

УДК 621.039.7

## РАСЧЕТ ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ В ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ С ТЕПЛОВЫМ СПЕКТРОМ НЕЙТРОНОВ, УПРАВЛЯЕМОЙ ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ

Шишкина М.В., Фоков Ю.Г., Рутковская К.К., Куликовская А.В.

Описаны конструкция и материальный состав ядерно-физической подкритической сборки «Яліна-Тепловая». По данной установке создан входной файл ядерно-физического кода MCNP для расчета основных характеристик, достаточно подробно описывающий геометрию и материальный состав сборки, а также энергетическое распределение нейтронов. Выполнено расчетное моделирование пошаговой загрузки топлива в активную зону; оценен статистический вес твэлов центральной, промежуточной и периферийной областей активной зоны сборки; вклад в реактивность свинцовой мишени, расположенной в центральной полости сборки; расчет величины эффективной доли запаздывающих нейтронов.

*Ключевые слова:* эффективный коэффициент размножения нейтронов, эффекты реактивности, эффективная доля запаздывающих нейтронов.

(Поступила в редакцию 29 мая 2017 г.)

**Введение.** Одним из перспективных путей уменьшения количества долгоживущих радиоактивных отходов является трансмутация – превращение долгоживущих радионуклидов в короткоживущие или стабильные нуклиды с помощью нейтронов.

В последние годы интенсивно развиваются концепции энергетических систем, основанных на синтезе высокоэнергетических реакций расщепления и деления тяжелых ядер. Чаще всего рассматриваются подкритические системы, работающие под управлением ускорителей. В мировой научной литературе гибридные установки, интегрирующие в единый комплекс ускоритель заряженных частиц, нейтрон-производящую мишень и подкритическую сборку, в которой протекает цепная ядерная реакция деления, интенсивность которой контролируется током пучка ускорителя, получили название ADS (Accelerator Driven Systems) [1].

**Основная часть.** Целью работы является выполнение расчетного моделирования с помощью ядерно-физического кода MCNP [2] пошаговой загрузки топлива в активную зону; оценка статистического веса твэлов центральной, промежуточной и периферийной областей активной зоны сборки; вклад в реактивность свинцовой мишени, расположенной в центральной полости сборки; расчет величины эффективной доли запаздывающих нейтронов. Все эти величины являются важными для оценки безопасности ядерных установок [3]. Для изучения возможности практической реализации ADS, в научном учреждении «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси создан ядерно-физический подкритический комплекс «Яліна» [4], предназначенный для проведения широкого круга исследований с использованием нейтронов в широкой области энергий: от энергий тепловых нейтронов и до 15 МэВ. Комплекс состоит из высокопоточного генератора нейтронов НГ-12-1, уран-полиэтиленовой (тепловой) и бустерной (быстро-тепловой) подкритических сборок, измерительного комплекса и системы жизнеобеспечения.

Моделирование нейтроно-физических характеристик подкритических систем с внешними источниками является достаточно сложной задачей, поскольку необходимо учитывать ядерно-физические процессы, протекающие в широком диапазоне энергий. Код MCNP позволяет моделировать перенос нейтронов и гамма-квантов методом Монте-Карло практически в любой геометрии. Кинетическое уравнение Больцмана при этом обычно записывается в виде

$$\Psi(x) = \int \Psi(x') K(x' \rightarrow x) dx' + \Psi_1(x), \quad (1)$$

где  $x$  обозначает совокупность фазовых координат  $(\mathbf{r}, E, \boldsymbol{\Omega}, t)$ ;  $\Psi(x)$  – плотность столкновений нейтронов в точке фазового пространства  $x$ , равная  $\Phi(x) \cdot \Sigma_t(x)$ ; функция  $\Phi(x)$  – плотность потока нейтронов;  $\Sigma_t(x)$  – полное макроскопическое сечение взаимодействия нейтрона с веществом;  $\Psi_1(x)$  – плотность первых столкновений;  $K(x' \rightarrow x)$  – ядро перехода из состояния  $(x')$  в состояние  $(x)$ , которое представляет собой произведение ядра столкновения  $S(\mathbf{r}', E', \boldsymbol{\Omega}', t' \rightarrow \mathbf{r}', E, \boldsymbol{\Omega}, t')$  и ядра пространственного переноса  $T(\mathbf{r}', E, \boldsymbol{\Omega}, t' \rightarrow \mathbf{r}, E,$

$\Omega, t$ ). Предполагается, что функционал столкновения  $S$  учитывает все основные процессы взаимодействия нейтрона с веществом (упругое и неупругое рассеяние, деление, реакции  $(n, \gamma)$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, 3n)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$  и т. д.). При этом как для сечений, так и для энергетических и угловых распределений вторичных нейтронов используется детальное описание энергетической зависимости, представленное в файлах оцененных ядерных данных в формате ENDF/B [5]. Функционал пространственного переноса  $T$  позволяет корректно рассчитывать системы в трехмерной геометрии. Каждая пространственная ячейка системы представляет собой объем, ограниченный произвольной комбинацией поверхностей первого и второго порядков максимально воспроизводящая реальные детали.

Уравнение критичности, в отличие от неоднородного уравнения (1), представляет собой задачу на собственные значения

$$\Psi(x) = \frac{1}{k} \int \Psi(x') K(x' \rightarrow x) dx. \quad (2)$$

Под коэффициентом критичности  $k_{эфф}$  понимается максимальное по модулю собственное значение уравнения (2). Решение этого уравнения обычно производится методом поколений с использованием некоторой комбинации оценок по столкновениям, поглощениям и длине пробега с целью снижения присущей расчету статистической неопределенности получаемого результата. Модуль для проведения вычислений коэффициента размножения нейтронов KCODE входит составной частью в общий комплекс программ MCNP. Проводя в одном варианте вычисления с учетом запаздывающих нейтронов, а во втором варианте в вычислениях учитывая только мгновенные нейтроны, можно получить долю запаздывающих нейтронов, являющуюся исключительно важной характеристикой для исследования нейтроно-физических характеристик конкретной ядерной системы.

В конструкции сборки «Яліна-Тепловая» заложена возможность изменения конфигурации активной зоны для достижения различных уровней подкритичности. В качестве внешних источников нейтронов используются источники спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$  различной интенсивности, а также генератор нейтронов НГ-12-1, производящий нейтроны в реакциях  $d(d,n)^3\text{He}$ ;  $d(t,n)^4\text{He}$ .

К наиболее важным задачам в развитии современных радиационно-энергетических технологий относятся: разработка и создание топливных композиций, конструкционных материалов и материалов теплоносителя, обладающих высоким сопротивлением к воздействию ядерных излучений, так как механические свойства материалов – прочность, упругость, пластичность, вязкость, ползучесть и твердость – изменяются со временем в зависимости от природы и энергетического спектра облучающих материал частиц, температуры среды и дозы облучения [6].

Техническая осуществимость электроядерных энергетических установок ADS, принцип действия которых основан на технологии расщепления ядер высокоэнергетическими пучками, зависит в значительной степени от освоенности линейных ускорителей протонов и легких ядер. Такие ускорители нашли широкое применение в физике высоких энергий для изучения структуры материи. Опыт их эксплуатации (Россия, США, Канада, Швейцария и др.) указывает на реальную возможность создания мощных ускорителей непрерывного действия, обладающих высокой эксплуатационной надежностью, что привело к разработкам концепций подкритических систем, управляемых ускорителями, в различных странах.

При разработке установок возникают два принципиальных вопроса: выбор внешнего источника нейтронов и оптимизация параметров активной зоны с точки зрения получения максимального коэффициента усиления потока нейтронов внешнего источника. В отличие от традиционных ADS, которые базируются на ускорителях протонов (или дейтронов) высоких энергий (до нескольких ГэВ) с токами в пучке до десятков миллиампер, для исследовательского реактора можно рассмотреть возможность использования обычных генераторов нейтронов с дейтериевыми и тритиевыми мишенями с током дейтронов в пучке до 1 А. Используются дейтроны с энергиями порядка 200–300 кэВ, что вполне достаточно для протекания реакции образования нейтронов, то создание такого генератора нейтронов может оказаться на порядки дешевле, чем строительство ускорителей на несколько ГэВ, причем токи порядка нескольких ампер являются вполне достижимыми для низкоэнергетических ускорителей [7].

Особая роль в программе экспериментальных исследований на стенде «Яліна» отводится измерению уровня подкритичности, поскольку безопасная эксплуатация полномасштабной ADS невозможна без надежного мониторинга реактивности системы [1].

Свойства устойчивости и саморегулируемости любой системы зависят от наличия обратных связей, их величины и знака. Из общей теории автоматического регулирования известно, что любая система обладает свойством устойчивости тогда, когда ее обратные связи отрицательны и также обладает хорошей управляемостью, если они достаточно малы по величине.

Обратные связи в реакторе называют эффектами реактивности, а характеризующие их коэффициенты – коэффициентами реактивности. Характер зависимости реактивности от температуры определяет динамические свойства реактора и решающим образом влияет на его устойчивость. Поэтому знание указанных зависимостей для каждого реактора совершенно необходимо [8].

Если в делящейся среде происходят изменения температуры, ядерного состава, плотности, то они неизбежно приводят к изменению коэффициента размножения. Например, при увеличении температуры среды замедление нейтронов на горячем замедлителе может ухудшиться, причем изменится вероятность избежать резонансного захвата  $\phi_8$ . В процессе работы реактора количество ядер делящегося изотопа урана уменьшается, следовательно, уменьшится вероятность поглощения в  $^{235}\text{U}$ ,  $\theta_5$ . Поэтому в начале работы необходимо иметь запас по количеству ядер  $^{235}\text{U}$  на выгорание [9].

**Расчет эффективного коэффициента размножения нейтронов в ходе загрузки ядерного топлива в активную зону.** Расчет порядка загрузки топлива в сборку проводился, исходя из достижения проектной безопасной величины коэффициента размножения  $k_{эфф} \leq 0,975$  с выполнением основного правила загрузки размножающих систем – соблюдением безопасного хода кривой  $I/N = f(m)$ , где  $m$  – масса загруженного в сборку топлива, а  $N$  – соответствующая этой загрузке скорость счета [1].

Расчет загрузки делящихся веществ в активную зону и получение на подкритической сборке допускаемого правилами ядерной безопасности эффективного коэффициента размножения нейтронов  $k_{эфф}$  производился с соблюдением следующих правил:

- первая порция загружаемого делящегося вещества не должна превышать 10% от минимального расчетного значения критической загрузки. После снятия показаний приборов контроля нейтронного потока загружается вторая порция, которая не должна превышать первую;

- каждая последующая порция не должна превышать  $j$  величины, оставшейся до экстраполированного значения параметра, соответствующего критическому состоянию [1].

Загрузка сборки до проектного значения эффективного коэффициента размножения была достигнута за 15 шагов.

Ход зависимости  $k_{эфф}$  от количества загружаемого на каждом шаге топлива имеет «безопасный» характер [1], что подтверждает правильность выбранной процедуры загрузки (рисунок 1).

**Вклад в реактивность (статистический вес) твэлов центральной, промежуточной и периферийной областей активной зоны сборки.** Максимальная плотность потока нейтронов наблюдается в центре активной зоны и твэлы в этой зоне дают наибольший вклад в эффективный коэффициент размножения нейтронов. Твэлы, расположенные в периферийной части активной зоны дают меньший вклад в эффективный коэффициент размножения нейтронов.

Расчитанный статистический вес твэла в центральной области активной зоны уран-полиэтиленовой подкритической сборки «Яліна-Тепловая» равен:  $\Delta k_{ц} = -0,0022$ , в промежуточной области активной зоны:  $\Delta k_{пр} = -0,0013$ , на периферии активной зоны:  $\Delta k_{пер} = -0,0010$ .

**Эффективная доля запаздывающих нейтронов.** Наличие запаздывающих нейтронов создает физические предпосылки управления цепным процессом деления ядер в энергетических реакторах. Часть вторичных нейтронов деления освобождается не одновременно с образованием осколков, а несколько позже из некоторых возбужденных осколков после их распада. Такие осколки называются предшественниками запаздывающих нейтронов. Как правило, запаздывающие нейтроны достаточно хорошо описываются шестью группами предшественников. При расчете по MCNP получены следующие значения коэффициента размножения на мгновенных нейтронах  $k_p = 0,96773 \pm 0,00002$ , и эффективного коэффициента размножения  $k_{эфф} = 0,97453 \pm 0,00002$ , следовательно, эффективная доля запаздывающих нейтронов:  $\beta_{эфф} = 0,00698 \pm 0,00003$ .

Значение эффективного коэффициента размножения нейтронов в ходе загрузки ядерного топлива в активную зону

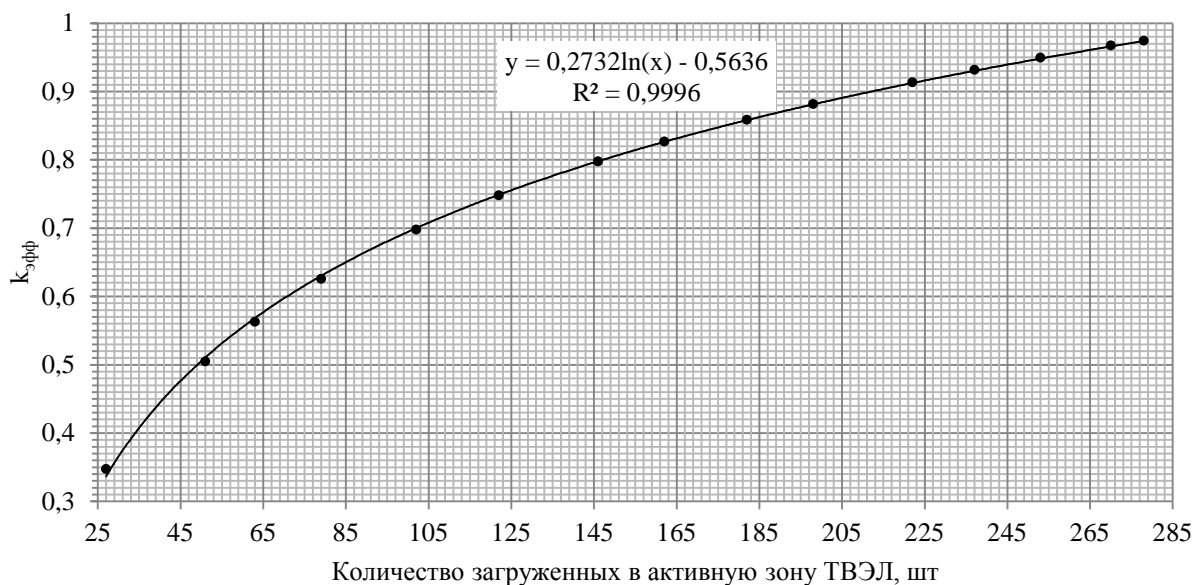


Рисунок 1. – Эффективный коэффициент размножения нейтронов в ходе загрузки ядерного топлива в активную зону

Полученное значение эффективной доли запаздывающих нейтронов для подкритической сборки «Яліна-Тепловая» характерно для системы с окисным топливом 10%-ного обогащения по  $^{235}\text{U}$  в условиях теплового спектра нейтронов.

**Вклад в реактивность свинцовой мишени, расположенной в центральной полости сборки.** Свинцовая вставка моделирует нейтрон-производящую мишень полномасштабной ADS. Она находится в центре активной зоны в области с максимальной плотностью потока нейтронов. Присутствие свинцовой вставки в центральной области вносит незначительную положительную реактивность.

**Заклучение.** Подкритический стенд «Яліна» является ядерно-физической установкой для изучения кинетических параметров прототипа будущей ADS. С помощью кода MCNP выполнено расчетное моделирование пошаговой загрузки топлива в активную зону. Ход зависимости  $k_{эфф}$  от количества загружаемого на каждом шаге топлива имеет «безопасный» характер, что подтверждает правильность выбранной процедуры загрузки. По вкладу в реактивность твэлов в различных областях активной зоны получены закономерные результаты: наибольший вклад в реактивность имеют твэлы центральной области, наименьший – периферийной. Присутствие свинцовой вставки в центральной области вносит незначительную положительную реактивность. Полученное значение эффективной доли запаздывающих нейтронов для подкритической сборки «Яліна-Тепловая» ( $\beta_{эфф} = 0,00698 \pm 0,00003$ ) характерно для системы с окисным топливом 10%-ного обогащения по  $\text{U}^{235}$  в условиях теплового спектра нейтронов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Accelerator driven systems: energy generation and transmutation of nuclear waste. Status report IAEA-TECDOC-985.–Vienna: IAEA, 1997.
2. Briesmeister, J.F. MCNP – A General Purpose N-particle Transport Code, version 4C: Report LA-12625-M / J.F. Briesmeister. – Los Alamos National Laboratory, 2000.
3. Правила ядерной безопасности подкритических стендов: постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 30 дек. 2006 г. № 72 // Нормативные правовые акты в области обеспечения ядерной безопасности. – Минск: ДИЭКОС, 2008. – 184 с.
4. Подкритический стенд «Яліна» для генерации нейтронов и экспериментальных исследований в области ADS-технологии / В.В. Бурнос [и др.]. – Минск, 2006. – 22 с.– (Препринт / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; ОИЭЯИ-24).
5. Chadwick, M.B. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections,

- Covariances, Fission Product Yields and Decay Data/ M.B. Chadwick, M. Herman [et al] // Nuclear Data Sheets. – V. 112, Issue 12. – 2011. – P. 2887 – 2996.
6. Chigrinov, S.E. Experimental Research of the Transmutation of Long-Lived Fission Products and Minor-Actinides in a Sub-critical Assembly Driven by a Neutron Generator / S.E. Chigrinov [et al] // ADTTA'96: Proceedings Conference, Kalmar. – Sweden, 1996. – P. 737-744.
  7. Bowman, C.D. Accelerator Driven Systems in Nuclear Energy. Role and Technical Approach: Report ADNA 97-013. ADNA Corporation / Los Alamos. – New Mexico, 1997.
  8. Теория ядерных реакторов [Электронный ресурс]: электрон. учеб.-метод. комплекс по учебным дисциплинам / В.В. Сорокин.– Свид. о включении в Гос. регистр информационного ресурса от 28.03.2016 № 1441607400. – Минск: БНТУ, 2016.– 136 с.
  9. Бекман, И.Н. Ядерная индустрия. Физика атомного реактора / И.Н. Бекман. – М.: Изд-во МГУ. – 2005. – 867 с.

## CALCULATION OF REACTIVITY EFFECTS IN THE SUBCRITICAL ASSEMBLY WITH THERMAL NEUTRON SPECTRUM DRIVEN BY AN EXTERNAL SOURCE OF NEUTRONS

Mariya Shyshkina

Yurii Fokov

Cristina Routkovskaia

Alla Koulikovskaya

State Scientific Institution «The Joint Institute for Power and Nuclear Research-Sosny» of NAS of Belarus, Minsk, Belarus

*Purpose.* The subject of inquiry is subcritical assembly «Yalina-Thermal» with thermal neutron spectrum driven by external neutron sources operating at the «JIPNR-Sosny» of the NAS of Belarus.

The objective of the work was analytical study of the assembly «Yalina-Thermal» reactivity changes in the course of nuclear fuel loading into the core.

*Methods.* To calculate the mentioned parameters by MCNP code the input file has been created simulating in detail the assembly's geometry and structure of neutron energy groups.

*Findings.* The «Yalina» facility was conceived for the purpose of investigating the static and dynamic neutronics properties of accelerator driven sub-critical systems, and to serve as a neutron source for investigating the properties of nuclear reactions, in particular transmutation reactions involving minor-actinide nuclei.

*Application field of research.* The obtained results could be used for further studies of the kinetic parameters of the subcritical assembly «Yalina».

*Conclusions.* Using the MCNP code the stepwise process of fuel loading into the core was simulated, the reactivity value of fuel rods in central, intermediate and peripheral regions of the core was estimated, as well as reactivity value of the lead target, contribution to the effective fraction of delayed neutrons.

*Keywords:* effective neutron multiplication factor, reactivity effects, effective fraction of delayed neutrons.

(The date of submitting: May 29, 2017)

### REFERENCES

1. Accelerator driven systems: energy generation and transmutation of nuclear waste. Status report IAEA-TECDOC-985. Vienna: IAEA, 1997.
2. Briesmeister J.F. *MCNP – A General Purpose N-particle Transport Code*, version 4C: Report LA-12625-M. J.F. Briesmeister. Los Alamos National Laboratory, 2000.
3. *Pravila yadernoy bezopasnosti podkriticheskikh stendov: postanovlenie Ministerstva po chrezvychaynym situatsiyam Respubliki Belarus' ot 30.12.2006. No. 72. Normativnye pravovye akty v oblasti obespecheniya yadernoy bezopasnosti.* Minsk: DIEKOS, 2008. 184 p. (rus)
4. Burnos V.V. and oth. *Podkriticheskiy stend «Yalina» dlya generatsii neytronov i eksperimental'nykh issledovaniy v oblasti ADS-tekhnologii.* Preprint, Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. Minsk, 2006. 22 p. (rus)
5. Chadwick M.B., Herman M. and oth. ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data, *Nuclear Data Sheets*. 2011. V. 112, Iss. 12. Pp. 2887-2996.
6. Chigrinov S.E. and oth. Experimental Research of the Transmutation of Long-Lived Fission Products and Minor-Actinides in a Sub-critical Assembly Driven by a Neutron Generator. *ADTA'96: Proceedings Conference Kalmar. Sweden, 1996.* Pp. 737-744.
7. Bowman C.D. *Accelerator Driven Systems in Nuclear Energy. Role and Technical Approach.* Report ADNA 97-013. ADNA Corporation. Los Alamos. New Mexico, 1997.
8. Sorokin V.V. *Teoriya yadernykh reaktorov: electronic educational and methodical complex for educational disciplines.* Certificate of inclusion in the State Register of Information Resources of March 28, 2016 No. 1441607400. Minsk: BNTU, 2016. 136 p. (rus)
9. Bekman I.N. *Yadernaya industriya. Fizika atomnogo reaktora.* Moscow, MSU Publishing House. 2005. 867 p. (rus)