УДК 621.039

ОЦЕНКА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ "ЯЛІНА—ТЕПЛОВАЯ" В РАМКАХ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РОЖДЕНИЯ И ГИБЕЛИ

© 2022 г. Т. Н. Корбут¹, М. В. Зубарева^{1, *}

¹Государственное научное учреждение "Объединенный институт энергетических и ядерных исследований — Сосны" Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

> *E-mail: mv.bobkova@sosny.bas-net.by Поступила в редакцию 18.04.2022 г. После доработки 13.05.2022 г. Принята к публикации 23.05.2022 г.

Представлены результаты оценки параметров размножающей среды "Яліна—Тепловая", полученные с помощью физической модели рождения и гибели частиц. Представленная модель является аналитическим методом, описывающим размножение нейтронов, в которой используются физические параметры среды. Получены выражения для основных характеристик размножающей среды реактивность и среднее число частиц к данному моменту времени. С использованием полученных выражений были оценены нейтронно-физические параметры подкритической сборки "Яліна— Тепловая".

DOI: 10.31857/S0367676522090137

введение

В настоящее время в физике ядерных реакторов существуют аналитические методы для описания процессов, протекающих в активной зоне теплового ядерного реактора. Такие методы позволяют проводить физическую интерпретацию исследуемым процессам и давать быструю оценку наиболее важным эксплуатационным параметрам энергетических и экспериментальных ядерных установок (эффективный коэффициент размножения, реактивность, логарифм спада нейтронного потока и т.д.) без применения прецизионных нейтронно-физических кодов.

Физическая модель рождения и гибели частиц (далее – ФМРГ) является аналитическим подходом для описания процессов взаимодействия нейтронов с размножающей средой теплового реактора. В ряде работ проводился анализ расчетов нейтронно-физических характеристик с помощью ФМРГ для подкритических сборок MASUR-СА [1, 2], KUCA [1, 2] и VENUS-F [2]. Результаты сравнения с экспериментальными данными подтвердили корректность использования модели для описания активной зоны подкритических сборок. Математический аппарат модели основан на модели рождения и гибели частиц [3, 4], в рамках которой ранее в приближении линейного роста была предложена теория теплового реактора, работающего в стационарном режиме. Э.А. Рудаком в рамках модели были рассмотрены процессы, протекающие в активной зоне, где изучалась реакция размножающей среды на попадание в нее одного нейтрона, а также вклад запаздывающих нейтронов [5, 6]. Активная зона ядерного реактора рассматривалась как ансамбль точечных реакторов, что позволяет получать средние значения параметров, характеризующих состояние системы в целом. На основе модели изучались свойства радиоактивного распада частиц в рамках Пуассоновского, биномиального и субпуассоновского распределений с определением границ применимости каждого из них [7, 8]. Модель рождения и гибели применима к описанию процессов, протекающих в размножающей среде, как для критических, так и для подкритических ядерных систем.

Нахождение по данным эксперимента значений реактивности подкритических ядерных систем является одним из актуальных вопросов в прикладной физике нейтронов. В связи с этим в данной работе на примере сборки "Яліна—Тепловая" была рассмотрена возможность экспериментально-теоретической оценки реактивности ρ в подкритических системах, которую дает физическая модель рождения и гибели.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РОЖДЕНИЯ И ГИБЕЛИ

В физической модели рождения и гибели интенсивности рождения λ и гибели μ выражены через характеристики среды. Такими характеристиками являются: λ_f — вероятность деления ядра нейтроном; λ_c — вероятность гибели нейтрона; ν — математическое ожидание числа вторичных нейтронов в одном акте деления [9]. Для установления связи между параметрами λ , μ и параметрами среды рассматривается однородный процесс, когда интенсивности рождения и гибели не зависят от времени, $\lambda(t) = \lambda$ и $\mu(t) = \mu$. Тогда среднее число нейтронов к моменту времени t [5]

$$M(t) = \exp[(\lambda - \mu)t] = \exp[(\lambda/\mu - 1)\mu t], \quad (1)$$

где $1/\mu = \tau$ — среднее время жизни нейтрона в модели рождения и гибели в приближении линейного роста, а μt — безразмерное время в единицах времени жизни одного поколения нейтронов.

Эффективный коэффициент размножения нейронов, выраженный через характеристики среды [9]

$$K = \nu \lambda_f / (\lambda_f + \lambda_c).$$
 (2)

В модели рождения и гибели реактивность имеет вид [3]

$$\rho = (K-1)/K =$$

$$= [\exp(\lambda/\mu - 1) - 1]/\exp(\lambda/\mu - 1) = (3)$$

$$= 1 - \exp[-(\lambda/\mu - 1)] \approx \lambda/\mu - 1$$

или из (2) и (3)

$$\rho = K - 1 = \lambda/\mu - 1 \approx \nu \lambda_f / (\lambda_f + \lambda_c) - 1.$$
 (4)

В физической модели рождения и гибели в выражении для реактивности ρ (4) учтена множественность в рождении мгновенных нейтронов, чего нет в обычной модели рождения и гибели. При

$$\frac{\lambda}{\mu} - 1 \rightarrow 1$$
 получаем $\lambda_f \nu / (\lambda_f + \lambda_c) \approx \lambda / \mu$. Тогда
 $\lambda = \nu \lambda_f$ и $\mu = \lambda_f + \lambda_c$. (5)

Выражение для среднего числа частиц в систе-
ме
$$M(t)$$
 из (1) и (5) с учетом запаздывающих ней-
тронов [1, 2]

$$M(t) = \exp\{\left[\lambda_f \beta / (\lambda_f + \lambda_c) + \rho\right] t / \tau_{\rm M} \right\},\tag{6}$$

где $\rho \approx K - 1$ — реактивность, β — эффективная доля запаздывающих нейтронов, τ_{M} — время жизни мгновенных нейтронов.

Из выражения для среднего числа нейтронов можно получить выражение для реактивности, если время *t* подобрать таким образом, чтобы $\ln[M(t_1)/M_0] = -1$, где M_0 – число частиц в начальный момент времени [1, 2]. Тогда реактивность

$$\rho \approx \lambda/\mu - 1 = -\tau_{\rm M}/t_1, \qquad (7)$$

где t_1 — время, за которое число частиц в системе уменьшилось в *е* раз.

Выражения (1), (2) использовались для оценки нейтронно-физических характеристик подкритической сборки "Яліна—Тепловая".

ПОДКРИТИЧЕСКАЯ ЯДЕРНАЯ СБОРКА "ЯЛІНА–ТЕПЛОВАЯ"

Изучение статистических и динамических характеристик нейтронных полей, а также определение условий трансмутации долгоживущих минор-актинидов в подкритических ядерных системах, управляемых ускорителем, является актуальной задачей в настоящее время. Для таких целей в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований — Сосны была построена исследовательская ядерная установка (ИЯУ) "Яліна", включающая нейтронный генератор высокой интенсивности и две подкритические сборки: "Яліна—Бустер" с быстрым спектром нейтронов и "Яліна—Тепловая" — с тепловым [10].

"Яліна-Тепловая" – подкритическая ядерная установка нулевой мощности, работающая от обычного нейтронного генератора высокой интенсивности. В сборке возможно использовать различные внешние источники нейтронов для запуска ядерных реакций. Это могут быть источник нейтронов спонтанного деления ²⁵²Сf или ускоритель дейтронов с тритиевой или дейтериевой мишенью. В последнем случае нейтроны образуются в результате реакции $D(d,n)^{3}$ Не или $T(d,n)^{4}$ Не с помощью ускорителя дейтронов НГ-12-1. В результате реакций дейтронов с дейтерием или тритием образуются нейтроны с энергией 2.5 или 14.1 МэВ соответственно. Калифорниевый источник ²⁵²Сf позволяет получать нейтроны спонтанного деления с максвеловским спектром со средней энергией 2 МэВ [10, 11].

Максимальное количество топливных стержней в сборке составляет 285 твэлов, что соответствует эффективному коэффициенту размножения нейтронов $K_{eff} = 0.975$.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе анализируются данные экспериментов, которые проводились на подкритической сборке "Яліна—Тепловая" с двумя загрузками активной зоны 245 (рис. 1*a*) и 280 (рис. 2*a*) твэлов. Активная зона заполнялась урановыми стержнями ²³⁵U 10% обогащения, а в качестве источника внешних нейтронов использовался ускоритель дейтронов с дейтериевой мишенью, т.е. нейтроны с энергией 2.5 МэВ [11].

На рис. 16 и 26 представлены полученные зависимости среднего числа нейтронов от времени M(t) для двух загрузок "Яліны—Тепловой" 245 и

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 86 № 9 2022



Рис. 1. Результат расчета среднего числа нейтронов в системе (*б*) для загрузки активной зоны подкритической сборки "Яліна—Тепловая" 245 твэлов и экспериментального канала EC2 (*a*).



Рис. 2. Результат расчета среднего числа нейтронов в системе (*б*) для загрузки активной зоны подкритической сборки "Яліна—Тепловая" 280 твэлов и экспериментального канала EC2 (*a*).

280 твэлов соответственно в экспериментальном канале ЕС2. Как видно из полученного результата, физическая модель рождения и гибели частиц корректно описывает спад нейтронного потока в экспериментальном канале сборки "Яліны—Тепловой" для двух рассматриваемых загрузок. Оценка реактивности показала, что в рамках физической модели рождения и гибели корректно определяется величина реактивности с отклонением теоретического значения от экспериментального, не превышающим 0.01, что является хорошим результатом для аналитического метода.

Эксп. канал	Загрузка	$\langle t_1 angle$, мс	τ _м , мс	$\rho_{\mathrm{reop}} = -\tau_{\mathrm{m}}/\langle t_1 \rangle$	$\rho = K_{eff} - 1$	$\Delta \rho = \left \rho_{\text{teop}} - \rho_{\text{teop}} \right $
EC2	245	0.82	0.0689	-0.084	-0.077	0.007
EC2	280	1.34	0.0767	-0.057	-0.050	0.007

Таблица 1. Сравнение значений реактивности, полученные экспериментальным методом площадей и методом физической модели рождения и гибели

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для эксплуатируемой в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований -Сосны НАН Беларуси подкритической сборки "Яліна-Тепловая", впервые представлены аналитические оценки реактивности ρ и среднего числа нейтронов M(t) к моменту времени t в диапазоне от 0 до ~4 мс. Результаты расчета получены для нескольких экспериментов с использованием 10% обогащенного уранового топлива – случай загрузки 245 и 280 твелами. Данная работа показывает возможность проводить исследования нейтронно-физических характеристик подкритической сборки "Яліна-Тепловая" аналитическим методом, зная физические параметры размножающей среды. Такие работы необходимо проводить при подготовке специалистов в области использования атомной энергии для глубокого понимания процессов, протекающих в активной зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Korbut T.N.* // Nonlinear Phenom. Complex Syst. 2020. V. 23. No. 4. P. 428.

- Bobkova M.V. // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1689. Art. No. 012016.
- 3. *Bharucha-Reid A.T.* Elements of the theory of Markov processes and their applications. N.Y.: McGraw Hill, 1960.
- 4. Kendall D.G. // Ann. Math. Stat. 1948. V. 19. P. 1.
- 5. Корбут Т.Н., Кузьмин А.В., Рудак Е.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 4. С. 503; Korbut T.N., Kuz'min A.V., Rudak E.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 4. P. 461.
- Корбут Т.Н., Кузьмин А.В., Петровский А.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 82. № 10. С. 1438; Korbut T.N., Rudak E.A., Petrovskiy А.М. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 10. P. 1308.
- Kravchenko M.O., Korbut T.N., Rudak E.A., Piatrouski F.M. // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 1133. Art. No. 012023.
- Kravchenko M.O., Rudak E.A., Korbut T.N et al. // EPJ Web Conf. 2019. V. 201. Art. No. 08004.
- 9. Дорогов В.И., Чистяков В.П. Вероятностные модели превращения частиц. М.: Наука, 1988.
- Mazanik S. Theoretical and experimental research of neutrons of Yalina-booster subcritical assembly driven by a neutron generator. Minsk: JIPNR-Sosny, 2013. P. 27.
- 11. Talamo Al. // ANL-NE-10/17. 2010. P. 165.

Neutron-physical characteristics estimation of the subcritical assembly "Yalina—Teplovaya" within the physical birth-and-death model

T. N. Korbut^{a, *}, M. V. Zubareva^a

^a The Joint Institute for Power and Nuclear Research—Sosny, Minsk, BY-220109 Belarus *e-mail: mv.bobkova@sosny.bas-net.by

We presented the results of estimating the parameters of the multiplying media "Yalina–Teplovaya", obtained using a physical model of the birth and death of particles. The model presented in the work is an analytical method describing neutron multiplication, in which the physical parameters of the media are used. We obtained the expressions for the main characteristics of the multiplying media—reactivity and the average number of particles by the time. Using the obtained expressions, the neutron physical parameters of the "Yalina– Teplovaya" subcritical assembly were estimated.