

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСОВ В МОДИФИЦИРОВАННОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КИНЕТИКИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА И ПОДКРИТИЧЕСКОГО БЛОКА

А.В. Гулевич, О.Ф. Кухарчук, А.И. Брежнев

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1



Обсуждается применение модифицированной интегральной модели нейтронной кинетики для расчета характеристик импульсов в связанной реакторной системе, состоящей из импульсного реактора и подкритического блока. Модель основана на использовании соответствующих ядер перехода интегрального уравнения для мощности реактора и функции Грина для подкритического блока.

Для замыкания математической модели в качестве обратной связи «реактивность - мощность» используются приближения «безынерциального» гашения реактивности и скачка на мгновенных нейтронах.

Получены аналитические соотношения, позволяющие с достаточной для инженерной практики точностью оценивать основные характеристики связанной системы, такие как энергия и максимальная мощность импульсов в реакторе и подкритическом блоке.

Выполненные расчеты показали пригодность аналитических зависимостей энергетических характеристик системы от коэффициента влияния блока на реактор, времени жизни нейтронов в реакторе и «временной» постоянной блока при фиксированном значении энергии импульса в реакторе. Для реактора полученное соотношение справедливо во всей области изменения параметров системы, а для подкритического блока оно пригодно только для системы с быстрым спектром нейтронов в реакторе и тепловым спектром нейтронов в блоке, когда реализуется так называемое приближение «дельтаобразного» импульса в реакторе. В случае, если такое приближение несправедливо, то используется «гауссово» приближение к форме реакторного импульса, для которого также получены уточненные аналитические формулы для оценки максимальной мощности импульса в блоке.

Полученные аналитические соотношения могут быть использованы для оптимизации параметров связанных реакторно-лазерных систем.

Ключевые слова: нейтронная кинетика, лазерная система с накачкой от ядерного реактора, энергия и максимальная мощность импульса мощности.

ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ

Использование модифицированной интегральной модели кинетики [1, 2, 19, 20] представляется наиболее подходящим для описания кинетики нейтронов в системе «быстрый импульсный реактор - тепловой подкритический блок» [10 – 18].

© А.В. Гулевич, О.Ф. Кухарчук, А.И. Брежнев, 2016

Эта модель в общем виде записывается в форме [2]

$$\begin{aligned} N_r(t) &= \int_0^t [\alpha_{rr}(t-\tau) + \alpha_{rr}^s(t-\tau) + \alpha_{rb}(t-\tau)] \cdot N_r(\tau) d\tau, \\ N_b(\mathbf{r}, t) &= \int_0^t G_{br}(\mathbf{r}, t-\tau) \cdot N_r(\tau) d\tau. \end{aligned} \quad (1)$$

Основным при выводе уравнений (1) являлось предположение о том, что в реакторе в любой момент времени успевает сформироваться собственное распределение нейтронов, и при этом справедливо разделение переменных на амплитудную и форм-функции (как это принято при выводе обычных уравнений точечной модели кинетики) [3, 10 – 16]. На пространственно-временное распределение нейтронов в глубокоподкритическом блоке таких ограничений не налагалось.

В уравнениях (1) $N_r(t)$ – мощность (или интенсивность делений) реактора в момент времени t ; $N_b(\mathbf{r}, t)$ – мощность подкритического блока в точке с координатой \mathbf{r} в момент времени t ; $G_{br}(\mathbf{r}, t)$ имеет смысл пространственно-временного распределения вторичных делений в подкритическом блоке при условии, что первичное деление произошло в ядерном реакторе (аналог функции Грина для подкритического блока). Интеграл от этой функции по времени описывается пространственной зависимостью

$$M(\mathbf{r}) = \int_0^\infty G_{br}(\mathbf{r}, t) dt,$$

которая показывает распределение полного числа делений, происшедших в точке с координатой \mathbf{r} подкритического блока, нормированное на одно деление в реакторе. Если проинтегрировать эту функцию по объему блока V_b , то получится нулевой момент функции Грина – полное число делений в подкритическом блоке, нормированное на одно деление в реакторе:

$$M_b = \int_{V_b} M(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = \int_0^\infty \int_{V_b} G_{br}(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} dt. \quad (2)$$

При дальнейшем рассмотрении понадобится характеристика этого процесса, определяемая как «временная» постоянная блока:

$$l_b = \int_0^\infty \int_{V_b} t G_{br}(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} dt \Big/ \int_0^\infty \int_{V_b} G_{br}(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} dt. \quad (3)$$

Для функций $\alpha_{rr}(t)$, $\alpha_{rr}^s(t)$ и $\alpha_{rb}(t)$ требуется специальное пояснение.

Функция $\alpha_{rr}(t)$ – это распределение вторичных делений в активной зоне реактора при условии, что первичное деление произошло также в активной зоне; при этом предполагается, что подкритический блок полностью отсутствует. Интеграл от этой функции имеет ясный физический смысл эффективного коэффициента размножения в «голом» реакторе – k_{rr} , а среднее время жизни нейтронов в таком реакторе выражается следующим образом [2]:

$$l_{rr} = \int_0^\infty t \alpha_{rr}(t) dt \Big/ \int_0^\infty \alpha_{rr}(t) dt.$$

Функция $\alpha_{rr}^s(t)$ – распределение вторичных делений в активной зоне реактора при условии, что первичное деление произошло в активной зоне, далее нейтроны деления попали в подкритический блок, отразились (и, возможно, замедлились там), а затем «вернулись» в реактор и вызвали там деления. Таким образом, функция $\alpha_{rr}^s(t)$ описы-

вает влияние на реактор подкритического блока как отражателя и замедлителя нейтронов. В монографии [2] интеграл от этой функции Δk_{rr}^s называется «пассивной» компонентой реактивности, наводимой подкритическим блоком на реактор как отражателем нейтронов, а среднее время жизни нейтронов, отразившихся, замедлившихся и вернувшихся в реактор, описывается параметром

$$l_{rr}^s = \int_0^{\infty} t \alpha_{rr}^s(t) dt \Big/ \int_0^{\infty} \alpha_{rr}^s(t) dt .$$

Функция $\alpha_{rb}(t)$ – распределение вторичных делений в активной зоне реактора, вызванных нейтронами деления из подкритического блока, которые в свою очередь были рождены от первичного деления в активной зоне реактора. Интеграл от этой функции k_{rb} называется «активной» компонентой реактивности, наводимой подкритическим блоком на реактор как множителем нейтронов, а среднее время жизни таких нейтронов в реакторе описывается параметром

$$l_{rb} = \int_0^{\infty} t \alpha_{rb}(t) dt \Big/ \int_0^{\infty} \alpha_{rb}(t) dt .$$

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ

Рассмотрим первое уравнение системы (1). Для упрощения его решения весьма удобно аппроксимировать функции $\alpha_{rr}(t)$, $\alpha_{rr}^s(t)$ и $\alpha_{rb}(t)$ в виде рядов экспонент [2], которые описывают различные процессы замедления, диффузии и переноса мгновенных нейтронов, включая, в общем случае, и процессы на запаздывающих нейтронах. Учитывая, что далее будут рассматриваться только быстропротекающие процессы на мгновенных нейтронах, вкладом запаздывающих нейтронов в соответствующие ядра перехода пренебрежем.

Кроме того, можно объединить ядра $\alpha_{rr}(t)$ и $\alpha_{rr}^s(t)$ в одно $\alpha_{rr}(t) = \alpha_{rr}(t) + \alpha_{rr}^s(t)$ и ограничиться одноэкспоненциальным приближением:

$$\alpha_r(t) = (k_r/l_r) \exp\{-t/l_r\}; \quad \alpha_{rb}(t) = (k_{rb}/l_{rb}) \exp\{-t/l_{rb}\}. \quad (4)$$

В таком случае первое уравнение системы (1) может быть переписано в виде следующей системы алгебраических и дифференциальных уравнений первого порядка, методы решения которых хорошо разработаны:

$$\begin{aligned} N_r(t) &= n_r(t) + n_{rb}(t), \\ l_r dn_r/dt &= k_r N_r - n_r, \\ l_{rb} dn_{rb}/dt &= k_{rb} N_r - n_{rb}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $n_r(t)$ – интенсивность делений в реакторе на собственных нейтронах и нейтронах, которые претерпели отражение от подкритического блока и произвели деления в реакторе; $k_r = k_{rr} + \Delta k_{rr}^s$ – эффективный коэффициент размножения нейтронов в реакторе с учетом подкритического блока как отражателя нейтронов; $l_r = (l_{rr} k_{rr} + l_{rr}^s \Delta k_{rr}^s) / (k_{rr} + \Delta k_{rr}^s)$ – среднее время жизни нейтронов в реакторе с учетом нейтронов, отраженных от подкритического блока; $n_{rb}(t)$ – интенсивность делений в реакторе на нейтронах, которые родились в реакторе от первичного деления, попали в подкритический блок, произвели там деления, а нейтроны от этих делений затем попали в реактор и произвели там вторичные деления. В случае безынерциального гашения реактивности обратная связь по мощности может быть записана в виде

$$k_r = k_r^0(t) - \gamma \int_0^t N_r(t) dt = k_r^0(t) - \gamma E_r(t), \quad (6)$$

где γ – квазистатистический коэффициент гашения реактивности; $E_r(t)$ – энергия, выделенная к моменту времени t .

Таким образом, с учетом (6) исходная система уравнений кинетики примет вид

$$\begin{aligned} N_r(t) &= n_r(t) + n_{rb}(t), \\ l_r dn_r/dt &= (k_r^0 - \gamma E_r(t)) N_r(t) - n_r(t), \\ l_{rb} dn_{rb}/dt &= k_{rb} N_r(t) - n_{rb}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Для простоты будем считать, что изменение реактивности в начальный момент времени происходит скачком, а $k_r^0(t) = k_r = \text{const}$; начальные условия $n_r(0) = n_0$, $n_{rb}(0) = 0$.

Если представить функцию Грина, проинтегрированную по пространственной координате, в виде

$$G_b(t) = \int_{V_b} G_{br}(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} = M_b \exp\{-t/l_b\} / l_b,$$

то второе уравнение (1) также может быть сведено к обыкновенному дифференциальному уравнению

$$l_b dN_b/dt = M_b N_r(t) - N_b(t), \quad (8)$$

где $N_b(t)$ – полная мощность подкритического блока в момент t .

Следует отметить, что уравнения для описания мощности в отдельном лазерно-активном элементе будут иметь вид, аналогичный (8).

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Проинтегрировав уравнения (7) и (8), а также пренебрегая начальными и конечными значениями мощности реактора и подкритического блока, получим следующие выражения для полных энергий, выделенных за импульс в реакторе и подкритическом блоке соответственно:

$$E_r^0 = 2(\Delta k_r + k_{rb})/\gamma, \quad (9)$$

$$E_b^0 = M_b E_r^0, \quad (10)$$

где $\Delta k_r = k_r^0 - 1$.

Найдем максимальную мощность реакторного импульса N_r^m . Для этого используем условие $dN_r/dt^m = 0$, а также приближенное соотношение, связывающее энергию E_r^m , выделенную к моменту максимума реакторного импульса t_r^m , и максимальную мощность N_r^m в импульсном реакторе самогасящего действия [4 – 6, 8, 9]: $E_r^m = 2\tau_r N_r^m$, где τ_r – начальный период разгона системы «импульсный реактор - подкритический блок», который реализуется до начала действия обратных мощностных и температурных обратных связей.

Опуская выкладки, приведем решение для N_r^m :

$$N_r^m = [\Delta k_r l_{rb} + \Delta k_{rb} l_r + 2(\Delta k_r + k_{rb})\tau_r] / [2\gamma\tau_r(l_{rb} + \tau_r)], \quad (11)$$

где τ_r может быть найдено из решения характеристического уравнения для системы (7), в которой членом $\gamma E_r(t)$ можно пренебречь:

$$\tau_r = 2 \left[\Delta k_r / l_r + \Delta k_{rb} / l_{rb} + \sqrt{(\Delta k_r / l_r + \Delta k_{rb} / l_{rb})^2 + 4(\Delta k_r + k_{rb}) / (l_r l_{rb})} \right]^{-1}. \quad (12)$$

Максимальное значение функции n_{rb}^m , которое реализуется в момент времени t_b^m , отличный от t_r^m , можно найти, используя приближения «сильно» и «слабосвязанной» систем, описанные в [5]. Итоговое выражение для оценки n_{rb}^m имеет вид

$$n_{rb}^m = \begin{cases} (E_r^0 - 2k_{rb})k_{rb} / l_{rb} & \text{при } 0 < k_{rb} < k_{rb}^s, \\ \gamma E_r^0{}^2 / (8l_{rb}) & \text{при } k_{rb} > k_{rb}^s. \end{cases} \quad (13)$$

где параметр $k_{rb}^s = \gamma E_r^0 / 4$ условно разделяет области «слабой» и «сильной» связности системы.

Обратимся теперь к уравнению (8), описывающему изменение мощности в подкритическом блоке. Это уравнение полностью совпадает с третьим уравнением (7) для $n_{rb}(t)$ при $l_{rb} = l_b$, если обозначить $N_b(t) = (M_b / k_{rb}) \cdot n_{rb}(t)$. Тогда для оценки максимальной мощности блока можно воспользоваться формулами (13), которые примут вид

$$N_b^m = \begin{cases} (E_r^0 - 2k_{rb} / \gamma) M_b / l_b & \text{при } 0 \leq k_{rb} \leq k_{rb}^s, \\ M_b \gamma E_r^0{}^2 / (8l_b k_{rb}) & \text{при } k_{rb} > k_{rb}^s. \end{cases} \quad (14)$$

Однако следует отметить, что оценка (14) справедлива только для случая «слабосвязанной» системы «реактор-блок», когда выполняется соотношение

$$\varepsilon = \tau_r / l_b \ll 1. \quad (15)$$

Физически это эквивалентно тому, что начальный период разгона связанной системы много меньше временной постоянной блока, а математически дает основание пренебречь последним членом в уравнении (8) (приближение «дельтаобразного» реакторного импульса). На практике соотношение (15) реализуется тогда, когда спектр нейтронов в реакторе быстрый, а в блоке – тепловой.

Если же соотношение (15) не выполняется, то даже в полностью «развязанной» системе (при $k_{rb} = 0$) оценка (14) будет плохой, и необходимо учитывать форму реакторного импульса.

Для этого можно воспользоваться подходом, принятым в работе [2], и аппроксимировать форму быстрой части импульса в реакторе гауссианом

$$N_r(t) = N_r^m \exp\{-\pi(t - t_r^m)^2 / (16\tau_r^2)\} \quad (16)$$

с максимумом в t_r^m .

Использование представления (16) позволяет проинтегрировать уравнение (8) и найти выражение для $N_b(t)$ в аналитическом виде:

$$N_b(t) = \frac{M_b N_r^m}{l_b} \int_{-\infty}^t \exp\{-\pi\xi^2 / (16\tau_r^2) - (\xi - t + t_r^m) / l_b\} d\xi = \\ = 2N_r^m \varepsilon M_b \exp\{4\varepsilon^2 / \pi - (t - t_r^m) / l_b\} \left[1 + \operatorname{erf}(\sqrt{\pi}(t - t_r^m) / (4\tau_r) - 2\varepsilon / \sqrt{\pi}) \right]. \quad (17)$$

Для определения максимума функции (17) необходимо найти соответствующее ему время между максимумами импульсов в блоке и реакторе $\Delta t_{br} = t_b^m - t_r^m$. Его можно найти из решения трансцендентного уравнения

$$[(1 + \operatorname{erf}(y)) = \exp(-y^2)], \quad (18)$$

где $y = \pi^{1/2} \Delta t_{br} / (4\tau_r) - 2\varepsilon / \pi^{1/2}$.

Используя выражения (17) и (18), несложно показать, что значение максимальной мощности импульса в блоке описывается выражением

$$N_b^m = N_r^m \cdot M_b \exp\{-\pi \Delta t_{br}^2 / 16\}.$$

Уравнение (18) не имеет аналитического решения, но можно сделать некоторые приближенные оценки при различных значениях ε . Тогда общее решение для N_b^m будет иметь вид

$$N_b^m(\varepsilon) = N_r^m M_b \begin{cases} 4\varepsilon \exp\{-4\varepsilon^2 / \pi - 4\varepsilon \sqrt{\ln(1/(4\varepsilon))} / \sqrt{\pi}\}, & 0 < \varepsilon \leq 0.1617; \\ \exp\{2\varepsilon - 1 - 4\varepsilon^2 / \pi\}, & 0.1617 \leq \varepsilon \leq 0.9133; \\ \exp\{-\pi / (16\varepsilon^2)\}, & \varepsilon > 0.9133. \end{cases} \quad (19)$$

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Для проверки пригодности полученных соотношений при оценке N_r^m и N_b^m выполнены расчеты модельной системы, состоящей из импульсного реактора и подкритического блока при различных значениях k_{rb} , l_r и l_b . Постоянными в расчетах полагались коэффициент гашения реактивности $\gamma = 0.5 \cdot 10^{-10}$ Дж⁻¹, энергия реакторного импульса $E_r^0 = 6$ МДж и нулевой момент функции Грина $M_b = 1$.

На рисунках 1 и 2 приведены в сравнении зависимости максимальной мощности импульса реактора N_r^m от коэффициента k_{rb} и постоянной времени l_b соответственно при разных l_r , рассчитанные численно по модели (7) с использованием комплекса MathCad [7] и по формулам (11), (12).

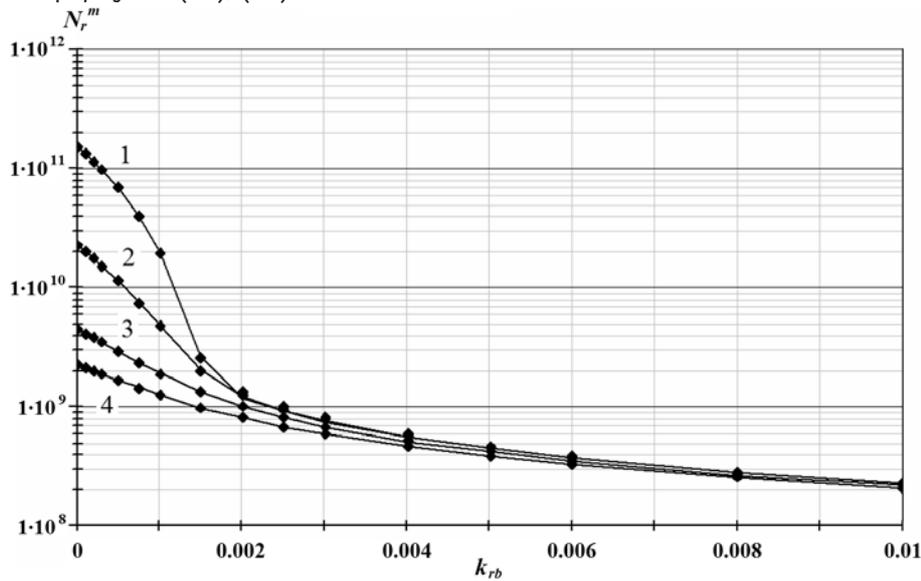


Рис. 1. Зависимости N_r^m от k_{rb} , рассчитанные численно по модели (7) (точки) и по формуле (13) (сплошные кривые) при $l_b = 10^{-3}$ и различных $l_r = 1.5 \cdot 10^{-8}$ (1); $1 \cdot 10^{-7}$ (2), $5 \cdot 10^{-7}$ (3) и $1 \cdot 10^{-6}$ с (4)

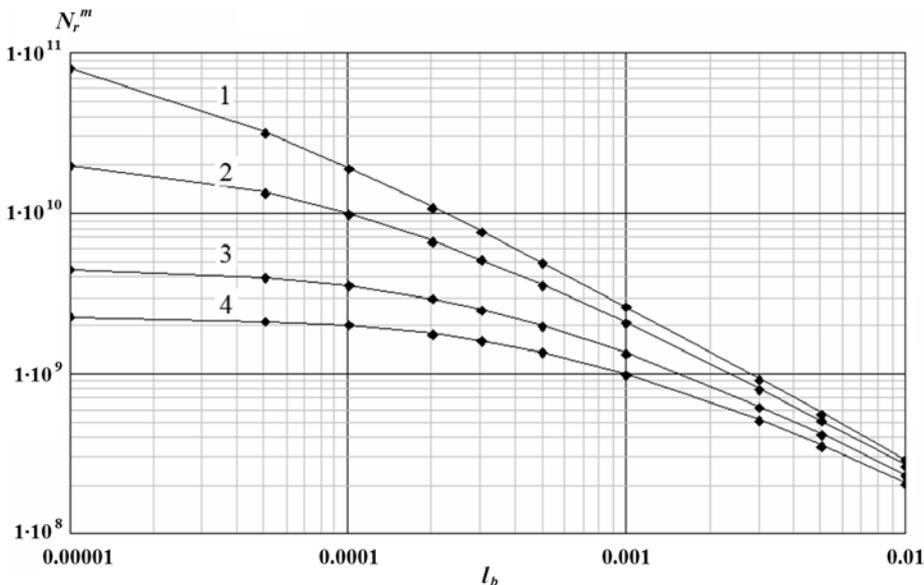


Рис. 2. Зависимости N_r^m от l_b , рассчитанные численно по модели (7) (точки) и по формуле (13) (сплошные кривые) при $k_{rb} = 1.5 \cdot 10^{-3}$ и различных $l_r = 1.5 \cdot 10^{-8}$ (1); $1 \cdot 10^{-7}$ (2), $5 \cdot 10^{-7}$ (3) и $1 \cdot 10^{-6}$ с (4)

Следует отметить, что расчеты N_r^m , представленные на рис. 2, выполнены при значении $k_{rb} = 1.5 \cdot 10^{-3}$, так как в этом случае реактор не «переходит» в состояние мгновенной надкритичности ($\Delta k_r = \gamma E_r^0 / 2 - k_{rb} = 0$), а форма импульса в реакторе существенно отличается от гауссовой.

Однако, как видно из рисунков, решение (11) справедливо при всех рассмотренных значениях параметров для случаев как «слабосвязанной», так и «сильносвязанной» систем [2, 5], при этом расхождение между аналитической оценкой и численным расчетом нигде не превышает 1 – 3%.

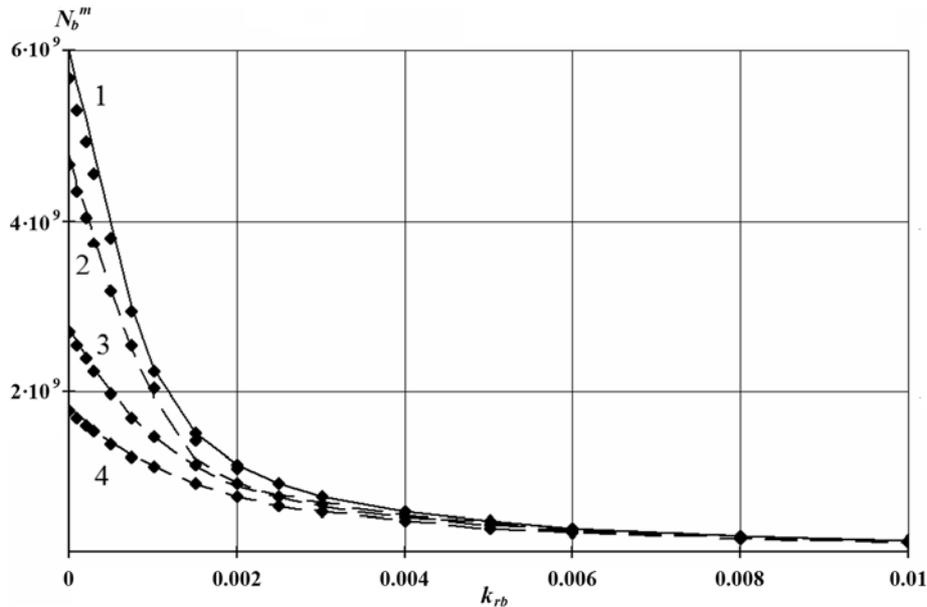


Рис. 3. Численные (точки) и аналитические оценки $N_b^m(k_{rb})$ при $l_b = 1.5 \cdot 10^{-8}$ (кривая 1); $1 \cdot 10^{-7}$ (2), $5 \cdot 10^{-7}$ (3) и $1 \cdot 10^{-6}$ с (4)

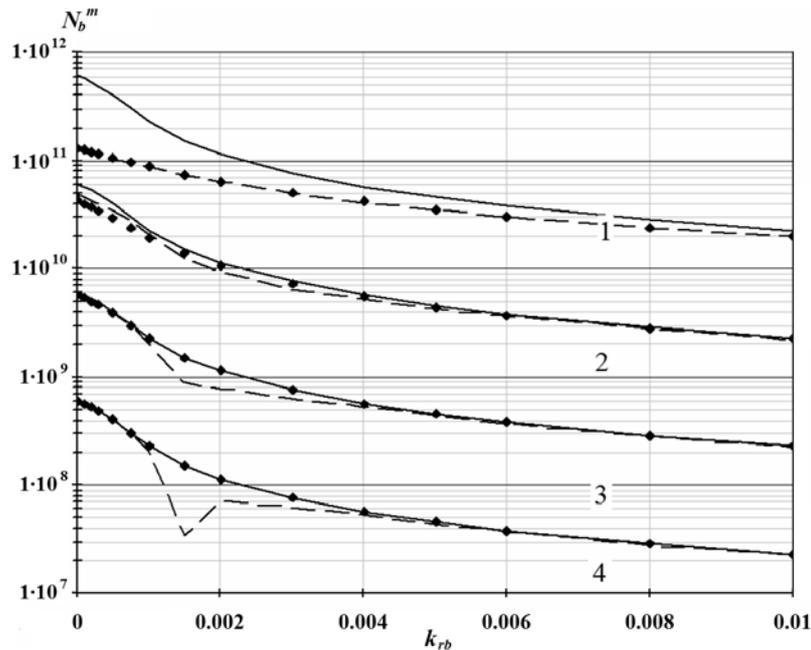


Рис. 4. Численные расчеты (точки) и аналитические оценки (кривые) $N_b^m(k_{rb})$ при значениях $l_b = 10^{-5}$ (кривая 1), 10^{-4} (2), 10^{-3} (3) и 10^{-2} с (4)

На рисунке 3 приведены результаты расчетов максимальной мощности в подкритическом блоке в зависимости от k_{rb} при фиксированной постоянной блока $l_b = 10^{-3}$ с и различных значениях времени жизни в реакторе. Точками обозначены результаты расчетов по модели (7), а кривыми представлены оценки по аналитическим формулам: сплошная кривая 1 рассчитана по формуле (14), штриховые кривые 2 – 4 – по формуле (19).

Как показали расчеты, формула (14) дает хорошую оценку для N_b^m при всех значениях k_{rb} для случаев, когда начальный период разгона системы существенно меньше «временной» постоянной блока ($\varepsilon \ll 1$), что реализуется при быстром спектре нейтронов в реакторе и тепловом спектре нейтронов в блоке. В случае, когда ε соизмеримо или больше единицы (кривые 2 – 4), хорошие результаты дает формула (19).

На рисунке 4 приведены результаты расчетов максимальной мощности блока от k_{rb} при фиксированном $l_r = 1.5 \cdot 10^{-8}$ с и различных значениях «временной» постоянной блока. Точками показаны результаты численного моделирования по модели (7); аналитические оценки выполнены по формулам (14) (сплошные кривые) и (19) (штриховые кривые). Сравнение показывает, что формула (14) дает удовлетворительное (не хуже 20 – 25%) совпадение с численным расчетом при значении $l_b \geq 10^{-4}$ с (кривые 2 – 4). При $l_b < 10^{-4}$ с (кривая 1), когда спектр нейтронов в блоке уже не является тепловым, следует пользоваться формулой (19). Последняя формула в свою очередь дает неудовлетворительные оценки для промежуточной области связанности между блоком и реактором ($k_r^b \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$, кривые 3 и 4). Это обусловлено тем, что гауссово приближение к форме реакторного импульса (16) здесь неудовлетворительно (рис. 5).

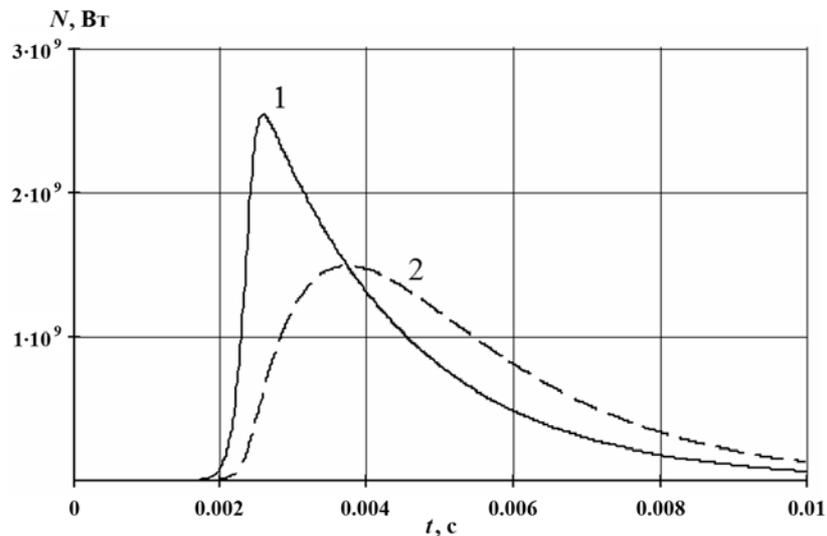


Рис. 5. Импульсы в реакторе (1) и блоке (2) при $l_r = 1.5 \cdot 10^{-8}$ с, $k_{rb} = 1.5 \cdot 10^{-3}$ и $l_b = 10^{-3}$ с

Для исследования применимости аналитических формул в промежуточной области были выполнены расчеты максимальной мощности блока в зависимости от его «временной» постоянной при фиксированном $k_{rb} = 1.5 \cdot 10^{-3}$ и различных значениях l_r (рис. 6). Точками, как и ранее, показаны результаты численного моделирования, а кривыми – оценки по аналитическим формулам (14) (сплошная кривая) и (19) (штриховая кривая). Анализ результатов расчетов подтверждает, что при малых временах жизни нейтронов в реакторе и больших «временных» постоянных блока (когда реализуется условие $\varepsilon \ll 1$) хорошие оценки дает формула (14) (сплошная кривая), а при ε порядка или больше единицы – формула (19).

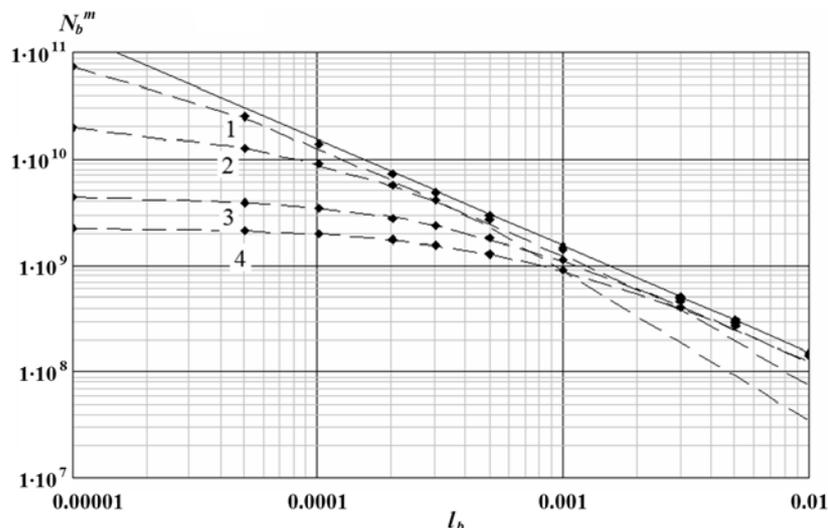


Рис. 6. Численные расчеты (точки) и аналитические оценки (кривые) $N_b^m(l_b)$ при значениях $l_r = 1.5 \cdot 10^{-8}$ (кривая 1); $1 \cdot 10^{-7}$ (2), $5 \cdot 10^{-7}$ (3) и $1 \cdot 10^{-6}$ с (4)

Анализ проведенных расчетов показывает достаточно очевидный результат, что для улучшения характеристик импульса подкритического блока (т.е. одновременное увеличение энергии и максимальной мощности блока при фиксированной энергии импульса в реакторе) необходимо увеличение нулевого момента от функции Грина M_b , уменьшение «временной» постоянной блока l_b и коэффициента влияния k_{rb} . Этого несложно достичь расчетным путем, максимально «развязав» реактор от подкритического блока при $k_{rb} \rightarrow 0$, и весьма трудно реализовать на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены аналитические соотношения для оценки энергий и максимальных мощностей импульса в связанной реакторной системе, состоящей из импульсного реактора и подкритического блока. Выполненные расчеты продемонстрировали приемлемую для практики точность. Соотношения пригодны как для систем с быстрым реактором и тепловым подкритическим блоком, так и для систем с близкими спектрами нейтронов.

Полученные аналитические соотношения могут быть полезны при оптимизации энергетических характеристик связанных реакторно-лазерных систем.

Литература

1. Гулевич А.В., Кухарчук О.Ф., Пашин Е.А., Полевой В.Б. Модифицированная модель нейтронной кинетики реакторно-лазерного устройства. Препринт ФЭИ-2264, – Обнинск, 1992. – 20 с.
2. Гулевич А.В., Дьяченко П.П., Зродников А.В., Кухарчук О.Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 360 с.
3. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974. – 493 с.
4. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1976. – 248 с.
5. Гулевич А.В., Кухарчук О.Ф. Аналитические оценки параметров нейтронных импульсов в лазерной системе с накачкой от импульсного реактора // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1996. – №1. – С.37.
6. Ломидзе В.Л. Импульсные ядерные реакторы. – М.: Знание, 1982. – 63 с.
7. Ракитин В.И. Руководство по методам вычислений и приложения MATHCAD. – М.: Физматлит, 2005. – 246 с.
8. Kolesov V.F. Aperiodicheskiye impusnyye reactory [Aperiodic pulsed reactors]. Vol. 1,2. Sarov. FGUP «RFNC-VNIIEF». – 2007. – 553 p. (in Russian).
9. Levakov B.G., Lukin A.V., Magda E.P. Impul'snyye yadernye reactory RFNC-VNIITF [Pulsed

- nuclear reactors of RFNC-VNIITF]. Snezhinsk. RFNC-VNIITF, – 2002. – 608 p. (in Russian).
10. *Avery R.* Theory of coupled reactors. 1958, Proc. of 2nd Int. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy. Report No.1858.
 11. Coupled Reactor Kinetics. Proc. of National Topical Meeting American Nuclear Society. Ed. C.Chezem, W.Kohler, Texas, 1967.
 12. *Komata M.* On the Derivation of Avery's Coupled Reactor Kinetics Equations // Nucl. Sci. and Eng. – 1968, – Vol. 38. – P. 193.
 13. *Stevenson M., Gage S.* Application of a Coupled Fission Mode Approach to Modular Reactor Kinetics. // J. of Nucl. Ener. – 1970. – Vol. 24. – Iss. 1. – P. 1.
 14. *Thayer G., Miley G., Jones B.* Experimental Studies of Large Amplitude Transients in Weakly Coupled Cores. // Trans. of Amer. Nucl. Soc. – 1972. – Vol. 15. – Iss. 2. – P. 925.
 15. *Thayer G., Miley G., Jones B.* An Experimental Study of Two Coupled Reactors. // Nucl. Techn. – 1975. – Vol. 25. – No. 1. – P. 56.
 16. *Difilippo F., Waldman R.* The Kinetics of a Coupled Two-Core Nuclear reactor. // Nucl. Sci. Engng. – 1976. – Vol. 61. – No. 1. – P.60.
 17. *Кувшинов М.И., Чередник П.Ф., Игнатов И.И.* Экспериментальное исследование связанных систем, содержащих импульсный реактор ИБР и подкритическую сборку. // ВАИТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 1988. – № 2. – С. 3.
 18. *Takezawa H., Obara T., Gulevich A., Kukharchuk O.* Criticality Analysis of Pulse Core and Laser Module Coupled Small Reactor with Low Enriched Uranium. // Progress in Nuclear Energy. – 2008. – Vol. 50. – Iss. 2-6. – P. 304.
 19. *Takezawa H., Obara T.* New approach to space-dependent kinetic analysis by the integral kinetic model. // Nucl. Sci. Eng. – 2012. – Vol. 171. – P. 1.
 20. *Tuya D.; Obara T.* Supercritical kinetic analysis in simplified system of fuel debris using integral kinetic model. // Annals of Nuclear Energy. – 2016. – Vol. 91. – P. 59.

Поступила в редакцию 25.12.2015 г.

Авторы

Гулевич Андрей Владиславович, заместитель директора Отделения ядерных реакторов и топливного цикла, доктор физ.-мат. наук
E-mail: gulevich@ippe.ru.

Кухарчук Олег Филаретович, заместитель генерального директора – директор Отделения космических энергетических систем, доктор физ.-мат. наук
E-mail: kuh@ippe.ru.

Брежнев Андрей Иванович, инженер-исследователь
E-mail: brezhnev@gmail.com

UDC 621.039.5

ANALYTICAL ESTIMATIONS OF PULSE PARAMETERS IN THE MODIFIED INTEGRAL NEUTRON KINETICS MODEL FOR PULSED REACTOR AND SUBCRITICAL BLOCK

Gulevich A.V., Kukharchuk O.F., Brezhnev A.I.

JSC «SSC RF – Institute for Physics and Power Engineering
n.a. A.I. Leypunsky». 1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

Application of modified integral neutron kinetic model to calculate principal characteristics of pulsed coupled reactor system consisting of pulsed reactor and subcritical block is discussed. The model is based on the use of respective time-dependent kernels of integral equation for reactor power and space-time Green's function for the subcritical block. It is possible to reduce the set of integral equations

to the set of elementary algebraic and first-order differential equations by using exponential approximation of the kernels and the Green's function.

Approximations of «inertialess» reactivity dumping and jump reactivity boost on prompt neutrons are used as the «reactivity - power» feedback in order to close the mathematical model. This allows integrating corresponding kinetic equations in analytical form notwithstanding the fact that the kinetic equation for reactor is nonlinear.

Analytical relations allowing estimating basic characteristics of the system such as energy and maximum pulse power in the reactor and in the subcritical block with accuracy sufficient in engineering practices were obtained.

The performed calculations showed applicability of the analytical dependences of energy characteristics of the system on the impact coefficient of subcritical block on the reactor, on the lifetime of neutrons in the reactor and on the «time» constant of the block for fixed value of pulse energy in the reactor. The obtained ratio is valid for the reactor within the whole range of variation of system parameters while for the subcritical block it is correct only for the system operated with fast neutron spectrum in the reactor and with thermal neutron spectrum in the subcritical block when the so-called «delta» approximation of the reactor pulse is realized. In the case when such approximation is not valid the «Gaussian» approximation to the shape of the reactor pulse is applied for which more accurate analytical formulas were also obtained for estimation of maximum pulse energy in the block. These formulas depend on the ratio of duration of start-up period of the pulsed coupled reactor system to the value of «time» constant of the subcritical block and are correct for the systems with similar neutron spectra.

The obtained analytical relations can be applied for optimization of parameters of coupled reactor-laser systems.

Key words: neutron kinetics, laser system pumped by nuclear reactor, pulse energy and maximum power.

REFERENCES

1. Gulevich A.V., Kukharchuk O.F., Pashin E.A., Polevoy V.B. Modifitsirovannaya model neytronnoy kinetiki reaktorno-lazernogo ustroystva [A modified model of neutron kinetics of reactor-laser device]. Preprint FJEI-2264, Obninsk, 1992, 20 p. (in Russian).
2. Gulevich A.V., Dyachenko P.P., Zrodnikov A.V., Kukharchuk O.F. Svyazannye reaktornye sistemy impulsnogo deystviya [Pulsed coupled reactor systems]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2003, 360 p. (in Russian).
3. Bell D., Glasstone S. Teoriya yadernyh reaktorov [Nuclear reactor theory]. Moscow. Atomizdat Publ., 1974, 493 p. (in Russian).
4. Shabalin E.P. Impulsnye reaktory na bystrykh neytronah [Pulsed fast neutron reactors]. Moscow. Atomizdat Publ., 1976, 248 p. (in Russian).
5. Gulevich A.V., Kukharchuk O.F. Analiticheskie otsenki parametrov neytronnykh impulsov lazernoj sistemy s nakachkoy ot impulsnogo reaktora [Analytical estimates of neutron pulses parameters in a laser system pumped by a pulsed reactor]. *Izvestia Visshikh Uchebnykh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 1996, no. 1, p. 37 (in Russian).
6. Lomidze V.L. Impulsnye yadernye reaktory [Pulsed nuclear reactors]. Moscow. Znanie Publ., 1982, 63 p. (in Russian).
7. Rakitin V.I. Rukovodstvo po metodam vychislenij i prilozheniya MATHCAD [Calculation methods and MATHCAD application manual]. Moscow. Fizmatlit Publ., 2005, 246 p. (in Russian).
8. Kolesov V.F. Aperiodicheskiye impusnye reaktory [Aperiodic pulsed reactors]. V.1,2. Sarov. FGUP «RFNC-VNIIEF», 2007, 553 p. (in Russian).
9. Levakov B.G., Lukin A.V., Magda E.P. Impul'snye yadernye reaktory RFNC-VNIITF [Pulsed nuclear reactors of RFNC-VNIITF]. Snezhinsk. RFNC-VNIITF, 2002, 608 p. (in Russian).

10. Avery R. Theory of coupled reactors. 1958, Proc. of 2nd Int. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy. Report No.1858.
11. Coupled Reactor Kinetics. Proc. of National Topical Meeting American Nuclear Society. Ed. C.Chezem, W.Kohler, Texas, 1967.
12. Komata M. On the Derivation of Avery's Coupled Reactor Kinetics Equations. *Nucl. Sci. and Eng.*, 1968, v. 38, p. 193.
13. Stevenson M., Gage S. Application of a Coupled Fission Mode Approach to Modular Reactor Kinetics. *J. of Nucl. Ener.*, 1970, v. 24, iss. 1, p. 1.
14. Thayer G., Miley G., Jones B. Experimental Studies of Large Amplitude Transients in Weakly Coupled Cores. *Trans. of Amer. Nucl. Soc.*, 1972, v. 15, iss. 2, p. 925.
15. Thayer G., Miley G., Jones B. An Experimental Study of Two Coupled Reactors. *Nucl. Techn.*, 1975, v. 25, no. 1, p. 56.
16. Difilippo F., Waldman R. The Kinetics of a Coupled Two-Core Nuclear reactor. *Nucl. Sci. Engng.*, 1976, v. 61, no. 1, p.60.
17. Kouvshinov M.I., Cherednik P.F., Ignatov I.I. Experimental Investigation of Coupled Systems Containing Pulsed Reactor BIR and Subcritical Assembly]. *Voprosy Atomnoi Nayki i Tekhniki. Ser. Physics of Nuclear Reactors*. 1988, no. 2, p. 3 (in Russian).
18. Takezawa H., Obara T., Gulevich A., Kukharchuk O. Criticality Analysis of Pulse Core and Laser Module Coupled Small Reactor with Low Enriched Uranium. *Progress in Nuclear Energy*. 2008, v. 50, iss. 2-6, p. 304.
19. Takezawa H., Obara T. New approach to space-dependent kinetic analysis by the integral kinetic model. *Nucl. Sci. Eng.* 2012, v. 171, p. 1.
20. Tuya D.; Obara T. Supercritical kinetic analysis in simplified system of fuel debris using integral kinetic model. *Annals of Nuclear Energy*. 2016, v. 91, p. 59.

Authors

Gulevich Andrej Vladislavovich, Deputy Director of Division, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: gulevich@ippe.ru.

Kuharchuk Oleg Filaretovich, Deputy Director General, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: kuh@ippe.ru.

Brezhnev Andrej Ivanovich, Research Engineer

E-mail: brezhand@gmail.com