

## О ВОЗМОЖНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ С НАКАЧКОЙ ОТ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА

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

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»*

*249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1*



Рассмотрена расчетная возможность улучшения энергетических характеристик импульсов мощности в системе, состоящей из реактора и подкритического (теплого в нейтронно-физическом отношении) блока. В качестве импульсного реактора самогасящего действия используется быстрый реактор типа БАРС.

Подкритический блок представляет собой цилиндрическую конструкцию, состоящую из лазерно-активных элементов, элементов замедлителя и двух отражателей (внутреннего и внешнего). Внутренний отражатель состоит из гидрида циркония, а внешний – из бериллия. Зона накачки, где размещены лазерно-активные элементы, содержит замедлитель из гидрида циркония, алюминий и уран-молибденовое топливо (уран 95%-го обогащения). Функционирует система в импульсном режиме. В момент импульса в ядерном реакторе генерируются быстрые нейтроны со значительной долей в них нейтронов утечки, которые попадают в подкритический блок, замедляются там и вызывают деления ядер урана в лазерно-активных элементах. После окончания импульса реактор переходит в глубокоподкритическое состояние, а генерация лазерного импульса прекращается.

Моделирование нейтронной кинетики в рассматриваемой системе осуществляется на основе модифицированной интегральной модели. В качестве функционалов для оптимизации выбраны максимальная мощность и энергия импульса в подкритическом блоке системы, а также его масса и энерговооруженность (отношение энергии импульса к массе блока). В качестве варьируемых параметров задаются массы делящегося материала, замедлителя, а также толщины внутреннего и внешнего отражателей подкритического блока.

Выполненные расчеты показали возможность улучшения энергетических характеристик реакторно-лазерной системы за счет увеличения количества делящегося материала в блоке, отказа от замедлителя в блоке, фиксации толщины внутреннего отражателя из гидрида циркония на уровне 3.1 см. Показано, что изменение толщины внешнего бериллиевого отражателя приводит к существенно разнонаправленному поведению функционалов – энергии и максимальной мощности, а также массы и энерговооруженности блока.

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

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

## ВВЕДЕНИЕ

Создание мощного лазера с накачкой от ядерного реактора остается одной из интригующих проблем современной физики [1]. Одной из концепций, разрабатываемых сегодня, является концепция ядерно-лазерной системы с разделенными реакторным и лазерным блоками. Такая система в нейтронно-физическом отношении является «связанной», а лазерный блок – глубокоподкритическим [2 – 12]. Кроме того предполагается, что система работает в импульсном режиме, который обеспечивается импульсным реактором самогасящего действия (ИРСД) [13 – 16].

Оптимизация выходных (лазерных) характеристик такой системы является сложной многопараметрической задачей. Ее решение затруднено необходимостью многовариантных расчетов большого количества взаимосвязанных процессов, таких как нейтронно-физические, теплофизические, плазмохимические, лазерные и др.

В связи с этим, на первом этапе целесообразно рассмотреть возможность улучшения нейтронно-физических характеристик системы, тем более что именно они определяют энергетические возможности источника накачки лазера.

## ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

Предполагается, что установка состоит из импульсного реактора и подкритического (теплового в нейтронно-физическом отношении) блока (рис. 1). В качестве ИРСД используется быстрый реактор типа БАРС. Его конструкционные и энергетические характеристики приведены в работе [2].

Подкритический блок представляет собой цилиндрическую конструкцию, состоящую из лазерно-активных элементов, элементов замедлителя и двух отражателей (внутреннего и внешнего). Внутренний отражатель состоит из гидрида циркония, а внешний из бериллия. Зона накачки, где размещены лазерно-активные элементы, содержит замедлитель из гидрида циркония, алюминий и уран-молибденовое топливо (уран 95% обогащения). Массой газовой лазерно-активной среды в блоке пренебрегалось ввиду ее малости и ничтожного влияния на спектр нейтронов. Геометрические и массогабаритные характеристики блока показаны на рис. 1 и в табл. 1. Подкритический блок на рисунке изображен в гомогенном приближении.

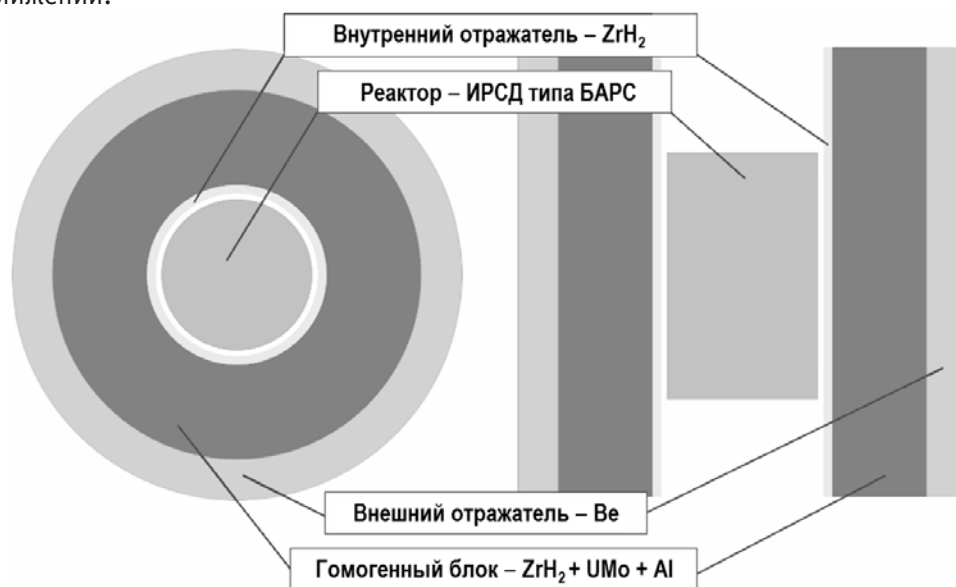


Рис.1. Облик реакторно-лазерной системы

**Массогабаритные характеристики системы**

Массогабаритные характеристики	Значения
Внутренний радиус внутреннего отражателя (полость под размещение реактора ИРМ), см	30.7
Внешний радиус внутреннего отражателя, см	33.8
Толщина внутреннего отражателя, см	3.1
Внутренний радиус внешнего отражателя, см	68.7
Внешний радиус внешнего отражателя, см	84.3
Толщина внешнего отражателя, см	15.6
Длина цилиндрического блока, см	250.0
Масса топлива в блоке, кг	23.06
Масса замедлителя в зоне накачки, кг	3069.74
Масса конструкционных материалов в блоке, кг	482.77
Полная масса зоны накачки блока (без отражателей), кг	3575.57
Масса внутреннего отражателя, кг	881.00
Масса внешнего отражателя, кг	3464.52

Функционирует система в импульсном режиме. В момент импульса в ядерном реакторе генерируются быстрые нейтроны со значительной долей в них нейтронов утечки, которые попадают в подкритический блок, замедляются там и вызывают деления ядер урана в лазерно-активных элементах. Энергия осколков деления ядер урана и является энергией накачки для лазерно-активной среды. После окончания импульса реактор переходит в глубокоподкритическое состояние, а генерация лазерного импульса прекращается.

Нашей задачей будет расчетное исследование возможности изменения состава и геометрии подкритического блока, чтобы получить улучшенные характеристики импульса накачки, такие как энергия и максимальная мощность импульса и масса блока.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ**

Ввиду сложности задачи в общей постановке, рассмотрим только влияние геометрических параметров, а также делящихся и конструкционных материалов на энергию и мощность нейтронного импульса в лазерном блоке, которые описываются моделью [2, 17, 18]:

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

В модели (1)  $N_r(t)$  и  $N_b(t)$  – мощности реактора и подкритического блока в момент  $t$ ;  $G_{br}(\mathbf{r}, t)$  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);  $\alpha_{rb}(t)$  – функция влияния блока на реактор; физический смысл этих функций подробно изложен в работе [2]. Как показано в той же работе, эти функции характеризуются параметрами

$$\begin{aligned}
 G_b &= \int_0^\infty \int_{V_b} G_{br}(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} dt, \\
 l_b &= \int_0^\infty \int_{V_b} t G_{br}(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} dt \bigg/ \int_0^\infty \int_{V_b} G_{br}(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r} dt, \\
 k_{rb} &= \int_0^\infty \alpha_{rb}(t) dt, \\
 l_{rb} &= \int_0^\infty t \alpha_{rb}(t) dt \bigg/ \int_0^\infty \alpha_{rb}(t) dt,
 \end{aligned} \tag{2}$$

через которые могут быть оценены основные функционалы модели (1), такие как полная энергия и максимальная мощность импульса нейтронов в реакторе и лазерном блоке. Выражения для полной энергии импульса в реакторе и подкритическом блоке соответственно имеют вид [2, 19, 20]

$$E_r^0 = 2(\Delta k_r + k_{rb})/\gamma, \tag{3}$$

$$E_b^0 = M_b E_r^0, \tag{4}$$

где  $\Delta k_r = k_r^0 - 1$  – начальная надкритичность импульсного реактора на мгновенных нейтронах;  $\gamma$  – квазистатистический коэффициент гашения реактивности.

Выражение для максимальной мощности импульса в блоке имеет вид [20]

$$N_b^m = \begin{cases} \frac{G_b(E_r^0 - \frac{2k_{rb}}{\gamma})}{l_b} & \text{при } 0 \leq k_{rb} \leq k_{rb}^s, \\ \frac{G_b \gamma (E_r^0)^2}{8l_b k_{rb}} & \text{при } k_{rb} > k_{rb}^s, \end{cases} \tag{5}$$

где  $k_{rb}^s = \gamma E_r^0 / 4$ . Оно справедливо для оценки характеристик импульсов в системе, состоящей из быстрого реактора и теплового подкритического блока, когда выполняется соотношение  $\varepsilon = \tau_r / l_b \ll 1$ , где  $\tau_r$  – начальный период разгона связанной системы.

Следует отметить, что расчет функций  $\alpha_{rr}(t)$ ,  $\alpha_{rb}(t)$ ,  $G_{br}(\mathbf{r}, t)$  и соответствующих им параметров (2) может быть выполнен методом Монте-Карло с использованием комплексов MMKFK [21] или MCNP [22, 23].

Из выражений (4) и (5) видно, что для увеличения  $E_b^0$  и  $N_b^m$  при фиксированной энергии импульса реактора необходимо прежде всего увеличивать  $G_b$ , а также одновременно уменьшать  $l_b$  и  $k_{rb}$ . Этого можно добиться максимально «развязывая» систему, чтобы блок минимально влиял на временные характеристики импульса реактора.

В качестве основных оптимизируемых функционалов модели (1) выберем  $E_b^0$  и  $N_b^m$ , так как они напрямую связаны с энерговкладом и со скоростью энерговклада осколков деления в газовую среду лазерно-активного элемента. При оптимизации эти функционалы следует максимизировать.

Важными функционалами являются также полная масса подкритического блока  $M_b$  и его удельная энерговооруженность  $e_b = E_r^0 / M_b$ . Если удельную энерговооруженность следует стремиться увеличивать, то полную массу лазерного блока необходимо уменьшать.

Геометрические и физические характеристики ядерного реактора предполагаются фиксированными. Распределение материалов внутри зон блока принималось однородным и гомогенным.

В качестве основных варьируемых параметров подкритического блока выберем  $M_U$  – массу топлива  $^{235}\text{U}$  в объеме «активной» части подкритического блока  $V_b$ , которую занимают лазерно-активные элементы;

$M_m$  – массу замедлителя из  $\text{ZrH}_2$  в «активной» части блока;

$m_r$  – массу внутреннего отражателя из гидрида циркония толщиной  $h_r$ ;

$M_r$  – массу внешнего отражателя из бериллия толщиной  $H_r$ .

Таким образом, полная масса подкритического блока составляет

$$M_b = M_U + M_m + M_r + m_r. \quad (6)$$

Расчеты параметров (2) по заданным массогабаритным характеристикам подкритического блока выполнялись с использованием комплекса MCNP [8]. Затем по формулам (4), (5) делались оценки функционалов  $E_b^0$  и  $N_b^m$ , а также  $M_b$  и  $e_b$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В расчетах предполагалось, что энергия импульса в реакторе  $E_r^0$  фиксирована и составляет 6 МДж, а квазистатический коэффициент гашения реактивности  $\gamma = 0.5 \cdot 10^{-9} \text{ Дж}^{-1}$ .

Зададим начальные значения параметров:  $M_U = 23.06 \text{ кг}$ ;  $M_m = 3069.74 \text{ кг}$ ;  $m_r = 881.0 \text{ кг}$  (соответствует толщине  $h_r = 3.1 \text{ см}$ );  $M_r = 3464.52 \text{ кг}$  (соответствует толщине  $H_r = 15.6 \text{ см}$ ).

Начальные значения функционалов, рассчитанные по формулам (4) и (5):  $E_b^0 = 4.107 \text{ МДж}$ ;  $N_b^m = 93.13 \text{ МВт}$ ;  $M_b = 7921 \text{ кг}$ ;  $e_b = 0.518 \text{ кДж/кг}$ .

Рассмотрим сначала зависимости выбранных функционалов от варьируемых параметров. На рисунках 2 – 5 приведены расчетные зависимости функционалов  $E_b^0$ ,  $N_b^m$ ,  $M_b$  и  $e_b$  от  $M_U$ ,  $M_m$ ,  $M_r$  и  $m_r$  соответственно при фиксированных начальных значениях остальных параметров.

Расчеты показывают, что одновременно добиться увеличения функционалов  $E_b^0$ ,  $N_b^m$  и  $e_b$  можно лишь при увеличении параметра  $M_U$  (рис. 2). При этом полная масса подкритического блока  $M_b$  практически не изменяется, а ограничением по увеличению массы урана в данном случае может являться условие достижения коэффициентом размножения нейтронов в блоке значения 1 (т.е. пока блок остается подкритическим).

Анализ зависимостей функционалов от изменения массы замедлителя в блоке показывает (см. рис. 3), что максимальные значения функционалов  $E_b^0$ ,  $N_b^m$  и  $e_b$  наблюдаются при  $M_m = 0$ ; кроме того, при этом достигается минимальное значение массы блока  $M_b$ . Это дает основание при оптимизации на данном этапе вообще отказаться от замедлителя в блоке. Хотя не исключено, что если придется выравнивать распределение поля энерговыделения в блоке, то для этого необходимо будет рассматривать различные варианты размещения замедлителя в блоке по радиусу и длине.

При изменении массы (или толщины) внешнего отражателя (рис. 4) рассматриваемые функционалы ведут себя разнонаправленно. Это касается прежде всего энергии и максимальной мощности импульса. Если при увеличении толщины внешнего отражателя от 0 до 50 см энергия импульса увеличивается практически на порядок, при этом во столько же раз падает максимальная мощность и в четыре раза увеличивается полная масса блока. Таким образом, оптимальное значение толщины внешнего отражателя должно выбираться из некоторых дополнительных соображений, например, из максимума энерговооруженности установки (на рис. 4б ему соответствует  $M_r = 6729.04 \text{ кг}$  и  $H_r = 29.1 \text{ см}$ ) или условий обеспечения максимального энерговыклада (или скорости энерговыклада) в газовую среду лазерного элемента.

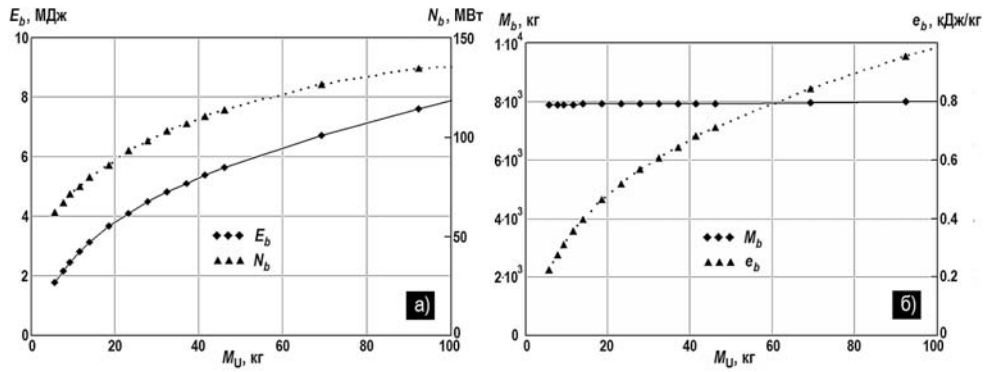


Рис. 2. Зависимости функционалов от массы топлива

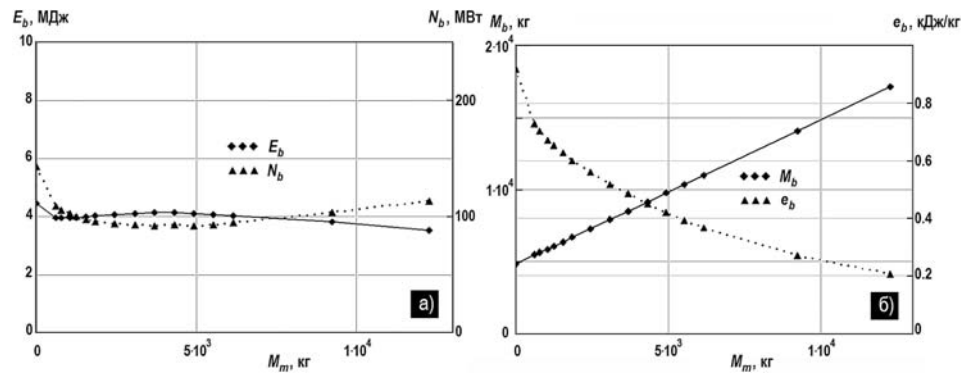


Рис. 3. Зависимости функционалов от массы замедлителя

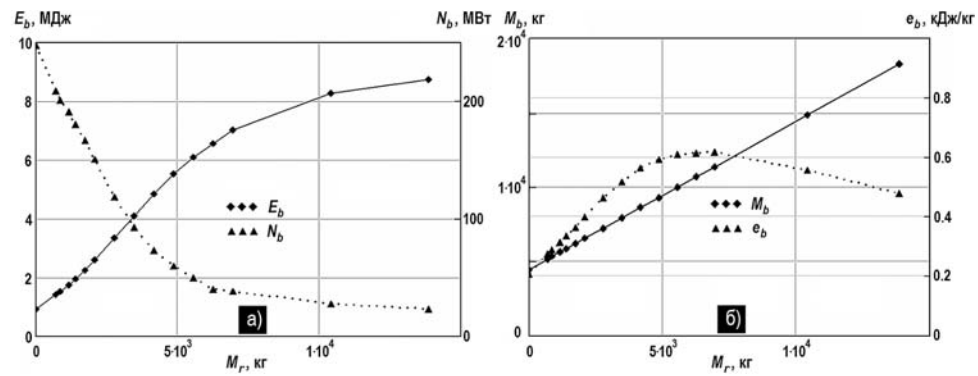


Рис. 4. Зависимости функционалов от массы внешнего отражателя

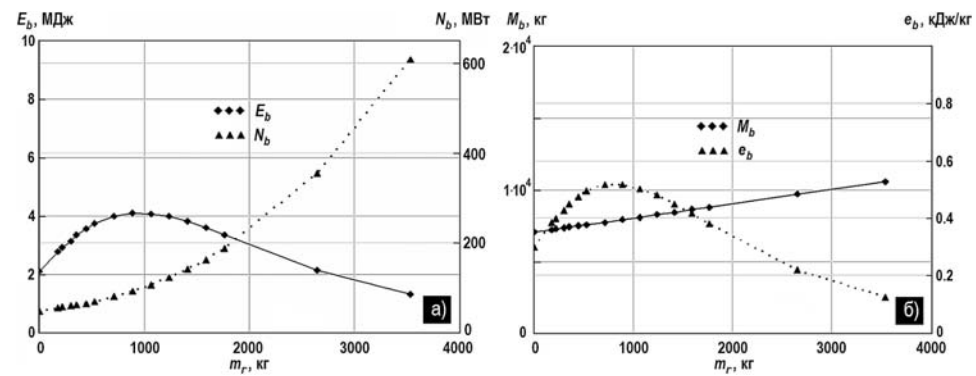


Рис. 5. Зависимости функционалов от массы внутреннего отражателя

Изменение массы (толщины) внутреннего отражателя (рис. 5) приводит также к разнонаправленному поведению функционалов  $E_b^0$  и  $N_b^m$ , а также  $M_b$  и  $e_b$ . Однако в зависимостях энергии и энерговооруженности от массы внутреннего отражателя имеется оптимум, приблизительно соответствующий начальному значению  $m_r = 881.00$  кг и толщине  $h_r = 3.1$  см. Поэтому целесообразно в дальнейших расчетах зафиксировать это значение параметра.

Кроме того, на рис. 5 приведены зависимости рассматриваемых функционалов от массы внутреннего отражателя, рассчитанные для случая, когда масса урана в блоке равна 92.24 кг (в четыре раза больше начального). Как видно из рисунка, качественно эти расчеты повторяют расчеты для случая  $M_U = 23.06$  кг, однако значения функционалов  $E_b^0$ ,  $N_b^m$  и  $e_b$  в полтора – два раза выше при практически неизменных значениях  $M_b$ .

Учитывая вышеупомянутые рекомендации, был выполнен расчет, при котором количество урана в подкритическом блоке  $M_U = 92.24$  кг, замедлитель в блоке отсутствует  $M_m = 0$  кг, а  $m_r$  и  $M_r$  сохранили прежние начальные значения. В этом случае значения исследуемых функционалов следующие:  $E_b^0 = 6.684$  МДж;  $N_b^m = 192.6$  МВт;  $M_b = 4920.53$  кг;  $e_b = 1.36$  кДж/кг. Сравнение с начальными значениями функционалов показывает увеличение по энергии в 1.6, по мощности в 2, по энерговооруженности в 2.6 раза, а по массе блока – уменьшение в 1.6 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчеты показали возможность улучшения энергетических характеристик реакторно-лазерной системы, состоящей из быстрого импульсного реактора и теплового подкритического блока за счет увеличения количества делящегося материала в блоке, отказа от замедлителя в блоке, фиксации толщины внутреннего отражателя из гидрида циркония на уровне 3.1 см. Показано, что изменение толщины внешнего бериллиевого отражателя приводит к существенно разнонаправленному поведению функционалов – энергии и максимальной мощности, а также массы и энерговооруженности блока. В этой ситуации необходимо, по-видимому, решать задачу многокритериальной оптимизации, что планируется выполнить в будущем.

## Литература

1. Мельников С.П., Сизов А.Н., Синянский А.А. Лазеры с ядерной накачкой. – Саров. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008.
2. Гулевич А.В., Дьяченко П.П., Зродников А.В., Кухарчук О.Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. – М.: Энергоатомиздат, 2003.
3. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. – М.: Атомиздат. – 1974. – 493 с.
4. Avery R. Theory of coupled reactors. 1958, Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy. Report No. 1858.
5. Coupled Reactor Kinetics. Proc. of National Topical Meeting American Nuclear Society. Ed. C. Chezem, W. Kohler, Texas, 1967.
6. Komata M. On the Derivation of Avery's Coupled Reactor Kinetics Equations. // *Nucl. Sci. and Eng.* – 1968. – Vol. 38. – P. 193
7. Stevenson M., Gage S. Application of a Coupled Fission Mode Approach to Modular Reactor Kinetics. // *J. of Nucl. Ener.* – 1970. – Vol. 24. – No. 1. – P. 1.
8. Thayer G., Miley G., Jones B. Experimental Studies of Large Amplitude Transients in Weakly Coupled Cores. // *Trans. of Amer. Nucl. Soc.* – 1972. – Vol. 15. – No. 2. – P. 925.
9. Thayer G., Miley G., Jones B. An Experimental Study of Two Coupled Reactors. // *Nucl. Techn.* – 1975. – Vol. 25. – No. 1. – P. 56.
10. Difilippo F., Waldman R. The Kinetics of a Coupled Two-Core Nuclear reactor. // *Nucl. Sci.*

*and Eng.* – 1976. – Vol. 61. – No. 1. – P. 60.

11. *Кувшинов М.И., Чередник П.Ф., Игнатов И.И.* Экспериментальное исследование связанных систем, содержащих импульсный реактор БИР и подкритическую сборку. // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 1988. – № 2. – С. 3.

12. *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. – No. 2-6. – P. 304.

13. *Шабалин Е.П.* Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1976.

14. *Ломидзе В.Л.* Импульсные ядерные реакторы. – М.: Знание. – 1982. – 63 с.

15. *Колесов В.Ф.* Аперiodические импульсные реакторы. Т. 1, 2. – Саров: ФГУП «РФНЦ-ВНИИЭФ». – 2007. – 553 с.

16. *Леваков Б.Г., Лукин А.В., Магда Е.П.* Импульсные ядерные реакторы РФНЦ-ВНИИТФ. – Снежинск: РФНЦ-ВНИИТФ. – 2002. – 608 с.

17. *Гулевич А.В., Кухарчук О.Ф., Пашин Е.А., Полевой В.Б.* Модифицированная модель нейтронной кинетики реакторно-лазерного устройства. Препринт ФЭИ-2264, Обнинск. – 1992.

18. *Takezawa H., Obara T.* New approach to space-dependent kinetic analysis by the integral kinetic model. // *Nucl. Sci. and Eng.* – 2012. – Vol. 171. – P. 1.

19. *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.

20. *Гулевич А.В., Кухарчук О.Ф., Брежнев А.И.* Аналитические оценки параметров импульсов в модифицированной интегральной модели кинетики для импульсного реактора и подкритического блока. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 2. – С. 87-98.

21. *Полевой В.Б., Леонтьев В.В., Овчинников А.В., Тарасова О.Б.* Базовый пакет программ комплекса ММКФК-2 для решения задач переноса нейтронов в физике реакторов (ММКФК-2-BASE). ОФАП ЯР, №00371. – М., 1996.

22. MCNP – a general Monte Carlo N-particle Transport Code, Version 4B/ Ed. J. Briesmeister LANL LA-12625-M. – 1997.

23. *Бережной К.В., Кухарчук О.Ф.* Применение кода MCNP для расчета нейтронно-физических характеристик связанных реакторных систем: Препринт ФЭИ-2961. Обнинск. – 2002.

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: brezhand@gmail.com

Суворов Алексей Анатольевич, начальник отдела Отделения космических энергосистем, доктор физ.-мат. наук  
E-mail: suvorov@ippe.ru.



## ON FEASIBILITY OF OPTIMIZING THE NEUTRONIC PERFORMANCE OF A LASER SYSTEM PUMPED BY A PULSED REACTOR

Gulevich A.V., Kuharchuk O.F., Brezhnev A.I., Suvorov A.A.

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

### ABSTRACT

The paper examines the calculated feasibility of improving the energy characteristics of power pulses in a system consisting of a reactor and a subcritical block (thermal in neutronic terms). A BARS-type fast neutron reactor is used as a self-quenching pulsed reactor.

The subcritical block is a tubular structure comprising laser-active components, moderator components and two reflectors (internal and external). The internal reflector material is zirconium hydride, and the external reflector material is beryllium. The pumping area containing the laser-active components consists of zirconium hydride moderator, aluminum and uranium-molybdenum fuel (95% enriched uranium).

The system operates in a pulsed mode. Fast neutrons are generated in the nuclear reactor at the pulse moment, many of which are leakage neutrons entering the subcritical block, slowing down there and inducing fissions of uranium nuclei in the laser-active components. After the pulse terminates, the reactor changes to a deeply subcritical state, and the laser pulse generation stops.

The neutron kinetics in the system under consideration is modeled based on a modified integral model.

The pulse maximum power and energy in the system's subcritical block, as well as its weight and energy-to-weight ratio are selected as functionals for the optimization. The fissile material and moderator weight and the thickness of the subcritical block's internal and external reflectors are adopted as variables.

The calculations have shown that it is possible to improve the energy characteristics of a reactor-laser system by increasing the amount of the fissile material in the block, not using the moderator in the block and fixing the thickness of the internal zirconium hydride reflector at a level of 3.1 cm. It has been shown that a change in the external beryllium reflector thickness leads to a highly multidirectional behavior of the functionals (energy and maximum power, as well as the block weight and energy-to-weight ratio).

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

### REFERENCES

1. Mel'nikov S.P., Sizov A.N., Sinyanskij A.A. Nuclear Pumped Lasers. Sarov. RFYAC-VNIIEF Publ., 2008, 440 p. (in Russian).
2. Gulevich A.V., D'yachenko P.P., Zrodnikov A.V., Kuharchuk O.F. Pulsed Coupled Reactor System. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2003, 360 p. (in Russian).
3. Bell D., Glasstone S. Nuclear Reactor Theory. Moscow. Atomizdat Publ., 1974, 493 p. (in Russian).
4. Avery R. Theory of Coupled Reactors. 1958, Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy. Report #1858.
5. Coupled Reactor Kinetics. Proc. of National Topical Meeting American Nuclear Society. Ed. C. Chezem, W. Kohler, Texas, 1967.
6. Komata M. On the Derivation of Avery's Coupled Reactor Kinetics Equations. *Nucl. Sci. and Eng.*, 1968, v, 38, p. 193.

7. Stevenson M., Gage S. Application of a Coupled Fission Mode Approach to Modular Reactor Kinetics. *J. of Nucl. Ener.*, 1970, v. 24, no. 1, p. 1.
8. Thayer G., Miley G., Jones B. Experimental Studies of Large Amplitude Transients in Weakly Coupled Cores. *Trans. of Amer. Nucl. Soc.*, 1972, v. 15, no. 2, p. 925.
9. Thayer G., Miley G., Jones B. An Experimental Study of Two Coupled Reactors. *Nucl. Techn.*, 1975, v. 25, no. 1, p. 56.
10. Difilippo F., Waldman R. The Kinetics of a Coupled Two-Core Nuclear reactor. *Nucl. Sci. and Eng.*, 1976, v. 61, no. 1, p. 60.
11. 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 Techniki. Ser. Physics of Nuclear Reactors*, 1988, v. 2, p. 3 (in Russian).
12. 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, no. 2-6, p. 304.
13. Shabalin E.P. Pulsed Fast Neutron Reactors. Moscow. Atomizdat Publ., 1976, 248 p. (in Russian).
14. Lomidze V.L. Pulsed Nuclear Reactors. Moscow. Znanie Publ., 1982, 63 p. (in Russian).
15. Kolesov V.F. Aperiodic Pulsed Reactors. V. 1, 2. Sarov. RFNC-VNIIEF Publ., 2007, 553 p. (in Russian).
16. Levakov B.G., Lukin A.V., Magda E.P. Pulsed Nuclear Reactors of RFNC VNIITF. Snezhinsk. RFNC VNIITF Publ., 2002, 608 p. (in Russian).
17. Gulevich A.V., Kuharchuk O.F., Pashin E.A., Polevoj V.B. A Modified Model of Neutron Kinetics of the Reactor Laser Facility. Preprint FEI-2264, Obninsk, 1992, 20 p. (in Russian).
18. Takezawa H., Obara T. New approach to space-dependent kinetic analysis by the integral kinetic model. *Nucl. Sci. Eng.*, 2012, 171, p. 1.
19. Gulevich A.V., Kukharchuk O.F. Analytical Estimates of Neutron Pulse Parameters in a Laser System Pumped by a Pulsed Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 1996, no. 1, p. 37 (in Russian).
20. Gulevich A.V., Kuharchuk O.F., Brezhnev A.I. Analytical Estimates of Pulse Parameters in a Modified Integral Neutron Kinetics Model for a Pulsed Reactor and a Subcritical Block. *Izvestia vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 2, pp. 87-98 (in Russian).
21. Polevoj V.B., Leont'ev V.V., Ovchinnikov A.V. Tarasova O.B. MMKFK-2 Base Program Package for Solution of Neutron Transport Problems in Reactor Physics (MMKFK-2-BASE). OFAPYAR, №00371. Moscow. 1996, 78 p. (in Russian).
22. MCNP – A General Monte Carlo N-particle Transport Code, Version 4B. Ed. J. Briesmeister LANL LA-12625-M. 1997, 741 p.
23. Berezhnoj K.V., Kuharchuk O.F. Use of the MCNP Code for Calculating the Neutronic Performance of Coupled Reactor Systems. Preprint FEI-2961. Obninsk, 2002, 28 p. (in Russian).

#### Authors

Gulevich Andrej Vladislavovich, Deputy Director of the Nuclear Reactors and Fuel Cycle Division, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: gulevich@ippe.ru.

Kuharchuk Oleg Filaretovich, Deputy Director General – Spase Power Engineering Systems Division Director, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: kuh@ippe.ru.

Brezhnev Andrej Ivanovich, Research Engineer

E-mail: brezhand@gmail.com

Suvorov Alexej Anatol'evich, Head of Department of Spase Power Engineering Systems Division, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: suvorov@ippe.ru.