

## Влияние жёсткости спектра нейтронов на глубину выгорания топлива и скорость накопления актинидов

Т. М. Абукудаира<sup>1,2,\*</sup>, Ю. В. Стогов<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Кафедра ядерной инженерии, иорданский университет науки и техники. Иордания, 22110, Ирбид

<sup>2</sup>Кафедра теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов,  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ  
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

(Поступила в редакцию 01.02.2021; подписана в печать 07.06.2021)

Одним из основных факторов, влияющих на процесс выгорания топлива, является формируемый спектр нейтронов. В работе изучено влияние спектра нейтронов на глубину выгорания ядерного топлива и скорость накопления актинидов в решётках типа ВВЭР. Была выбрана тепловыделяющая сборка типа ВВЭР–1000 с топливом из низкообогащённого урана. Спектр нейтронов изменился путём изменения диаметра твэлов, а шаг решётки и толщина оболочки при этом не изменялись. Изменение диаметра твэлов приводит к изменению водо-уранового отношения ( $V_M/V_F$ ) и, соответственно, спектра нейтронов в активной зоне реактора. Нейтронно-физические расчёты проведены по трём программам: GETERA, MCU5 и Serpent. Показано, что использование сборок с более высокими соотношениями  $V_M/V_F$  приведет к увеличению глубины выгорания при одновременном уменьшении длины цикла. Кроме того, это смягчает спектр нейтронов и увеличивает долю плутония-240 в выгруженном топливе.

PACS: 28.41.Ak, 28.20.Gd УДК: 621.039.51

Ключевые слова: ВВЭР–1000, жёсткость спектра нейтронов, выгорание топлива.

### ВВЕДЕНИЕ

Доминирующим спектром нейтронов в реакторах с водой под давлением является спектр тепловых нейтронов. Однако этот спектр в значительной степени зависит от обогащения топлива и соотношения атомов водорода и урана. Следовательно, выбор соотношения атомов водорода и урана является важной задачей в процессе проектирования реактора.

Оптимизация спектра нейтронов в активной зоне реактора рассматривается как эффективный способ достижения высоких глубин выгораний. Изменение спектра нейтронов может осуществляться двумя основными способами: изменением обогащения и/или изменением водорода-топливного отношения Н/НМ [1]. Выбор Н/НМ должен быть достаточным для обеспечения отвода тепла, достижения максимального количества разводимого делящегося материала и количества добавления замедлителя для достижения максимального добавления реактивности при ограничении температурного коэффициента замедлителя отрицательным значением.

В реакторах типа ВВЭР нейтроны замедляются атомами водорода, присутствующими в лёгкой воде, поэтому спектр нейтронов можно изменять, регулируя водо-топливное отношение Н/НМ, которое напрямую зависит от содержания в ядре замедлителя лёгкой воды [2, 3]. Изменение количества ядер замедлителя Н/НМ оказывает сильное влияние на спектр нейтронов [4, 5].

Важным этапом расчёта физики реактора является наличие программ компьютерного моделирования, способных выполнять различные задачи расчёта конструкции реактора. Эти компьютерные программы могут обеспечить достаточно точные решения для текущей проблемы по сравнению с данными реальной эксплуатации реактора. В этом исследовании в качестве основных инструментов для расчётов были выбраны программы: GETERA, основанная на методе вероятности первого столкновения [6], MCU и Serpent, основанные на программе Монте-Карло [7, 8].

### 1. ЖЁСТКОСТЬ СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ

В водо-водяных реакторах нейтроны имеют энергии, распределённые от 10.5 МэВ до тепловых энергий. Знание спектра нейтронов в активной зоне реактора является важной задачей в физических расчётах ядерного реактора. Отношение потока надтепловых нейтронов к тепловым известно, как жёсткость спектра нейтронов ( $\Upsilon$ ) [9].

Выбор двух энергетических групп является произвольной задачей (в разных работах были выбраны разные энергетические диапазоны), так как их общая цель — сравнение. Разделение энергий нейтронов на две энергетические группы показано в уравнении (1).

$$\gamma = \frac{\phi_2}{\phi_1} = \frac{\int_{1\text{эВ}}^{10.5\text{МэВ}} \phi(E) dE}{\int_{0\text{эВ}}^{1\text{эВ}} \phi(E) dE}, \quad (1)$$

Соотношение атомов водорода ( $H$ ) и топлива ( $HM$ ) обычно используется для представления степени замедления активной зоны в водо-водяных реакторах.

\*E-mail: thabitne@gmail.com

†E-mail: YVStogov@mephi.ru

Н/НМ — это отношение числа ядер водорода и топлива в элементарной ячейки [10]. Его можно вычислить по соотношению:

$$\frac{H}{HM} = \frac{\rho_{\text{замедлитель}} V_M}{\rho_{\text{топливо}} V_F}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{замедлитель}}$  и  $\rho_{\text{топливо}}$  — число ядер замедлителя и топлива в единице объема.  $V_M$  и  $V_F$  — это объём замедлителя и топлива,  $\frac{V_M}{V_F}$  — водо-топливное (урановое) отношение. Для водо-водяных реакторов с топливом из диоксида урана ( $\text{UO}_2$ ) Н/НМ равно:

$$\frac{H}{HM} = \frac{2M_{\text{UO}_2} \Upsilon_{\text{H}_2\text{O}} V_M}{M_{\text{H}_2\text{O}} \Upsilon_{\text{UO}_2} V_F}, \quad (3)$$

где  $\Upsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  и  $\Upsilon_{\text{UO}_2}$  являются плотностями воды и диоксида урана в  $\text{г/см}^3$ ,  $M_{\text{UO}_2}$  и  $M_{\text{H}_2\text{O}}$  — это молярная масса воды и диоксида урана. Поскольку плотность диоксида урана не изменяется в широком диапазоне температур, из выражения показано, что изменение водородо-топливного отношения Н/НМ может быть достигнуто путём изменения плотности воды, плотности топлива и/или водо-уранового отношения ( $V_M/V_F$ ).

Для элементарной ячейки ВВЭР (гексагональной решётки) водо-урановое отношение  $V_M/V_F$  может быть описано соотношением:

$$\frac{V_M}{V_F} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left( \frac{P}{D_F} \right)^2 - \left( \frac{D_C}{D_F} \right)^2, \quad (4)$$

где  $P$  представляет собой шаг решётки,  $D_C$  — диаметр твэла (внешний диаметр оболочки),  $D_F$  — диаметр топливной таблетки.

Таблица 1. Характеристики топливной сборки

Параметр	Описание
Состояние	Не отравленное на мощности состояние
Условие на границе ТВС	Отражение нейтронов
Температура топлива, К	1027
Температура нетопливных зон, К	575
Концентрация бора, ppm	600
Удельная мощность, МВт/м <sup>3</sup>	108

Следовательно, при изменении шага решётки или диаметра твэла меняется водо-урановое отношение. Изменение количества ядер замедлителя (Н/НМ) оказывает сильное влияние на спектр нейтронов. Таким образом, жёсткость спектра нейтронов является функцией Н/НМ.

## 2. МЕТОДИКА

### 2.1. ТВС типа ВВЭР-1000

Для данного исследования была выбрана тепловыделяющая сборка типа ВВЭР-1000 с топливом из низкообогащённого урана (LEU) [11]. Среднее обогащение  $^{235}\text{U}$  в сборке составляет  $\approx 3.7\%$ . Сборка состоит из 331 ячеек в гексагональной матрице, 12 твэгов-твэлов с гадолинием в качестве выгорающего поглотителя в форме  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  4 wt% расположены в сборке. Шаг решетки сборки составляет 23.6 см, а шаг гексагональной ячейки составляет 1.275 см. Оболочки и конструкционные материалы состоят из сплава Zr-Nb. Сборка показана на рис. 1.

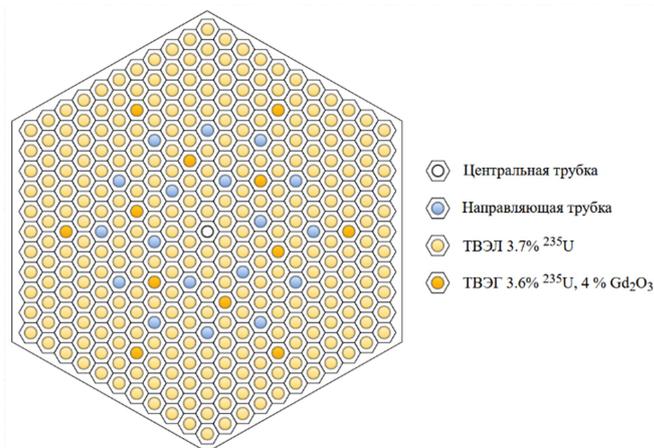


Рис. 1. ТВС типа ВВЭР-1000

Изучение влияния изменения жесткости спектра нейтронов в активной зоне реактора осуществляется путём изучения влияния этих изменений на тепловыделяющую сборку. Выполнен ряд расчётов для сборки с отражательными граничными условиями. Диаметр топливной таблетки варьировался в диапазоне от 6.72 мм до 8.72 мм с шагом 0.2 мм при диаметре твэла от 8.16 мм до 10.16 мм, а шаг решётки и толщина оболочки при этом не изменялись. Рабочие параметры сборки приведены в табл. 1.

### 2.2. Программы нейтронно-физического расчета

В этом исследовании в качестве основных инструментов для расчётов были выбраны программы: GETERA, основанная на методе вероятности первого столкновения, MCU и Serpent, основанные на программе Монте-Карло.

Программа GETERA предназначена для расчёта пространственно-энергетического распределения нейтронов в ячейках ядерного реактора и полиячейках [12]. Первая версия программы была создана в 1990 г. в Национальном исследовательском ядерном

Таблица 2. Выгружаемый плутоний в зависимости от  $V_M/V_F$ 

$V_M/V_F$	H/HM	Изотопный состав					Концентрация Pu ( $\text{г}/\text{см}^3$ )
		$^{238}\text{Pu}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	$^{242}\text{Pu}$	
2.83	5.94	0.43	68.94	16.98	11.53	2.12	0.058
2.6	5.46	0.48	68.85	16.47	11.93	2.27	0.061
2.39	5.02	0.51	69.23	15.84	12.15	2.27	0.064
2.19	4.61	0.51	69.91	15.22	12.19	2.16	0.066
2.02	4.24	0.51	70.78	14.56	12.13	2.02	0.068
1.85	3.89	0.51	71.83	13.89	11.90	1.87	0.070
1.7	3.57	0.49	73.08	13.16	11.59	1.69	0.072
1.56	3.28	0.46	74.54	12.45	11.09	1.47	0.072
1.43	3.01	0.42	76.21	11.70	10.44	1.24	0.073
1.31	2.75	0.37	77.87	11.01	9.72	1.02	0.072
1.2	2.52	0.32	79.85	10.28	8.75	0.80	0.070

университете (Московский инженерно-физический институт). Основные разработки программы были сделаны в Курчатовском институте позже [13]. Её библиотека содержит ядерные данные для 135 нуклидов в 299 энергетических группах [14] на основе библиотеки ядерных данных БНАБ-93. Программа показала очень хорошую возможность расчёта выгорания топлива [15, 16]. Тепловыделяющие сборки, содержащие несколько ячеек, в целом описываются моделью полиячеек.

MCU (Monte Carlo Universal) — проект по разработке универсального компьютерного кода для моделирования переноса частиц, таких как: нейтроны, фотоны, электроны и позитроны в трёхмерных системах с помощью метода Монте-Карло [17]. Проект был разработан в Курчатовском институте. MCU5-FREE — это бесплатный вариант версии MCU5, которая была разработана в 2009 г. для образовательных и исследовательских целей [18]. Она обеспечивает моделирование только для переноса нейтронов в трёхмерных системах. Основной банк данных MDBFREE50 включает в себя различные библиотеки. Этот банк содержит данные для 375 изотопов. Основными источниками для разработки банка данных являются BNAB, LIPAR, ENDF/B, JENDL и JEFF. Пакет MCU-5 содержит инструмент MCU-Office [19], ответственный за визуализацию входных и выходных данных.

Serpent — это универсальная трёхмерная транспортная программа частиц Монте-Карло с непрерывной энергией. Она разработана в научно-техническом центре VTT Финляндии [20]. Версия 2.1.29 использовалась с библиотеками, основанными на файлах оцененных данных ENDF/B-VII.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Спектр нейтронов

Влияние изменения  $V_M/V_F$  (H/HM) на спектр нейтронов можно видеть на рис. 2, где спектр нейтронов, представлен в 28-ми групповом разбиении энергии нейтронов БНАБ-93 с использованием программы MCU для трех разных водо-урановых отношений: 1.43, 1.85 (стандартная топливная таблетка) и 2.39.

Показано, что чем выше  $V_M/V_F$ , тем спектр смягчится в сторону тепловых нейтронов. Более низкий  $V_M/V_F$  означает более жёсткий спектр и, следовательно, представлены более быстрые нейтроны. Этот сдвиг в спектре нейтронов, вызванный изменением уровня замедления в сборке, приводит к изменению скорости реакции захвата и деления основных нуклидов.

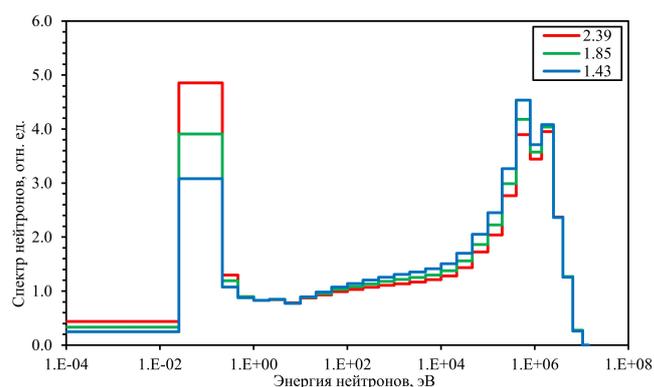


Рис. 2. Спектр нейтронов для разных водо-урановых отношений

Зависимость жёсткости спектра нейтронов от водо-уранового отношения  $V_M/V_F$  и водородо-топливного

отношения Н/НМ показана на рис. 3. Жёсткость спектра нейтронов уменьшилась по мере увеличения  $V_M/V_F$ . Более высокое  $V_M/V_F$  (Н/НМ) означает большее количество атомов водорода и, следовательно, лучшее замедление нейтронов (нейтроны будут иметь более низкие энергии в среднем). Результаты жёсткости спектра нейтронов, полученные тремя программами, показали хорошее согласие.

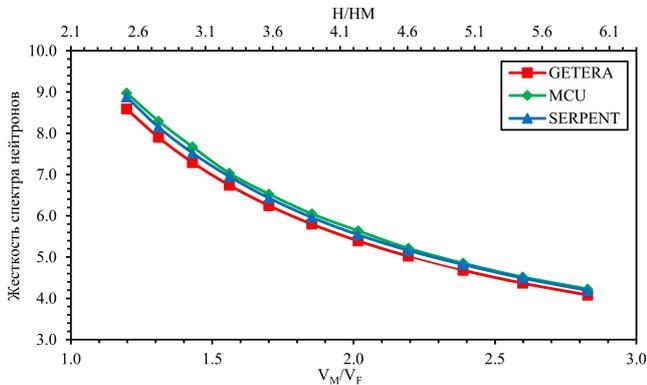


Рис. 3. Жёсткость спектра нейтронов в зависимости от  $V_M/V_F$

### 3.2. Коэффициент размножения

Н/НМ сборки был оптимизирован для того, чтобы достигнуть максимального увеличения в начальной реактивности в сборке и, следовательно, связанного увеличения в глубине выгорания топлива. Начальный бесконечный коэффициент размножения в зависимости от  $V_M/V_F$  и Н/НМ показан на рис. 4. Сборка со стандартными размерами (диаметр твэла = 9.16 мм) находится в области под замедлением. Для достижения максимального начального бесконечного коэффициента размножения требуется больше замедлителя в сборке.

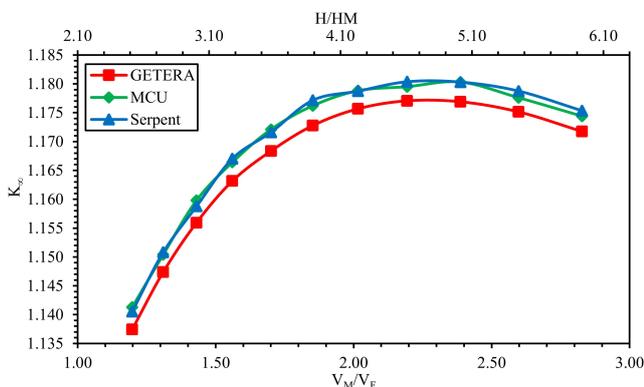


Рис. 4. Начальный  $k_\infty$  в зависимости от  $V_M/V_F$

Установлено, что оптимальное водо-урановое отно-

шение составляет 2.4, что соответствует водородо-топливному отношению равному 5. Уменьшение диаметра топливных таблеток увеличило начальный бесконечный коэффициент размножения до среднего значения ( $k_\infty = 1.17916$ ). Дальнейшее уменьшение диаметра топливной таблетки приводит к снижению коэффициента размножения из-за увеличения захвата атомами воды. Оптимальный диаметр топливных таблеток с точки зрения нейтронно-физических характеристик в начальной компании составил 7.1 мм (стандартный диаметр топливных таблеток 7.7 мм).

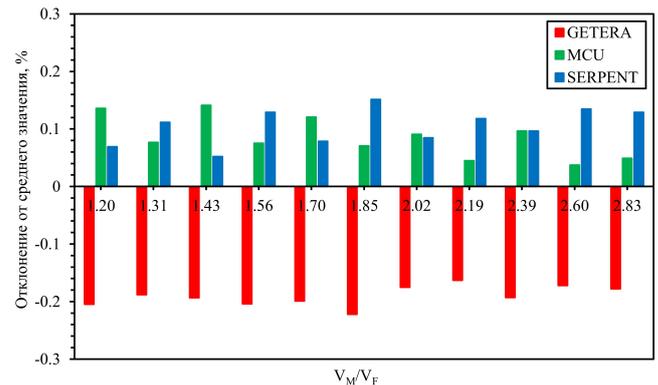


Рис. 5.  $k_\infty$  отклонение от среднего значения в зависимости от  $V_M/V_F$

По сравнению с MCU и Serpent результаты GETERA были ниже во всех случаях. Однако, оптимальный диаметр такой же, как в MCU и Serpent. На рис. 5 показано относительное отклонение результатов этих трёх программ от их среднего значения в зависимости от  $V_M/V_F$ .

### 3.3. Глубина выгорания топлива

Расчёты выгорания проводились с использованием программ GETERA и MCU. Топливо выгорело до значения бесконечного коэффициента размножения  $k_\infty = 1.03$  для учёта утечки. Глубина выгорания топлива в зависимости от  $V_M/V_F$  при однократной перегрузке топлива показана на рис. 6. Как правило, увеличение реактивности в начале кампании ( $k_\infty$  при ВОС) приведет к более высокому выгоранию. Таким образом, чем выше коэффициент размножения в начале цикла, тем выше достигнутое выгорание.

Поскольку выгруженное выгорание и продолжительность цикла в эффектах суток (EFPDs) конкурируют друг с другом, более высокие выгорания топлива с меньшим диаметром топливного стержня приводят к коротким циклам. На рис. 7 показана длина цикла в зависимости от  $V_M/V_F$ .

Рассмотрено, что увеличение топливной нагрузки (увеличение диаметра твэла) приводит к увеличению длины цикла за счёт увеличения накопления

$^{239}\text{Pu}$  и, следовательно, его доли в процессе деления. Самая достигнутая длительность цикла произошла с  $V_M/V_F = 1.7$  с EFPDs = 500.

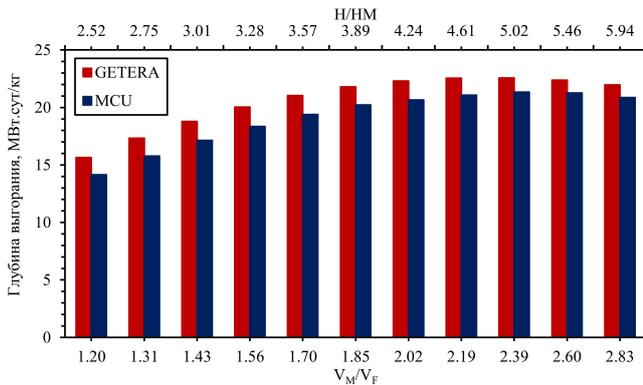


Рис. 6. Глубина выгорания топлива в зависимости от  $V_M/V_F$

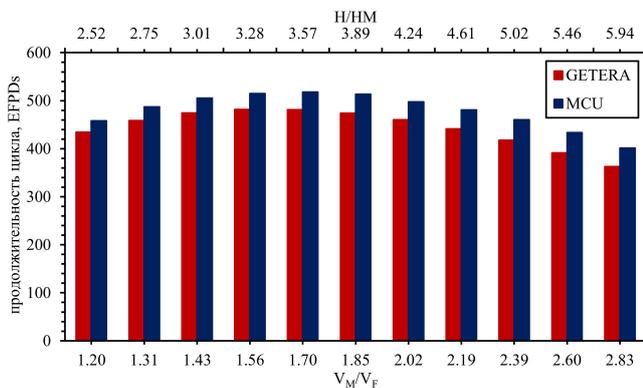


Рис. 7. Длина компании в зависимости от  $V_M/V_F$

### 3.4. Накопление актинидов

Учитывать изотопное содержание топлива при сбросе особенно важно при рассмотрении вопросов о пространстве и требований к хранилищу. В связи с постоянным накоплением плутония в хранилищах с большей актуальностью встает задача, если не уменьшить, то хотя бы стабилизировать накопление плутония. Выгружаемый плутоний и его изотопный состав в зависимости от  $V_M/V_F$  приведён в таб. 2.

Общая тенденция концентрации плутония представляет, что сборки с высокой степенью замедления (высокое  $V_M/V_F$ ) будут производить меньше плутония, чем сборки с меньшей степенью замедления. Производство плутония при данном выгорании монотонно увеличивается по мере уменьшения H/NM, в то время как удобство использования оружия увеличивается. Самая высокая концентрация плутония была достигнута при  $V_M/V_F = 1.43$ .

Что касается  $^{240}\text{Pu}$ , то с увеличением жёсткости спектра нейтронов (Ниже  $V_M/V_F$ ) его концентрация уменьшается. Так, использование тесных решёток приводит к ужесточению спектра нейтронов и увеличению концентрации  $^{239}\text{Pu}$  и уменьшению концентрации  $^{240}\text{Pu}$  (достигается оружейный плутоний). Это повышает риски распространения ядерного оружия.

Нептуний является доминирующим радиотоксическим элементом, характеризующимся чрезвычайно длительным периодом полураспада. Поэтому количество  $^{237}\text{Np}$  должно быть сведено к минимуму в высоко обработанном топливе. На рис. 8 показана концентрация нептуния в топливе при выписке.

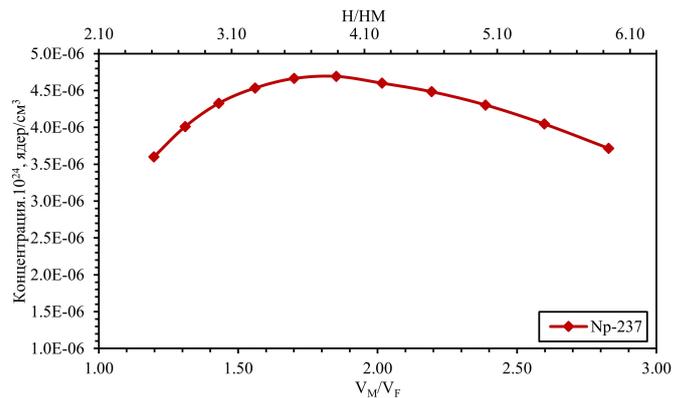


Рис. 8. Выгружаемые концентрации  $^{237}\text{Np}$  в зависимости от  $V_M/V_F$

В отличие от концентрации плутония пик нептуния происходит в точках, немного выходящих за пределы стандартной сборки. Максимальная выгружаемая концентрация  $^{237}\text{Np}$  получается в диапазоне  $V_M/V_F$  1-2, которому соответствуют энергии резонансных нейтронов.

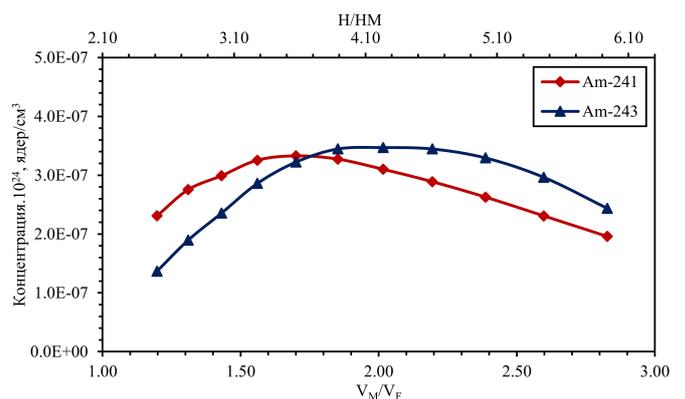


Рис. 9. Выгружаемые концентрации изотопов америция в зависимости от  $V_M/V_F$

Выгружаемые  $^{241}\text{Am}$  и  $^{243}\text{Am}$  в зависимости от  $V_M/V_F$  показаны на рис. 9. Показано, что максимальная концентрация  $^{241}\text{Am}$  получается при одном

и том же отношении  $V_M/V_F$  как для  $^{237}\text{Np}$ , поскольку  $^{237}\text{Np}$  представляет собой дочь изотопа  $^{241}\text{Am}$ .

Стандартная сборка приводит к максимальной концентрации  $^{243}\text{Am}$ . Жёсткий спектр нейтронов и соответствующее ему повышенное выжигание  $^{241}\text{Am}$  позволяют избежать накопления короткоживущего  $^{242}\text{Cm}$ , который обладает большим тепловыделением, что затрудняет работы с отработанным топливом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной задачей представленной работы являлся физический анализ влияния варьирования жесткости спектра нейтронов на основные параметры активной зоны реактора. Показано, что спектр нейтронов можно варьировать путем изменения водородо-топливного отношения путем изменения водо-уранового отношения.

Оптимальный диаметр твэла, с точки зрения нейтронно-физических характеристик для увеличения глубины выгорания, оказался ниже стандартного диаметра. Оптимальное отношение  $V_M/V_F$  равно 2.39 (Н/НМ равно 5.02). Показано, что использование сборок с более высокими соотношениями Н/НМ приведет к увеличению глубины выгорания при одновременном уменьшении длины цикла. В сборках с низким соот-

ношением Н/НМ выгорание было ограничено из-за того, что нейтроны вытекали из системы в результате захватов.

Результаты показали, что использование более тесных решёток приводит к увеличению жёсткости спектра нейтронов и к увеличению доли плутония-239 в выгруженном топливе. Использование решётки с высокой степенью замедления смягчает спектр нейтронов и увеличивает долю плутония-240 в выгруженном топливе.

Смягчение спектра нейтронов приводит к уменьшению накопления долгоживущих младших актинидов — нептуния, америция и кюрия (по сравнению со стандартной сборкой).

Результаты, полученные с использованием MCU и Serpent, показали очень хорошее согласие. Результаты GETERA показали отклонения от результатов, полученных по двум другим программам. Это отклонение в основном связано с тем, что GETERA является инженерной программой, которая решает стационарное уравнение переноса методом вероятности первого столкновения. Кроме того, отсутствие некоторых изотопов в библиотеке данных GETERA влияют на долю фактора этого отклонения. Некоторые изотопы гадолиния отсутствуют в библиотеке данных ( $^{152}\text{Gd}$ ,  $^{158}\text{Gd}$  и  $^{160}\text{Gd}$ ).

- 
- [1] *Abuqudaira T. M., Stogov Y. V.* J. Phys. Conf. Ser. 2020. **1689**.
  - [2] *Lindley B. A., Parks G. T.* Nucl. Eng. Des. 2016. **309**. P. 75.
  - [3] *Meghreblian R., Holmes D.* Reactor Analysis. (New York: McGRAW-HILL). 1960.
  - [4] *Xu Z., Driscoll M. J., Kazimi M. S.* Nucl. Sci. Eng. 2002. **141**. P. 175.
  - [5] *Weaver K. D., Herring J. S.* The effect of the hydrogen to heavy metal ratio (H/NM) on reactivity and discharge isotopics of homogeneous Thoria-Urania fuel 10th International Conference On Nuclear Engineering. 2002. P. 1.
  - [6] *Пряничников А. В.* Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия Физика Ядерных Реакторов. 2009. С. 63.
  - [7] *Алексеев Н. И., Большагин С. Н., Алексеевич Г. Е.* и др. // Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия Физика Ядерных Реакторов. 2011. С. 4–23.
  - [8] *Leppänen J., Pusa M., Fridman E.* // Ann. Nucl. Energy 2016. **96**. P. 126.
  - [9] *Бадалов А. Ф., Кононов С. Л.* Вопросы атомной науки и техники. Сер. физика и техника ядерных реакторов. 1988. P. 24.
  - [10] *Oka Y.* Nuclear Reactor Design, An Advanced Course in Nuclear Engineering. 2014.
  - [11] OECD NEAA VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark. 2002.
  - [12] *Belousov N., Bichkov S., Marchuk Y., Prianchnikov A., Savander V., Fyodorov I.* // The Code GETERA for Cell and Polycell Calculations. Models and Capabilities. Proc. of the 1992 Topical Meeting on Advances in Reactor Physics (Charleston Sheraton, Charleston, SC, USA) 1992. P. 2-516.
  - [13] *Пряничников А. В.* Разработка комплекса GETERA для расчёта нейтронно-физических характеристик ТВС ВВЭР методом вероятностей первых столкновений. 2011.
  - [14] *Dawahra S.* et al. Ann. Nucl. Energy. 2015. **78**. P. 89.
  - [15] *Khattab K., Dawahra S.* Ann. Nucl. Energy. 2011. **38**. P. 1442.
  - [16] *Abuqudaira T., Stogov Y.* J. Phys. Conf. Ser. 2018. **1133**. P. 1.
  - [17] *Kalugin M. A.* et al. Ann. Nucl. Energy. 2015. **82**. P. 54.
  - [18] *Alekseev N. I.* et al. Phys. At. Nucl. 2012. **75**. P. 1634.
  - [19] *Gurevich M. I.* et al. Graphical representation of the initial data and computational results for the MCU computer code. At. Energy. 2005. **99**. P. 597.
  - [20] *Leppänen J.* et al. Ann. Nucl. Energy. 2014. **82**. P. 142.

## Impact of neutron spectrum hardness on burnup depth and accumulation of actinides

T. M. Abuqudaira<sup>1,2,a</sup>, Y. V. Stogov<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>*Department of Nuclear Engineering, Jordan University of Science and Technology, Irbid 22110, Jordan*

<sup>2</sup>*Department of Theoretical and Experimental Physics of Nuclear Reactors, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe highway, 31, Moscow 115409, Russia*  
E-mail: <sup>a</sup>thabitne@gmail.com, <sup>b</sup>YVStogov@mephi.ru

One of the main factors affecting the process of fuel burnup is the formed neutron spectrum. The influence of the neutron spectrum on the burnup depth of nuclear fuel and the accumulation of actinides in VVER type lattices is studied. A fuel assembly of the VVER-1000 type reactor fueled with low-enriched uranium was selected. The neutron spectrum was varied by varying the diameter of the fuel rods, the lattice pitch and clad thickness remained constant. A change in the diameter of the fuel rods leads to a change in the moderator to fuel volume ratio ( $V_M/V_F$ ) and, accordingly, the neutron spectrum in the reactor core. Neutronics calculations were performed using three programs: GETERA, MCU5, and Serpent. It is shown that the use of assemblies with higher  $V_M/V_F$  ratios will lead to an increase in the burnup depth while reducing the cycle length. In addition, it softens the neutron spectrum and increases the proportion of plutonium-240 in the discharged fuel.

PACS: 28.41.Ak, 28.20.Gd.

*Keywords:* VVER-1000, Hardness of neutron spectrum, fuel burnup.

*Received 01 February 2021.*

### Сведения об авторах

1. Абукудаира Табит Мохаммад Ахмад — магистр, науч. сотрудник; e-mail: thabitne@gmail.com.
2. Стогов Юрий Владимирович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; e-mail: YVStogov@mephi.ru