

УДК 621.039.51:004.4

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ТИПА ВБЭР ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ ПЛАВУЧЕГО БАЗИРОВАНИЯ

¹Власичев Г.Н., ¹Куликов Е.И., ²Сухарев Ю.П.

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, e-mail: vlas@mts-nn.ru;

²АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова», Нижний Новгород, e-mail: sukharev@okbm.nnov.ru

Проведено расчетное обоснование оптимальных нейтронно-физических характеристик перспективно-ядерного реактора малой мощности типа ВБЭР. Обоснована актуальность данного типа реактора. Указаны энергетические задачи, которые он способен решить. Расчеты реактора проводились по программе WIMS-D4. В результате расчетного анализа определены оптимальная загрузка топлива, обогащение, длительность кампании реактора, оптимальная концентрация выгорающего поглотителя. Загрузка урана на твэл определена на уровне 1,06 кг при обогащении по U^{235} – 7,5%. Данный вариант загрузки обеспечивает кампанию реактора около 4340 сут (12 лет), оптимальное среднее выгорание топлива 67,3 МВт·сут/кг, удельный расход U^{235} – 1,114 г/МВт·сут. Проведен анализ выгорающих поглотителей, используемых для компенсации избыточной реактивности в начале кампании. Расчеты выгорания выполнены с временным шагом 10 эффективных суток. В результате анализа выбраны твэги с массовой долей оксида гадолиния (Gd_2O_3), равной 7%, которые в количестве 6 твэгов на каждую ТВС компенсируют избыточную реактивность на величину 0,025. При добавлении в теплоноситель борной кислоты (H_3BO_3) в концентрации 5 г/кг избыточная реактивность в начале кампании будет скомпенсирована на 0,315.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, тепловыделяющий элемент, кампания реактора, глубина выгорания, выгорающий поглотитель, оксид гадолиния, борная кислота

NEUTRON-PHYSICAL CHARACTERISTICS OPTIMIZATION OF TYPE WBER REACTOR FACILITY FOR FLOATING BASING POWER BLOCK

¹Vlasichev G.N., ¹Kulikov E.I., ²Sukharev Yu.P.

¹Federal State Educational Institution of Higher Education «Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev», Nizhny Novgorod, e-mail: vlas@mts-nn.ru;

²Joint Stock Company «Africantov OKB Mechanical Engineering», Nizhny Novgorod, e-mail: sukharev@okbm.nnov.ru

The optimal neutron-physical characteristics calculated validation of low-power type WBER advanced nuclear reactor is carried out. The relevance of this type reactor is justified. Energy tasks which it is able to solve are provided. Calculations of the reactor were held under WIMS-D4. In the result of calculating analysis the optimal loading of fuel, the enrichment, the duration of reactor campaign, the optimal concentration of the burnable absorber are defined. Uranium download in the fuel rod at the level of 1.06 kg for the enrichment of U^{235} – 7,5% are defined. This download option provides the reactor campaign about 4340 days (12 years), the optimal average fuel burnup 67,3 MW·day/kg, the specific consumption of U^{235} – 1,114 g/MW·day. The burnable absorbers analysis which are used to compensate the reactivity excess at the beginning of the campaign are held. Burnout calculations with time-step 10 effective days are performed. In the result of analysis the fuel elements with gadolinium with a mass fraction of gadolinium oxide (Gd_2O_3), is equal to 7% of that in number 6 fuel elements with gadolinium for each fuel assembly to compensate for excess reactivity by the amount 0,025 are selected. When added to coolant of boric acid (H_3BO_3) in concentration of 5 g/kg reactivity excess in the beginning of the campaign will be compensated 0,315.

Keywords: nuclear reactor, fuel Assembly, fuel element, the campaign of the reactor, burn-up, burnable absorber, gadolinium oxide, boric acid

На фоне обостряющихся проблем, связанных с применением традиционных способов энергопроизводства (рост цен на углеродное топливо, ухудшение экологии городов, обострение проблемы обеспечения пресной водой) [4], является очевидной необходимостью широкого использования атомной энергии.

На основе опыта строительства судовых реакторных установок для гражданского и военно-морского флота разработаны проекты для атомных станций малой и средней

мощности, которые способны решить энергетические задачи, связанные с активным освоением территорий с децентрализованным энергоснабжением, расширением добычи редких металлов [4], подъемом добычи газа, угля, развитием перерабатывающей промышленности. Принятые технологические решения позволяют рекомендовать установки данного типа в качестве энергоисточников атомных опреснительных комплексов, создаваемых на основе нефтяных платформ.

Расчет ядерной энергетической установки на стадии эскизного проектирования должен обеспечить возможность обоснованного окончательного выбора основных конструктивных характеристик активной зоны реактора и условий ее эксплуатации, к которым относятся:

- геометрия активной зоны, тип топливной решетки, конструкция тепловыделяющих элементов (ТВЭлов), конструкция и число тепловыделяющих сборок (ТВС);

- номенклатура начального обогащения (изотопный состав) топлива ТВС первой загрузки и подпитки, режим перегрузок топлива;

- принципы компенсации реактивности реактора, конструкция и число органов регулирования, тип и размещение выгорающих поглотителей в ТВС [3].

Цель исследования

Цель работы заключается в определении оптимальных нейтронно-физических характеристик реакторной установки типа ВБЭР тепловой мощностью 280 МВт.

Для реактора данного типа выбрана бесчехловая ТВС (типа ТВСА), хорошо зарекомендовавшая себя на АЭС с водо-водяными реакторами в России и за рубежом [4]. В каждой ТВС содержится 306 ТВЭлов укороченного типа, где высота топливного столба составляет 2500 мм, 6 ТВЭгов (смесь топлива с меньшим обогащением и выгорающим поглотителем), 12 направляющих каналов для СУЗ (стержни системы аварийной защиты). Активная зона сформирована из 55 ТВС.

Материалы и методы исследования

Для расчетного обоснования оптимальных нейтронно-физических характеристик реактора использовалась программа WIMS-D4 [6]. Программа применялась для определения оптимальной загрузки и обогащения топлива, кампании реактора, исходя из полученных значений коэффициента размножения. Расчеты спектра нейтронов проводились в двух групповом приближении. Расчет выгорания выполнялся с временным шагом 10 эффективных суток. Расчеты нейтронно-физических характеристик реактора проводились при постоянной средней температуре в активной зоне.

Результаты исследования и их обсуждение

В данной работе приводятся результаты расчетного анализа с целью оптимизации топливной загрузки, обогащения, загрузки выгорающего поглотителя реактора.

Удлинение кампании реактора возможно путем повышения обогащения топлива по U^{235} , что приводит к избыточной реактивности в начале кампании [1]. На рис. 1

приведена зависимость времени облучения от топливной загрузки на ТВЭл и обогащения по U^{235} .

Для обеспечения кампании реактора около 4340 сут (~ 12 лет) выбрана загрузка урана на ТВЭл на уровне 1,06 кг при обогащении по U^{235} – 7,5% (рис. 1). Данный вариант загрузки урана обеспечивает оптимальное среднее по реактору выгорание топлива 67,3 МВт·сут/кг, а также удельный расход U^{235} – 1,114 г/МВт·сут. Выбор обогащения по U^{235} – 8,5% приводит к увеличению средней по реактору глубины выгорания топлива до 74,7 МВт·сут/кг, превышающей допустимое значение – 68 МВт·сут/кг. Превышение глубины выгорания топлива ведет к ухудшению стойкости материалов оболочек ТВЭлов [5].

Выбор загрузки урана на ТВЭл больше уровня 1,06 кг приводит к увеличению размеров ядерного реактора, что неразумно при плавучем базировании, где играет важную роль компактность установки.

Для компенсации избыточной реактивности и снижения нагрузки на управляющие стержни используется борное регулирование. В начальный период работы реактора концентрация в первом контуре борной кислоты (H_3BO_3), в которой бор содержит изотопы B^{10} , сильно поглощающие нейтроны, максимальна. По мере выгорания топлива концентрация кислоты снижается.

При использовании в теплоносителе первого контура борной кислоты большой концентрации повышается коррозия материалов активной зоны, а также увеличивается объем вводимых с борной кислотой химических примесей, способных активизироваться в активной зоне реактора и, как следствие, повысить радиационные риски в зоне его обслуживания [1]. Для того чтобы избежать чрезмерного использования борного регулирования, применяют выгорающие поглотители в составе ТВС реакторов.

В качестве поглотителей нейтронов в ядерных реакторах широко используются гадолиний, эрбий, кадмий, бор и, в меньшей степени, самарий и европий [2]. При выборе поглотителей должны учитываться одновременно наиболее важные параметры, характеризующие и работу реактора, и свойство самого поглотителя. К характерным параметрам реактора следует отнести длительность цикла, уровень выгорания топлива и т.п.

Гадолиний отличается аномально высокое поглощение тепловых нейтронов. Сечение поглощения тепловых нейтронов природным гадолинием достигает величины 46 000 барн, а у изотопа Gd^{157} сечение захвата – 255000 барн (табл. 1) [2].

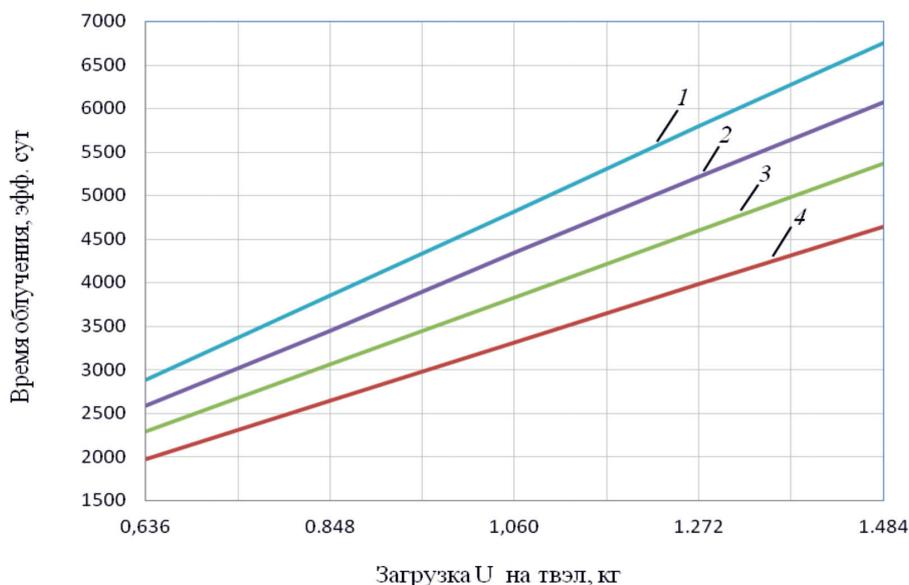


Рис. 1. Зависимость времени облучения от топливной загрузки на твэл при значениях обогащения по U^{235} : 8,5% (1), 7,5% (2), 6,5% (3) и 5,5% (4)

Таблица 1

Свойства стабильных изотопов гадолиния

Изотоп	Содержание в природном Gd (%)	Сечение поглощения тепловых нейтронов (барн)
152	0,20	10,0
154	2,18	80,0
155	14,80	61000,0
156	20,47	2,0
157	15,65	255000,0
158	24,84	2,4
160	21,86	0,8

Гадолинию свойственно не только высокое сечение поглощения нейтронов, но и хорошая совместимость с другими компонентами, в том числе и с оксидом урана [2].

В условиях опытно-промышленного производства изготавливаются топливные таблетки из диоксида урана с массовой долей природного оксида гадолиния (Gd_2O_3) от 0,05 до 7,0%. Таблетки производятся на промышленном оборудовании отечественного производства и из отечественных материалов [2].

Для обеспечения компенсации избыточного запаса реактивности при выбранных параметрах топливной загрузки и обогащения проведен выбор загрузки выгорающего поглотителя и концентрации борной кислоты. В качестве выгорающего поглотителя используется природный Gd_2O_3 (оксид гадолиния), распределенный равномерно по объему топливных таблеток в части твэгов.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента размножения ячейки, содержащей

одну ТВС с окружающей долей замедлителя, от времени ее облучения в реакторе при разных массовых долях природного оксида гадолиния, в том числе нулевой. Ячейка без выгорающего поглотителя (кривая 1) дает слишком высокие значения коэффициента размножения в начале кампании, что требует высокой эффективности средств компенсации реактивности.

Для выбора оптимальной концентрации оксида гадолиния в 6 твэгах, снижающей избыточную реактивность, выполнена серия расчетов (кривые 2, 3, 4 на рис. 2). В результате выбраны твэги с массовой долей Gd_2O_3 , равной 7%, которые компенсируют запас избыточной реактивности на 0,025 (табл. 2). В ТВС расположено 6 твэгов с обогащением топлива UO_2 по U^{235} , равным 7% и с массовой долей Gd_2O_3 – 7%. Твэг с массовой долей Gd_2O_3 более 7% не следует применять вследствие ухудшения химических, механических и термодинамических свойств.

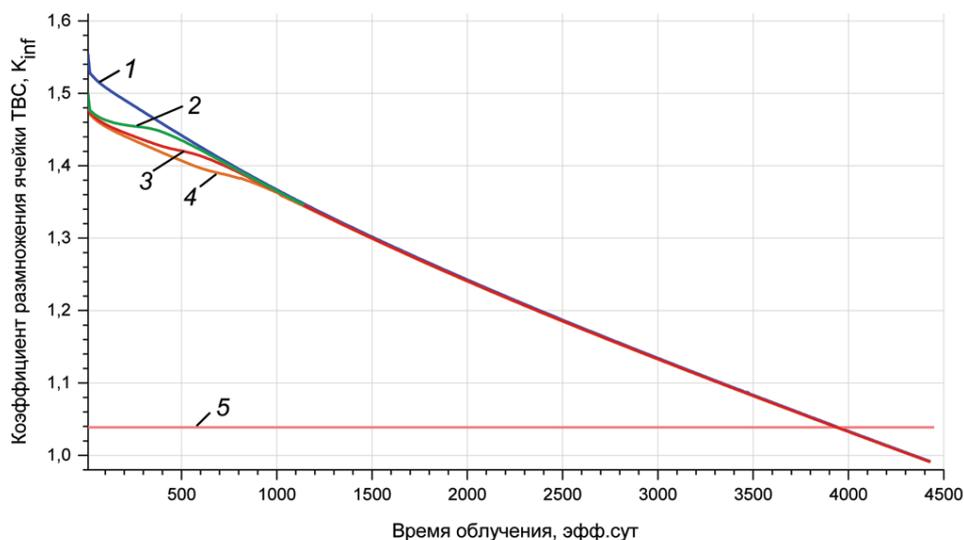


Рис. 2. Зависимости коэффициента размножения от времени облучения для ячейки ТВС, не содержащей выгорающего поглотителя (1) и содержащей в 6 твэгах с концентрацией Gd_2O_3 : 3% (2), 5% (3) и 7% (4); 5 – K_2

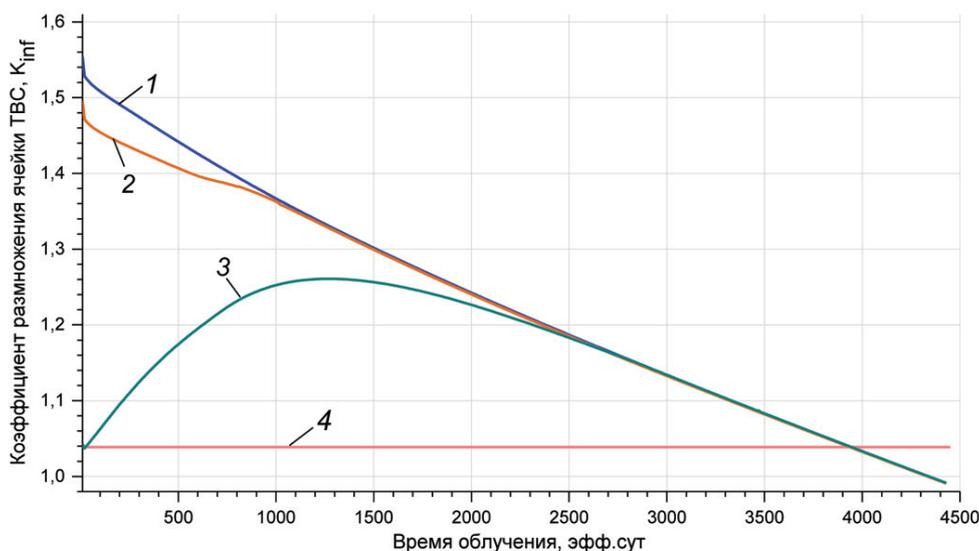


Рис. 3. Зависимости коэффициента размножения от времени облучения для ячейки ТВС, не содержащей выгорающего поглотителя (1), содержащей в 6 твэгах с концентрацией Gd_2O_3 7% без добавления (2) и с добавлением в концентрации 5г/кг (3) H_3BO_3 ; 4 – K_2

Таблица 2

Запас реактивности, компенсируемый твэгами с выгорающим поглотителем на основе природного Gd_2O_3

Массовая доля Gd_2O_3	Компенсируемый запас реактивности
3%	0,019
5%	0,024
7%	0,025

На рис. 3 показана зависимость коэффициента размножения ячейки от времени ее облучения в реакторе при выбранной массовой доле природного оксида гадолиния (7%) с добавлением борной кислоты в теплоноситель в концентрации 5 г/кг (кривая 3). Там же для сравнения нанесены зависимости для случая без добавления борной кислоты (кривая 2), а также и без кислоты и без оксида гадолиния (кривая 1).

Из рисунка видно, что добавление борной кислоты позволяет добиться более идеального изменения избыточной реактивности в процессе кампании реактора. При этом избыточная реактивность сильно уменьшается в начале кампании, почти приближаясь к величине K_{eff} (величине коэффициента размножения в бесконечной среде, при котором эффективный коэффициент размножения равен 1). При концентрации борной кислоты в теплоносителе, равной 5 г/кг, избыточная реактивность в начале кампании будет скомпенсирована на величину 0,315.

Заключение

В результате расчетного анализа выбраны оптимальные топливная загрузка, обогащение топлива и параметры средств компенсации избыточной реактивности реактора типа ВВЭР-100 с тепловой мощностью 280 МВт. Оптимальная загрузка топлива для обеспечения кампании ядерного реактора около 4340 сут (12 лет) была выбрана на уровне 1,06 кг при обогащении по U^{235} – 7,5%. Данный вариант загрузки урана обеспечивает оптимальное выгорание топлива (среднее по реактору) – 67,3 МВт·сут/кг, а также удельный расход U^{235} – 1,114 г/МВт сут. Для компенсации избыточной реактивности в реакторе 6 твэлов в каждой ТВС замещаются твэгами, а также используется борная кислота в теплоносителе. Массовая доля оксида гадолиния в твэгах, равная 7%,

компенсирует запас избыточной реактивности на 0,025. Твэги с массовой долей Gd_2O_3 более 7% не следует применять вследствие ухудшения химических, механических и термодинамических свойств. Добавление борной кислоты в теплоноситель в концентрации, равной 5 г/кг, позволяет уменьшить величину избыточной реактивности в начале кампании на 0,315.

Список литературы

1. Аль Давахра Сааду. Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР [Текст]; автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.14.03) / Аль Давахра Сааду; МИФИ. – М., 2006. – 143 с.
2. Андреев Б.М. Изотопы. Свойства, получение, применение [Текст] / Б.М. Андреев, Д.Г. Арефьев, В.Ю. Баранов [и др.]; научный ред. В.Ю. Баранова. – Т.2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 728 с.
3. ГОСТ Р 50088-92. Реакторы ядерные водо-водяные энергетические (ВВЭР). Общие требования к проведению физических расчетов [Текст]; введ. 1993-07-01. – Москва: Министерство атомной энергии РФ. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 5 с.
4. Инновационные реакторные установки разработки АО «ОКБМ Африкантов» для энергоблоков наземного и плавучего базирования // Региональная атомная энергетика // АО «ОКБМ Африкантов». [Электронный ресурс]. – URL: http://www.okbm.nnov.ru/images/pdf/vber-300_extended_ru_web.pdf (дата обращения: 15.10.2016).
5. Ядерное топливо для АЭС: современное состояние и перспективы // ОАО «ТВЭЛ». [Электронный ресурс]. – URL: <http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/Doklady/Molchanov.pdf> (дата обращения: 10.01.2017).
6. Askew J.R. A General Description of the Lattice Code WIMS / J.R. Askew [et al] // JBWES, Oct. 1966.