшественников (нормированных на полную концентрацию всех групп ядер-предшественников) от реактивности в области установившегося периода. Значения установившегося обратного периода вычислялись по заданному возмущению $\hat{\rho}_0$ из уравнения обратных часов

$$\hat{\rho}_0 = \ell \omega + \sum_i \frac{\beta_i \omega}{\omega + \lambda_i}.$$

Из приведенных зависимостей следует, что относительный вклад наиболее долгоживущих групп (первая и вторая, на рис. 3 кривые 1 и 2

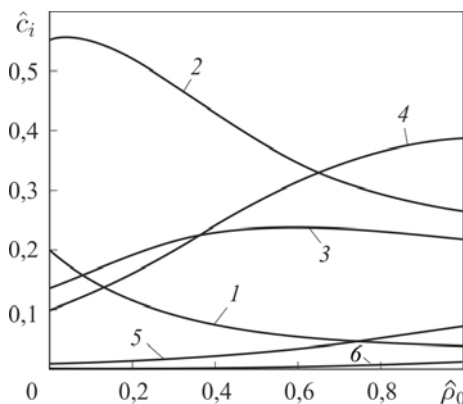


Рис. 3. Изменение нормированной концентрации отдельных групп ядер-предшественников $\hat{c}_i = c_i/c$ в области установившегося периода от нормированного положительного возмущения реактивности

соответственно) однозначно уменьшается с увеличением подаваемого положительного возмущения, что легко объясняется увеличивающейся скоростью процесса. И наоборот, влияние групп с малым временем жизни (четвертая, пятая и шестая — кривые 4, 5 и 6 соответственно) — возрастает.

Представленная на рис. 3 трансформация относительных вкладов различных групп ядер-предшественников с изменением возмущения, осуществляющаяся по-разному в зависимости от среднего времени жизни для различных групп, приводит к изменению среднего времени жизни ядер-предшественников в целом, а следовательно, к изменению эффективной постоянной распада λ , которая может быть найдена из соотношения

$$\lambda = \frac{\sum_i \lambda_i c_i}{\sum_i c_i}. \quad (3)$$

Проблема расширения диапазона применения одnogрупповых приближений может быть решена при использовании эффективной постоянной распада λ , зависящей от значения возмущения ρ_0 . Простейшим вариантом является линейное изменение λ от значения, соответствующего малым возмущениям $\lambda = 0,0767 \text{ с}^{-1}$ при $\hat{\rho}_0 = 0$, до значения, соответствующего большим возмущениям $\lambda' = 0,405 \text{ с}^{-1}$ для $\hat{\rho}_0 = \beta$:

$$\lambda(\hat{\rho}_0) = \lambda + (\lambda' - \lambda)\hat{\rho}_0. \quad (4)$$

График погрешности в зависимости от подаваемого возмущения для постоянной распада, изменяющейся согласно (4), приведен на рис. 2 (кривая 3). Видно, что уровень максимальной относительной погрешности заметно снизился (по модулю почти вдвое), однако получающиеся при этом погрешности все еще слишком велики для практического использования и реального расширения области применения одnogрупповой модели не происходит.

Существенно лучших результатов можно достичь, задав такую функцию изменения $\lambda(\hat{\rho}_0)$, которая обеспечивала бы зависимость $\omega(\hat{\rho}_0)$ для одной группы запаздывающих нейтронов, в идеале совпадающую с аналогичной зависимостью для шести групп запаздывающих нейтронов (см. рис. 1, кривая 2).

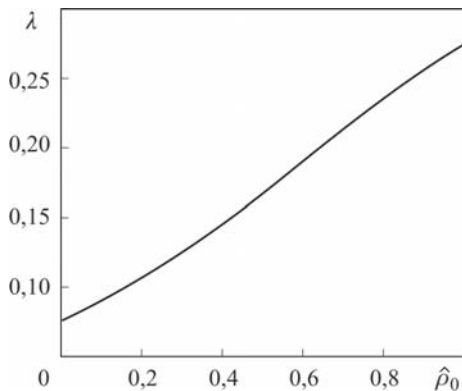
Из уравнения обратных часов в одnogрупповом приближении

$$\rho = \ell\omega + \frac{\beta\omega}{\omega + \lambda}$$

можно выразить искомую функцию

$$\lambda = \frac{\ell\omega + \beta - \rho}{\rho - \ell\omega}\omega,$$

Рис. 4. Функция $\lambda(\hat{\rho}_0)$, обеспечивающая зависимость обратного периода реактора ω от нормированного положительного возмущения реактивности, соответствующую шестигрупповому приближению (кривая 2, см. рис. 1)



которая при известной для шестигрупповой модели зависимости $\omega(\rho)$ превращается в функцию, зависящую только от начальной реактивности $\lambda = f(\rho_0)$. Полученная зависимость представлена на рис. 4. К сожалению, аналитическое выражение для эффективной постоянной распада получить не представляется возможным, поскольку $\omega(\rho)$ для шестигруппового приближения — уравнение седьмой степени по ω . Зависимость $\omega(\rho)$ берется из численного расчета.

Эти же результаты можно получить из рассмотренных ранее зависимостей для относительных вкладов различных групп ядер-предшественников (см. рис. 3), для которых эффективная постоянная распада может быть найдена из соотношения (3).

Найденная зависимость $\lambda(\rho_0)$ может быть аппроксимирована тем или иным способом [7] и в зависимости от задачи в том или ином диапазоне возмущений. Поскольку в области положительных возмущений до мгновенной критичности зависимость в достаточной степени близка к линейной, в настоящей работе рассматривалась аппроксимация полиномами 1, 2 и 3-й степени в интервале возмущений от 0 до β . Расширение области аппроксимации за пределы мгновенной критичности не представляет никаких проблем, но практически нерационально, так как в этой области одnogрупповая модель с $\lambda' = 0,405 \text{ с}^{-1}$ показывает хорошие результаты. Более того, также хорошие результаты в этой области дает использование элементарного уравнения кинетики, погрешности применения которого тем меньше, чем больше значение возмущения.

На рис. 5 приведены зависимости относительной погрешности нахождения обратного периода при указанных аппроксимациях. Естественно, что аппроксимация более высокого порядка дает лучшие результаты. При аппроксимации полиномом 3-й степени погрешность нахождения обратного периода не выходит за пределы 1%, при аппроксимации полиномом 2-й степени — за 2%. Линейная аппроксимация дает максимальную погрешность менее 7% в очень узком диапазоне малых возмущений, а в основном не превышает 5%. Следует

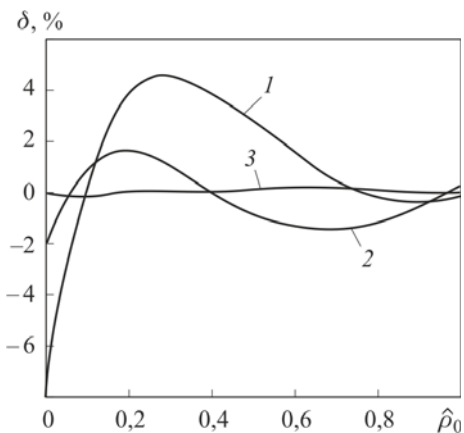


Рис. 5. Относительные погрешности нахождения обратного периода для λ , изменяющейся согласно рис. 4 при аппроксимации функции $\lambda(\hat{\rho}_0)$ полиномами 1-й (кривая 1), 2-й (кривая 2) и 3-й (кривая 3) степеней

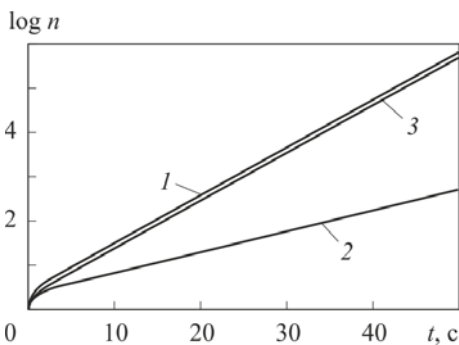


Рис. 6. Изменение нормированной плотности нейтронного потока для шестигрупповой модели (кривая 1), одногрупповой с $\lambda=0,0767 \text{ с}^{-1}$ (кривая 2) и одногрупповой модифицированной модели (кривая 3) при $\hat{\rho}_0=0,6, \ell = 10^{-3} \text{ с}$

отметить, что эта погрешность обусловлена исключительно погрешностями аппроксимации зависимости $\lambda(\hat{\rho}_0)$ и при задании соответствующих значений весовых коэффициентов при аппроксимации максимальная погрешность может быть уменьшена. Совершенно очевидно также, что уменьшение интервала возмущений, для которого проводится аппроксимация, также приводит к уменьшению погрешностей, тем более существенному, чем более узким становится диапазон изменения возмущений.

Ранее указывалось, что даже полное соответствие обратных периодов модифицированной одно- и шестигрупповой моделей не обеспечивает полной идентичности процессов. Это проявление заметно только в начальной части переходного процесса сразу после скачка на мгновенных нейтронах, когда слагаемые с переходными периодами еще не выработались. В дальнейшем по мере выхода обеих моделей на установившийся период погрешность уменьшается и в широком временном интервале остается в разумных пределах.

На рис. 6 в качестве конкретного примера приведено изменение плотности нейтронного потока, представленное в логарифмическом масштабе, при $\hat{\rho} = 0,6$ и $\ell = 10^{-3} \text{ с}$. Видно практически полное совпадение модифицированной одногрупповой модели (кривая 3) с шестигрупповой (кривая 1) в широком временном интервале. Параллельность зависимостей 1 и 3 подтверждает равенство установившихся периодов, а их незначительная сдвигка обусловлена как раз отличием процессов в одногрупповом и многогрупповом приближениях на начальном участке переходного процесса, когда слагаемые с переходными периодами еще не выработались. Точное описание этого участка

в рамках одnogрупповой модели принципиально невозможно. Одnogрупповая модель с постоянной $\lambda = 0,0767 \text{ с}^{-1}$ (кривая 2) не может по сути представлять указанный переходной процесс с таким возмущением и в таком временном интервале.

В силу объективных отличий переходных процессов даже при идеальной аппроксимации необходимой функции для λ (см. рис. 4) представляется целесообразным применять простейшую линейную зависимость

$$\lambda = a + b\hat{\rho}_0.$$

Это позволит не слишком усложнять модель и увеличивать время счета, которое, несомненно, должно принципиально возрасти по сравнению с одnogрупповой моделью с постоянным значением λ . Однако использование даже линейной зависимости существенно расширяет возможности одnogрупповой модели. В проведенных расчетах коэффициенты a и b определялись по методу наименьших квадратов в интервале $\hat{\rho}_0$ от нуля до единицы и имели значения $a = 0,0711$ и $b = 0,206$.

Представление эффективной постоянной распада в одnogрупповой модели, функционально зависящей от начального возмущения по реактивности, позволяет, кроме того, существенно точнее определять установившийся период по известной формуле [8]

$$T = \frac{\beta - \rho}{\rho \lambda}, \quad (5)$$

но с учетом функциональной зависимости $\lambda = f(\rho_0)$.

Для линейной аппроксимации это

$$T = \frac{\beta - \rho}{\rho(a + b\hat{\rho})}. \quad (6)$$

На рис. 7 приведены зависимости относительных погрешностей нахождения установившегося периода с использованием формулы (5) для установившегося периода реактора для одnogрупповой модели с $\lambda = 0,0767 \text{ с}^{-1}$ (кривая 1) и модифицированной одnogрупповой согласно формуле (6) (кривая 2). В первом случае относительная погрешность достигает 100% уже при $\hat{\rho}_0 = 0,5$, во втором — не превышает 20% в интервале нормированной реактивности от 0 до 0,65. Аналогичная погрешность (20%) достигается при использовании общепринятой формулы (5) уже при $\hat{\rho}_0 \approx 0,13$. Здесь же для сравнения приведены результаты расчета установившегося периода для аппроксимации λ полиномами 2-й и 3-й степени (кривые 3 и 4 соответственно). Видно, что для расчета установившегося периода повышение степени аппроксимационного полинома не дает такого заметного улучшения

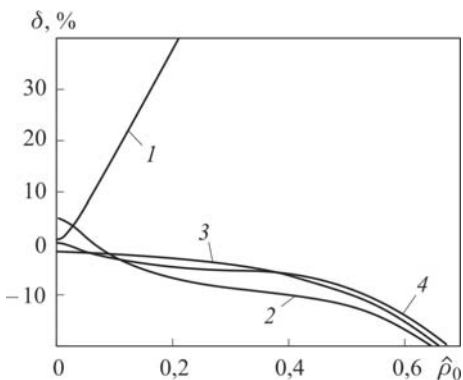


Рис. 7. Относительная погрешность использования формулы (5) для однотипной модели с $\lambda = 0,0767 \text{ с}^{-1}$ (кривая 1) и однотипной модифицированной модели при использовании аппроксимации функции $\lambda(\hat{\rho}_0)$ полиномами 1-й (кривая 2), 2-й (кривая 3) и 3-й степеней (кривая 4)

результатов, как при оценке относительной погрешности нахождения обратного периода.

Изменение времени жизни мгновенных нейтронов не приводит к сколь-либо заметному изменению полученных результатов, что совершенно ожидаемо, поскольку скорость процессов в области до мгновенной критичности определяется практически лишь запаздывающими нейтронами (см. известные зависимости установившегося периода разгона реактора от возмущения реактивности [9, 10]).

Например, для возмущения $\hat{\rho}_0 = 0,2$ относительная погрешность определения T по формуле (6) составляет 5,6% (см. рис. 7) для времени жизни мгновенных нейтронов $\ell = 10^{-3} \text{ с}$. Уменьшение времени жизни до $\ell = 10^{-6} \text{ с}$ приводит лишь к незначительному изменению этой погрешности до 2,5%. При этом, конечно, само значение расчетного установившегося периода не зависит от ℓ и не изменяется, а меняется истинное значение установившегося периода, рассчитываемое из решения системы (1).

Конечно, зависимости $T(\hat{\rho}_0)$ для различных времен жизни запаздывающих нейтронов и в области $0 < \hat{\rho}_0 < 1$ не сливаются реально в единую кривую, просто отличие слишком невелико и тем меньше, чем меньше $\hat{\rho}_0$. Для сравнения — погрешность определения установившегося периода по формуле (5) для того же возмущения $\hat{\rho}_0 = 0,2$ дает относительную погрешность 37,1...41,6% при изменении времени жизни мгновенных нейтронов от 10^{-3} с до 10^{-6} с .

В большей степени заметно влияние времени жизни мгновенных нейтронов при больших возмущениях. Так, при $\hat{\rho}_0 = 0,7$ погрешность использования формулы (5) равна 23,9% (см. рис. 7) для $\ell = 10^{-3} \text{ с}$, в то время как при уменьшении времени жизни до $\ell = 10^{-6} \text{ с}$ эта величина изменяется до 7,9%. Это неудивительно, поскольку при приближении ρ к β расслоение кривых $T(\rho)$ становится все более заметным и так как используемая линейная аппроксимация λ дает заниженные (в этой области возмущений) значения периода реактора, то при уменьшении времени жизни мгновенных нейтронов реальное значение установившегося периода T уменьшается (см. зависимость $T(\rho)$ [4]).

Здесь сказывается еще тот фактор, что изменение времени жизни запаздывающих нейтронов, строго говоря, изменяет и зависимость λ от $\hat{\rho}_0$, рассчитываемую по формуле (3), причем это отличие заметно именно в области значений ρ , близких к β . Следовательно, могут изменяться и аппроксимационные коэффициенты, а возможно, и вид аппроксимации, поскольку уменьшение времени жизни мгновенных нейтронов приводит к увеличению нелинейности функции $\lambda(\rho)$ в рассматриваемом диапазоне изменения реактивности. Однако даже без учета этой уточняющей корректировки видно, что влияние времени жизни мгновенных нейтронов на полученные в работе результаты не слишком существенно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов / пер. с англ. М.: Атомиздат, 1975. 400 с.
2. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов / пер. с англ. М.: Атомиздат, 1967. 427 с.
3. Дементьев Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов: М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
4. Копосов Е.Б. Кинетика ядерных реакторов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 68 с.
5. Наумов В.И. Физические основы безопасности ядерных реакторов. М.: МИФИ, 2003. 156 с.
6. Саркисов А.А., Пучков В.Н. Физика переходных процессов в ядерных реакторах / под ред. А.А. Саркисова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 232 с.
7. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / пер. с англ. М., Мир, 1973. 958 с.
8. Харрер Дж. М. Техника регулирования ядерных реакторов / пер. с англ. М., Атомиздат, 1967. 492 с.
9. Меррей Р. Физика ядерных реакторов / пер. с англ. М.: Изд-во глав. управ. по использованию атомной энергии при Совмине СССР, 1959. 292 с.
10. Научно-технические основы управления ядерными реакторами / И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов; под общ. ред. акад. Н.А. Доллежалы. М.: Энергоиздат, 1981. 360 с.

REFERENCES

- [1] Hetrick D.L. Dynamics of nuclear reactors. Chicago, Univ. Chicago Press, 1971. 552 p. (Russ. ed.: Khetrik D. Dinamika yadernykh reaktorov. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 400 p.).
- [2] Keepin G. R. Physics of nuclear kinetics. Addison-Wesley, Reading, MA, 1965. (Russ. ed.: Kipin D.R. Fizicheskie osnovy kinetiki yadernykh reaktorov. Atomizdat Publ., 1967. 427 p.).
- [3] Dement'ev B.A. Kinetika i regulirovanie yadernykh reaktorov [Kinetics and control of nuclear reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 272 p.
- [4] Koposov E.B. Kinetika yadernykh reaktorov [Kinetics of nuclear reactors]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2005. 68 p.
- [5] Naumov V.I. Fizicheskie osnovy bezopasnosti yadernykh reaktorov [Physical principles of nuclear reactor safety]. Moscow, MIFI Publ., 2003. 156 p.

- [6] Sarkisov A.A., Puchkov V.N. Fizika perekhodnykh protsessov v yadernykh reaktorakh [Physics of transient processes in nuclear reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 232 p.
- [7] Himmelblau D.M. Process analysis by statistical methods. New York, Wiley, 1968. 460 p. (Russ. ed.: Khimmel'blau D. Analiz protsessov statisticheskimi metodami. Moscow, Mir Publ., 1973. 958 p.).
- [8] Harrer J.M. Nuclear reactor control engineering. Van Nostrand, 1963. 587 p. (Russ. ed.: Kharrer D.M. Tekhnika regulirovaniya yadernykh reaktorov. Moscow, Atomizdat Publ., 1967. 492 p.).
- [9] Murrey R.D. Nuclear reactor physics. Prentice-Hall, 1957. 317 p. (Russ. ed.: Merrey R. Fizika yadernykh reaktorov. Moscow, Atomizdat Publ, 1959. 292 p.).
- [10] Emel'yanov I.Y., Efanov A.I., Konstantinov L.V. Nauchno-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernymi reaktorami [Scientific and technical principles of nuclear reactor control]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 360 p.

Статья поступила в редакцию 29.03.2013

Евгений Борисович Копосов — канд. техн. наук, доцент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 55 научных работ в области гидродинамики, теплофизических процессов, моделирования ядерных энергетических установок.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

E.B. Kopusov — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Nuclear Reactors and Plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 55 publications in the field of hydrodynamics, thermophysical processes, simulation and control of nuclear power plants.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.