

Сравнение различных схем спектрального регулирования с применением вытеснителей

А.А. Воронцова* Р.А. Внуков†

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ (ИАТЭ НИЯУ МИФИ)

Россия, 249039, г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1

(Поступила в редакцию 10.06.2024; подписана в печать 20.11.2024)

В настоящей работе рассматривается один из возможных подходов к компенсации избыточной реактивности в начале кампании — спектральное регулирование. Его реализация основывается на применении стержней-вытеснителей, меняющих водо-топливное отношение в течение топливной кампании. Для оценки влияния на нейтронно-физические характеристики, возникающих в сборке при внесении в ее конструкцию вытеснителей, предлагаются различные модели, отличающиеся размещением стержней в ТВС. Сравнение происходит с исходной версией ТВС, имеющей схожую геометрию с ТВС ВВЭР-1200. Основываясь на одной схеме регулирования водо-топливного отношения, оценивается вклад в продление топливной кампании для моделей с вытеснителями. Сравнение осуществляется с исходными ТВС, где топливная кампания равна 49 МВт·сутки/кг для модели 1 и 78 МВт·сутки/кг для модели 2. Результаты показали принципиальную возможность продления топливной кампании за счет поэтапного извлечения стержней-вытеснителей, ужесточающих спектр. В модели, имеющей вытеснители в межтвэльном пространстве продление кампании составило 8 МВт·сутки/кг, что эквивалентно 16%; в модели, где вытеснители размещаются в направляющих каналах, продление составило 6 МВт·сутки/кг, что эквивалентно 5%. Полное замещение борной кислоты в рассматриваемых версиях оказалось невозможным, при этом требуемая концентрация H_3BO_3 в теплоносителе для компенсации избыточной реактивности в начале кампании выросла ввиду снижения эффективности бора при более жестком спектре нейтронов в моделях.

PACS: 31.15.-p

УДК: 621.039.5

Ключевые слова: спектральное регулирование, ТВС, борная кислота, топливная кампания, легководный реактор.

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент одной из наиболее обсуждаемых тем в ядерном обществе является перспектива топливообеспечения в связи с потенциальным истощением запасов делящегося изотопа урана [1]. Учитывая увеличивающуюся с каждым годом потребность в электричестве [2], можно ожидать рост потребности в строительстве новых АЭС (в основном в азиатском и африканском регионах) и энергоблоков на имеющихся станциях. Вместе с увеличением количества станций возрастут и масштабы выгружаемого ОЯТ, и, как следствие, необходимость переработки и хранения. На сегодняшний день запасы урана в земной коре оцениваются в 16 млн тонн [3]. По некоторым наиболее оптимистичным прогнозам, этих запасов хватит от 96 до 125 лет при разной себестоимости добычи [4]. Таким образом, в ближайшее столетие необходим поиск возможного решения этой проблемы, которым может стать переход к технологиям замыкания топливного цикла. Одним из перспективных способов проведения данного перехода является улучшение уже существующих тепловых реакторов для повышения эффективности их работы в условиях развивающейся ядерной энергетики. Первым шагом необходимо осуществить вовлечение воспроизводящих изотопов и ^{238}U и ^{232}Th ,

их конверсию в делящиеся ^{239}Pu , ^{233}U путем введения в эксплуатацию реакторов со спектральным регулированием. В настоящей работе предлагается рассмотреть использование вытеснителей в решетках ВВЭР-1200 [5] и проекта перспективного ВВЭР-С [6]. В обоих случаях предлагается уменьшать водо-урановое отношение не за счет изменения аксиального положения вытеснителей, а за счет уменьшения их радиуса. Технологически если эту пучок вытеснителей, достаточно извлекать по одному вытеснителю (актуально для проекта ВВЭР-С). В случае с решеткой ВВЭР-1200 предлагается рассмотреть концентрический вытеснитель с стержневой конструкцией в центре. При такой концепции кольцо большого радиуса извлекается приводами по мере выгорания топлива. На текущий момент не существует проектов по вовлечению подобной конструкции в атомной технике, при этом возможно задействование опыта из других отраслей, в частности, нефтедобывающей [7]. Оценивается возможность продления топливной кампании при задействовании вытеснителей. Так как извлечение вытеснителей рассматривается только радиально, оценивается также и необходимая концентрация борной кислоты для компенсации избыточной реактивности.

1. СПЕКТРАЛЬНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Запас избыточной реактивности, который имеется в начале кампании, идет на компенсацию выгорания

* paradisecitymake@gmail.com

† levz555@mail.ru

топлива, появление продуктов деления (в частности, отравителей ксенона и самария). На старте его компенсируют различными органами регулирования: выгорающими поглотителями, борной кислотой в теплоносителе (в тепловых реакторах), пэлами из карбида бора либо других поглотителей. Логично, что чем выше запас реактивности, тем больше требуется поглотителей. В таком случае снижается эффективность использования нейтронов — вместо того, чтобы провоцировать дальнейшие деления, они будут испытывать другие типы взаимодействий.

В данной работе планируется рассмотреть спектральное регулирование, предполагающее ужесточение спектра нейтронов как подход к компенсации реактивности без применения поглотителей. В надтепловой области энергий многократно увеличивается сечение радиационного захвата ^{238}U . При данной реакции из него образуется ^{239}U , который распадается в ^{239}Np , а тот, в свою очередь в ^{239}Pu , являющийся делящимся изотопом, который в дальнейшем может использоваться как дополнительное топливо.

Подходы к реализации спектрального регулирования также различны между собой. Среди них можно выделить: разбавление теплоносителя тяжелой водой [8], изменение водо-уранового соотношения [9, 10], изменения плотности теплоносителя, основанные на уменьшении замедляющей способности теплоносителя при изменении его плотности по высоте (проект ВВЭР-СКД [11]), увеличения содержания пара и др. [12], комбинированные методы, заключающиеся в применении сразу нескольких из упомянутых выше способов в одной установке.

2. ТЯЖЕЛОВОДНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Впервые этот метод был предложен в 60-е годы прошлого века [8]. Подход основывается на применении смеси тяжелой и обычной воды в качестве замедлителя и теплоносителя. По мере выгорания топлива отношение $\text{D}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ уменьшается, доходя до нуля к концу кампании, увеличивая при этом реактивность. D_2O обладает меньшей замедляющей способностью, поэтому происходит смещение спектра нейтронов в резонансную область, где нейтроны успешно захватываются ^{238}U .

Данный подход привлекает к себе внимание из-за технологически простотой реализации: при использовании смеси тяжелой и легкой воды нет необходимости менять конструкцию ТВС или реактора целиком. Поскольку вся активная зона погружена в воду, можно провести равномерное регулирование спектра нейтронов, разбавляя теплоноситель тяжелой компонентой. При этом сохраняется безопасность установки [13]. Однако существенным минусом данного метода является дороговизна получения дейтерия и производства тяжелой воды. Учитывая объемы расхода теплоносителя в реакторе, целесообразность применения такого

способа не оправдана.

3. ИЗМЕНЕНИЕ ВОДО-ТОПЛИВНОГО СООТНОШЕНИЯ

Принцип работы этого метода компенсации избыточной реактивности заключается в введении в конструкцию ТВС подвижных стержней-вытеснителей, которые меняют водо-топливное отношение следующим образом: в начале кампании все вытеснители погружены в активную зону, максимально сокращая объем теплоносителя, а при приближении к концу кампании стержни постепенно выводятся, увеличивая водо-топливное соотношение [9].

При полном погружении вытеснителей происходит ужесточение спектра нейтронов из-за сокращения числа замедлений на водороде, тем самым увеличивается количество захватов нейтронов ядрами ^{238}U . По мере выгорания топлива и извлечения вытеснителей спектр будет смещаться в тепловую область энергий.

Существенным недостатком такого подхода к компенсации избыточной реактивности является необходимость равномерного расположения стержней, что влечет за собой внесение изменений в конструкцию ТВС. Также не последним вопросом в этой теме является стоимость изготовления стержней и привода, который регулирует их расположение по высоте в активной зоне. Таким образом, необходимо проводить дополнительные экономические расчеты для оценки эффективности применения данного метода спектрального регулирования в сравнении с другими. Однако сейчас реакторы со спектральным регулированием обозначены Росатомом как вектор развития технологий тепловых реакторов [14].

4. СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ

Для рассмотрения эффектов, возникающих в сборке при изменении ее конструкции добавлением вытеснителей, были созданы две модели, представленные на рис. 1. Моделирование проводилось в программном комплексе Serpent, реализующий метод Монте-Карло [15].

Как видно из рисунка, модель слева (модель 1) имеет схожую геометрию с ТВС ВВЭР-1200. За ее основу взята ТВС Z49, представляющая из себя сборку из 312 звёзов и 18 направляющих каналов, располагающихся в центральной части [5]. Для реализации спектрального регулирования в конструкцию сборки введены вытеснители, располагаемые в межзвёзельном пространстве. Материалом для стержней был принят циркониевый сплав Э110, а радиус поперечного сечения может изменяться от 0 до 2.5 мм в течение топливной кампании. На этапе моделирования ТВС было принято решение отказаться от направляющих (НК) и измерительных каналов (ИК) по двум причинам. Начиная

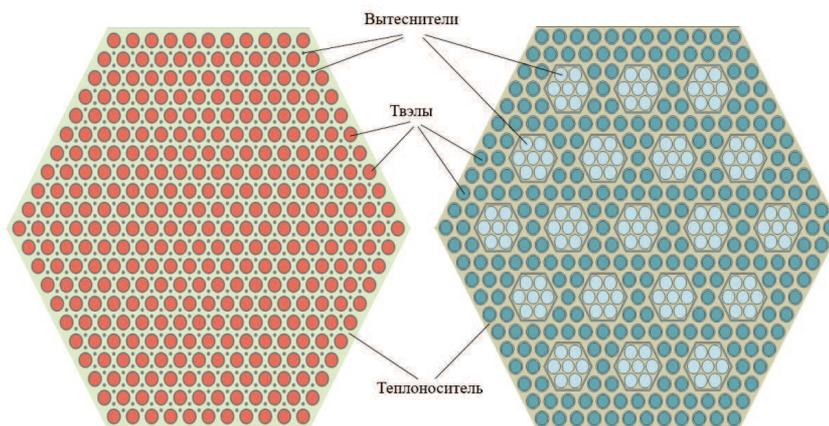


Рис. 1. Схемы моделей, использующихся в расчетах

с радиуса вытеснителя 1 мм, происходит касание стенок каналов стержнями, что может вызывать температурные напряжения в этой области (рис. 2).

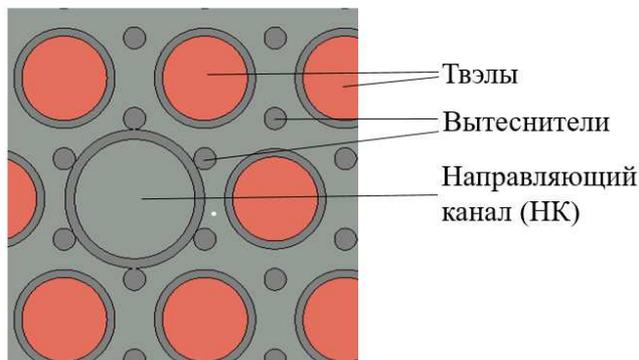


Рис. 2. Модель с направляющими каналами

Наличие двух систем компенсации реактивности, работающих схожим образом, излишне, что стало второй причиной отказа от НК и ИК. Увеличение количества твэлов до 331 требовало снижения обогащения топлива примерно до 4.68%, однако при моделировании исходное было оставлено на прежнем уровне, стандартном для реакторов типа ВВЭР, — 4.95%.

Правая модель на рис. 1 (модель 2) представляет собой одну из возможных конструкций ТВС реактора ВВЭР-С, разработанной Курчатовским институтом [6]. Направляющие каналы в сборке модернизированы таким образом, чтобы в них помещались 7 вытеснителей: в одном таком канале находится 6 стержней одного диаметра, а центральный — меньшего. Всего количество твэлов составляет 264, направляющих каналов — 19. Глубина выгорания данной ТВС увеличена относительно ВВЭР-1200 до 78 МВт-сутки/кг, при этом в НК возможно размещение органов регулирования СУЗ (пэлы из карбида бора). Материалом для вытеснителей выбран циркониевый сплав Э110, как и для ранее опи-

санной модели. Для сравнения с моделью 1 рассматривается урановое топливо с обогащением 4.95%.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первым рассматривалось влияние размера вытеснителя на бесконечный коэффициент размножения (Кбеск) для модели 1 и его сравнение с применением борной кислоты для компенсации избыточной реактивности. При моделировании кампании размер вытеснителя оставался неизменным, а концентрация борной кислоты изменялась так, чтобы Кбеск оставался на уровне 1.000. Зависимости приведены на рис. 3, а, б.

Подобная работа приводилась в [16], однако рассматривался вариант, когда используются и пэлы, которые размещаются в направляющих каналах (классические органы регулирования системы управления защиты), и вытеснители. Видно, что эффект растет нелинейно с увеличением радиуса вытеснителя. Схожие результаты представлены и в материалах диссертации Элазака. Применение же борной кислоты оказывается лучшим способом регулирования не только для компенсации избыточной реактивности, но и для продления топливной кампании, так как Кбеск в конце кампании оказывается наибольшим при сравнении с моделью с любым размером вытеснителей. Таким образом, полная замена борной кислоты неэффективна, а так как Кбеск при любом размере вытеснителей выше 1, полный отказ от борной кислоты для данного обогащения невозможен. В связи с меньшим объемом вытеснения цирконием теплоносителя в модели 2 относительно модели 1 и схожим топливным содержанием в ТВС оценка Кбеск от количества вытеснителей в НК не рассматривается, так как эффективность компенсации избыточной реактивности на начало кампании заведомо будет ниже.

Далее был оценен коэффициент воспроизводства для модели 1 на начало и в течение кампании топлива для

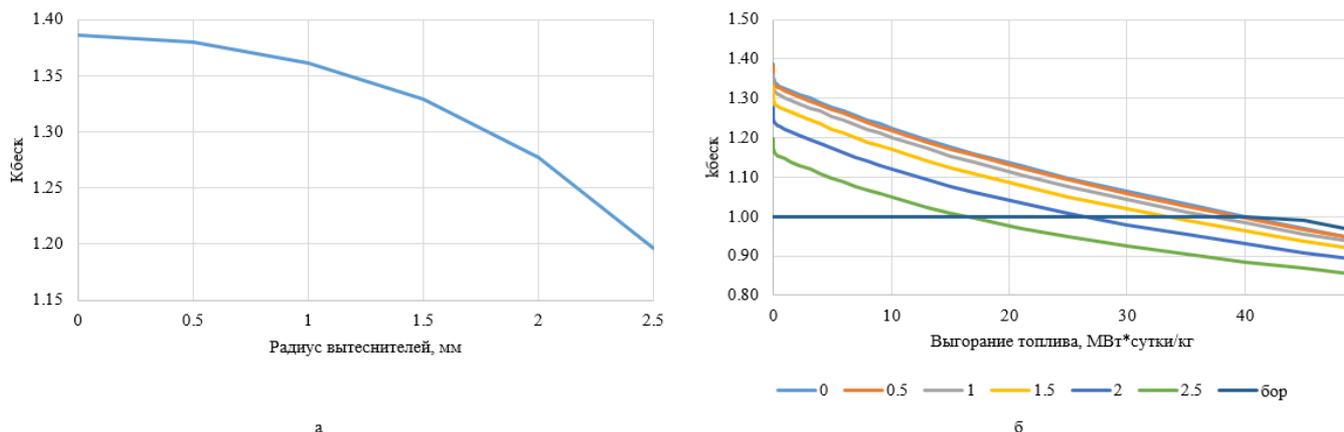


Рис. 3. Зависимость $K_{бесск}$ от радиуса вытеснителей, *a* – на начало кампании, *б* – в течение выгорания топлива

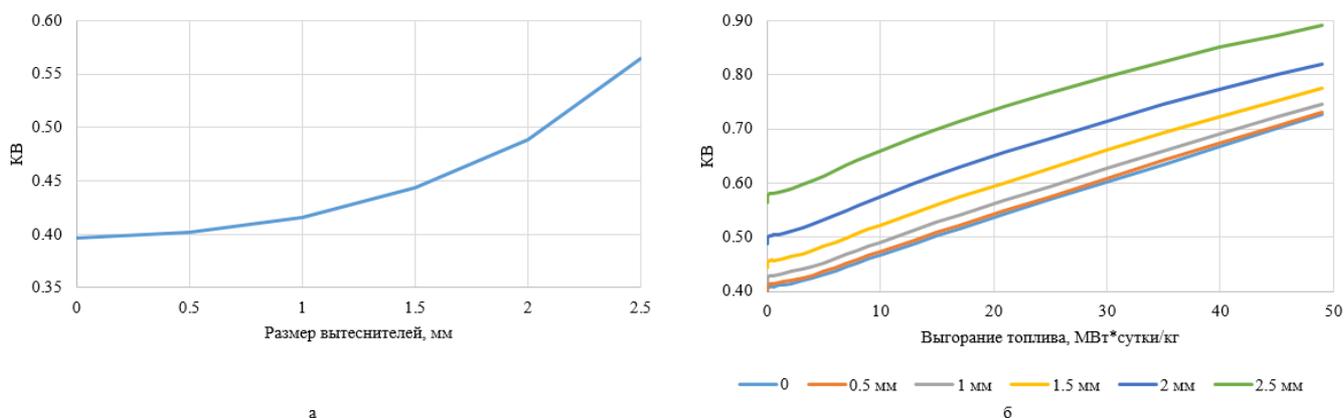


Рис. 4. Зависимость K_B от: *a* – размера вытеснителя, *б* – выгорания

вытеснителей всех размеров. Полученные зависимости отображены на рис. 4, *a*, *б*.

Очевидно, K_B практически обратно пропорциональна функции $K_{бесск}$, — происходит нелинейный рост при увеличении размера вытеснителя. К концу кампании наблюдается достижение максимальных значений, которые доходят до 0.89 для вытеснителя с радиусом 2.5 мм.

Для оценки вклада в продление кампании была применена следующая методика: на начало кампании в активной зоне параметр вытеснителя (количество, радиус сечения) максимален, далее при достижении концентрации борной кислоты 0 г/кг он меняется. Для модели 1 происходит постепенное уменьшение радиуса вытеснителя с шагом 0.5 мм, а для модели 2 — уменьшение числа вытеснителей с 7 до 0. Зависимости изменения $K_{бесск}$ в течение выгорания топлива приведены на рис. 5, *a*, *б*. Сравнение производится с исходными моделями с полностью выведенными стрежнями в обоих случаях.

Для обеих моделей оказывается возможным продление топливной кампании. Вклад для первой примерно равен 16%, для второй — 5%. Такую разницу можно

объяснить большим объемом вытеснения воды в первой модели и различной глубиной выгорания топлива. Однако практическая реализация этой модели сомнительна, поскольку вытеснители располагаются в местах размещения различных конструктивных приспособлений, таких как дистанционирующая решетка, навивка твэлов и др.

Исходя из описанных выше результатов, был рассмотрен комбинированный метод компенсации реактивности — помимо стержней для моделирования такой кампании в теплоноситель добавлялась борная кислота. Ее концентрация менялась со временем таким образом, чтобы $K_{бесск}$ находился на уровне 1.000, что служит сигналом о необходимом уменьшении размера вытеснителя (модель 1) или уменьшении их количества (модель 2) для поддержания реактора на критическом уровне. Полученные зависимости изменения концентрации борной кислоты показаны на рис. 6, *a*, *б*.

Анализируя данные зависимости, можно увидеть скачкообразность изменений концентрации H_3BO_3 , что связано с изменением изотопного состава сборки в моменты извлечения вытеснителей. Требуемое количество борной кислоты на начало кампании оказыва-

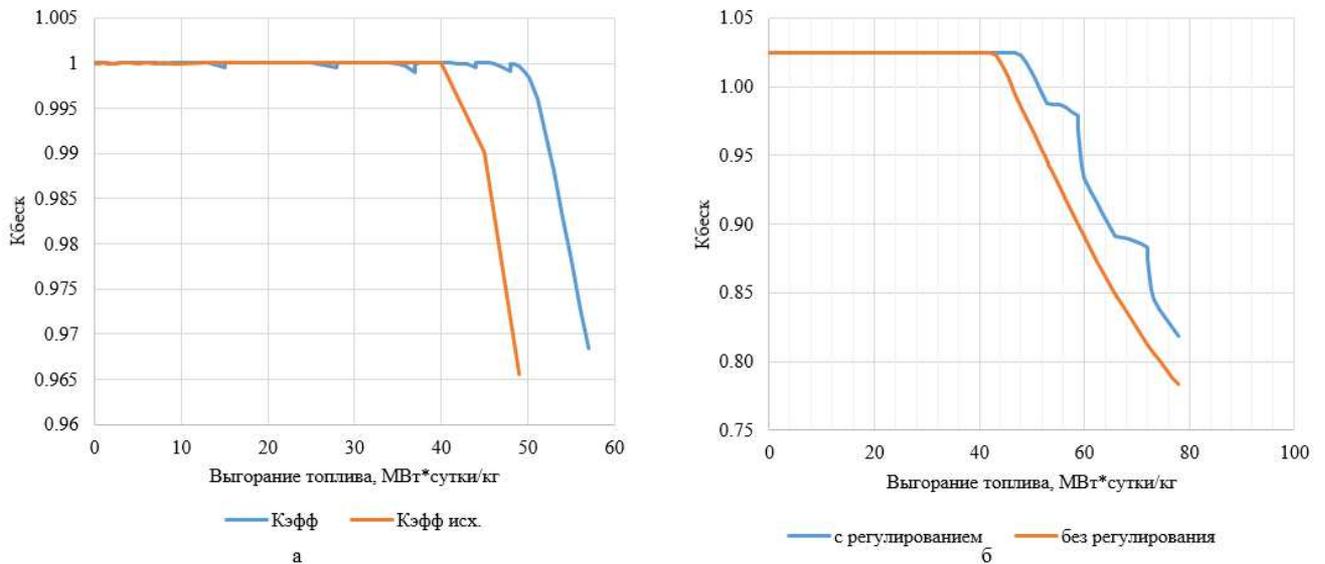


Рис. 5. Зависимость Кбеск от выгорания топлива, а — модель 1, б — модель 2

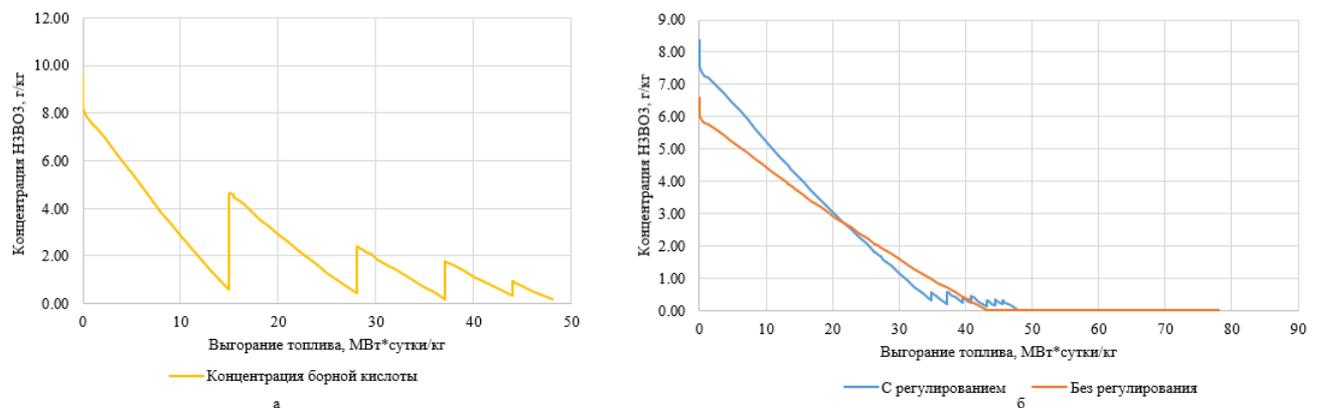


Рис. 6. Изменение концентрации борной кислоты при выгорании топлива, а — модель 1, б — модель 2

ется разным для данных моделей. Чем больший объем воды вытесняется, тем большая концентрация бора необходима при использовании сразу двух систем компенсации избыточной реактивности ввиду снижения эффективности бора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование стержней вытеснителей позволяет продлить топливную кампанию. Модель, технически наиболее приближенная к реальности, имеет меньший эффект продления. Это можно связать с меньшим объемом вытеснения воды, а следовательно, и более мягким спектром нейтронов на начало

топливной кампании.

Полная замена борной кислоты оказалась невозможна для заданного обогащения, поскольку показанное размещение вытеснителей радиусом 2.5 мм в межтвэльном пространстве (максимальный объем вытеснения среди рассмотренных версий) дало значения коэффициента размножения выше 1.

Комбинированный метод с использованием стержней-вытеснителей и концентрации борной кислоты в теплоносителе показал необходимость увеличения необходимой концентрации борной кислоты на начало кампании. Данный аспект требует дополнительного анализа на эффекты реактивности, в частности, исследование плотностного эффекта.

[1] Велихов Е.П., Гольцев А.О., Давиденко В.Д. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия термоядерный

синтез. вып. 44, № 1.5 (2021).

- [2] Electricity domestic consumption [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html> (дата обращения 01.09.2024).
- [3] Uranium 2011 – Resources, Production and Demand. Paris: OECD/NEA-IAEA, Report No 7059 (2012).
- [4] Нигматулин Б.И. // Научнотехнические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. вып. 25, № 04. 6 (2019).
- [5] Хашламун Т.М.Р.С. Оптимизация параметров удлиненных топливных загрузок для реакторов ВВЭР-1000(1200) с целью минимизации эксплуатационных затрат на АЭС: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.14.03 / НИЯУ МИФИ. Москва, 2018. 23 с.
- [6] Семченков Ю.М., Мохов В.А. Алексеев П.Н. ВВЭР со спектральным регулированием — путь к эффективному использованию урана-238 // МНТК2014, Москва, Концерн «Росэнергоатом», 2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.reamntk.ru/mediafiles/u/files/2014/Plenar/Semchenkov_YU.M..pdf (дата обращения 01.06.2024).
- [7] Патент № 2320850, Российская Федерация, МПК E21B 34/06, E21B 43/14. Интеллектуальная внутрискважинная клапанная система для управления извлечением флюидов из нескольких интервалов скважины и способ управления таким извлечением флюидов : № RU2004136159/03A : заявл. 03.05.2003 : опубл. 27.03.2008 / К.Р. Джонс, Г.К. Оулин, С.Дж. Уолтерс, Дж. Константин, Д.А. Билберри. 8 с.
- [8] Mars D., Gans D.J. Spectral shift control reactor design and economic study. United States, 1961. AEC R&D Report. BAW, 1241.
- [9] Galperin A., Ronen Y. // Nucl. Technol. Taylor & Francis. **62**, N 2. 238 (1983).
- [10] Chibinyayev A.V., Alekseev P.N., Teplov P.S. // Atomic Energy. № 101. 680 (2006).
- [11] Пустовалов С.Б. ВВЭР-СКД — будущее легководных энергетических реакторов // Научно-техническая молодёжная конференция «Будущее — атомная энергетика». 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nsrus.ru/files/ppt/20230517/5.Pustovalov.pdf> (дата обращения 01.06.2024).
- [12] Ионайтис Р.Р. // Атомная энергия. **60**, Вып. 5. 364 (1986).
- [13] Увакин М.А. Математическое моделирование выгорания ядерного топлива в реакторах с регулируемым спектром нейтронов: автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Моск. гос. инженерно-физ. ин-т. Москва, 2006. 26 с.
- [14] ВВЭР: горизонты близкие и далекие [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://atomicexpert.com/vver_horizons_near_and_far (дата обращения 27.05.2024).
- [15] Leppanen J. «Serpent — a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code».
- [16] Элазака А.И. Методики спектрального регулирования в реакторах с водой под давлением: дис. канд. тех. наук: 14.05.06. М., 2022. 180 с.

Comparison of various spectral control schemes using displacers

A.A. Voronsova^a, R.A. Vnukov^b

IATE MEPHI. Russia, 249039, Obninsk

E-mail: ^aparadisecitymake@gmail.com, ^blevz555@mail.ru

In this paper, one of the possible approaches to compensate for excessive reactivity at the beginning of the campaign is considered — spectral regulation. Its implementation is based on the use of displacement rods that change the water-fuel ratio during the fuel campaign. To assess the effect on the neutron-physical characteristics that arise in the assembly when displacers are introduced into its design, various models are proposed that differ in the placement of rods in the fuel assembly. The comparison takes place with the original version of the fuel assembly, which has a similar geometry to the VVER-1200 fuel assembly. Based on a single scheme for regulating the water-fuel ratio, the contribution to the extension of the fuel campaign for models with displacers is estimated. The comparison is carried out with the initial fuel assemblies, where the fuel campaign is 49 MW-day/kg for model 1 and 78 MW-day/kg for model 2. The results showed the fundamental possibility of extending the fuel campaign due to the phased extraction of displacer rods, which tighten the spectrum. In a model with displacers in the intertwined space, the campaign extension was 8 MW-day/kg, which is equivalent to 16%; in the model where the displacers are placed in the guide channels, the extension was 6 MW-day/kg, which is equivalent to 5%. Complete replacement of boric acid in the versions under consideration turned out to be impossible, while the required concentration of H₃BO₃ in the coolant to compensate for excessive reactivity at the beginning of the campaign increased due to a decrease in boron efficiency with a more rigid neutron spectrum in the models.

PACS: 31.15.-p.

Keywords: spectral regulation, fuel assemblies, boric acid, fuel campaign, light-water reactor.

Received 10 June 2024.

Сведения об авторах

1. Воронцова Александра Александровна — студентка; email: paradisecitymake@gmail.com.

2. Внуков Руслан Адхамович — аспирант; email: levz555@mail.ru.