

УДК 621.039.51

Е.И. Куликов, Г.Н. Власичев

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ТИПА ВБЭР МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Цель: Определение оптимальных нейтронно-физических характеристик перспективного ядерного реактора малой мощности типа ВБЭР.

Результаты: В результате расчетного анализа определены оптимальная загрузка топлива, обогащение, длительность кампании реактора, оптимальная концентрация выгорающего поглотителя. Проведен анализ выгорающих поглотителей, используемых для компенсации избыточной реактивности в начале кампании. Проведено профилирование активной зоны реактора.

Применение: Возможность применения в качестве энергоисточника малой мощности для плавучих атомных станций и опреснительных установок.

Оригинальность: Сформирована активная зона ядерного реактора, проведено расчетное обоснование оптимальных нейтронно-физических характеристик перспективного ядерного реактора малой мощности типа ВБЭР.

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

Введение

На фоне обостряющихся проблем, связанных с применением традиционных способов энергопроизводства (рост цен на углеродное топливо, ухудшение экологии городов, обострение проблемы обеспечения пресной водой) [1], 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 [1], 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 тепловыделяющихборок (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 [2].

Цель работы заключается в определении оптимальных нейтронно-физических характеристик реакторной установки типа ВБЭР электрической мощностью 100 МВт.

Методика исследования

Для расчетного обоснования оптимальных нейтронно-физических характеристик реактора использовалась программа WIMS-D4 [3]. Программа применялась для определения оптимальной загрузки и обогащения топлива, кампании реактора, исходя из полученных значений коэффициента размножения. Расчеты спектра нейтронов проводились в 2-групповом приближении. Расчет выгорания выполнялся с временным шагом 10 эффективных суток. Расчеты нейтронно-физических характеристик реактора проводились при постоянной средней температуре в активной зоне. Для расчета трехмерной модели реакторной установки с использованием подготовленных макроконстант применена программа JAR. Данная программа позволяет определить: коэффициент размножения системы, аксиальное и радиальное энергораспределения в активной зоне реактора, выполнить зонное профилирование активной зоны реактора.

Результаты исследования

В данной работе приводятся результаты расчетного анализа с целью оптимизации топливной загрузки, обогащения, загрузки выгорающего поглотителя реактора, создания реакторной установки с максимально выровненным и стабильным полем энерговыделения в течении кампании.

Для реакторной установки типа ВБЭР электрической мощностью 100 МВт была выбрана бесчехловая ТВС (типа ТВСА), хорошо зарекомендовавшая себя на АЭС с водяными реакторами в России и за рубежом [1]. 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.

Оптимальная загрузка топлива для обеспечения кампании ядерного реактора около 3980 сут (10,9 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 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 в большой концентрации повышается коррозия материалов активной зоны, а также увеличивается объем вводимых с борной кислотой химических примесей, способных активироваться в активной зоне реактора и, как следствие, повысить радиационные риски в зоне его обслуживания [4]. 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 [5]. 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 высоким поглощением тепловых нейтронов. Сечение поглощения тепловых нейтронов природным гадолинием достигает величины 46000 барн, а у изотопа Gd^{157} сечение захвата – 255000 барн (табл. 1) [5].

Гадолинию свойственно не только высокое сечение поглощения нейтронов, но и хорошая совместимость с другими компонентами, в том числе и с оксидом урана [5].

В условиях опытно-промышленного производства изготавливаются топливные таб-

летки 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 [5].

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

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.

На рис. 1 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).

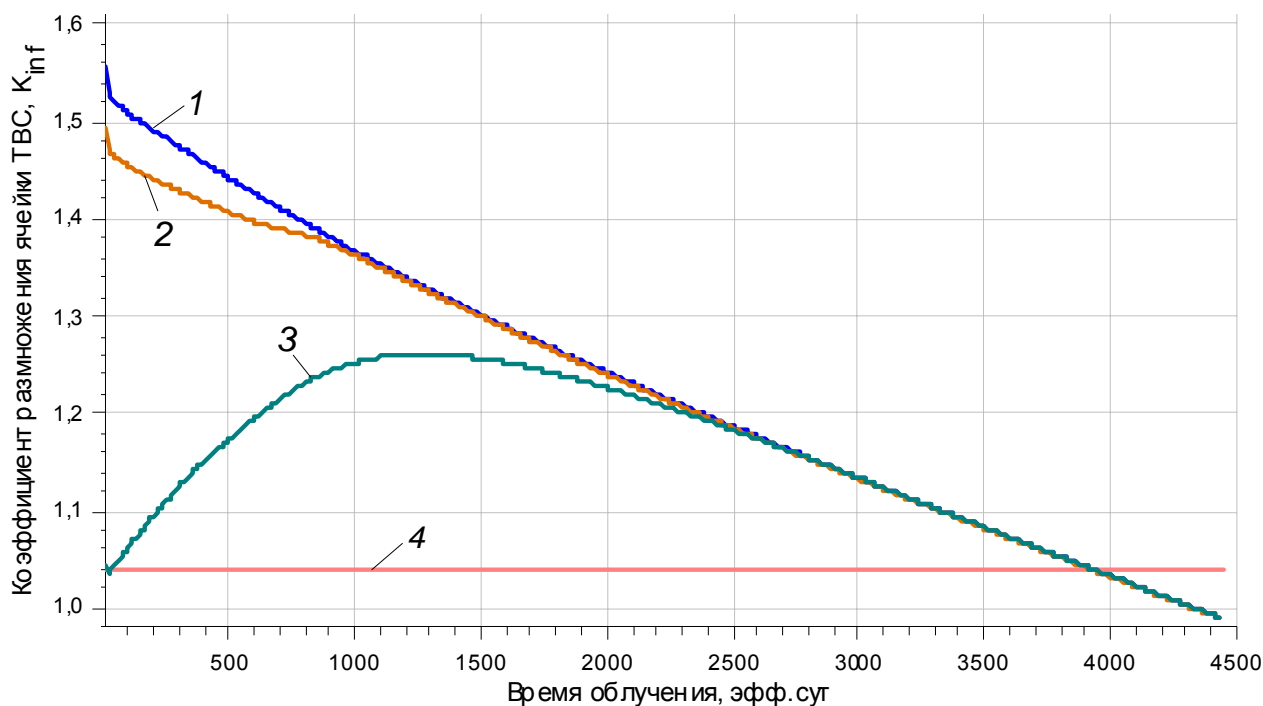


Рис. 1. Зависимости коэффициента размножения от времени облучения для ячейки ТВС, не содержащей выгорающего поглотителя (1), содержащей в 6 твэгах с концентрацией Gd_2O_3 7% без добавления (2) и с добавлением H_3BO_3 в концентрации 5 г/кг (3); 4 – K_T

Из рисунка видно, что добавление борной кислоты позволяет добиться более идеаль-

ного изменения избыточной реактивности в процессе кампании реактора. При этом избыточная реактивность сильно уменьшается в начале кампании, почти приближаясь к величине K_T (величине коэффициента размножения в бесконечной среде, при котором эффективный коэффициент размножения равен 1). При концентрации борной кислоты в теплоносителе, равной 5г/кг, избыточная реактивность в начале кампании будет скомпенсирована на величину 0,315. Значение коэффициента размножения системы на начало кампании равно 1,009. Максимальный запас реактивности $\Delta K/K=20,6\%$.

Активная зона и отражатели в расчетной модели сформированы в виде шестигранных призм, разделенных на аксиальные зоны. По высоте выделялось 17 расчетных точек. Расчет плотности потока в узлах шестигранной ячейки был произведен в одноточечном (один узел на шестигранник) приближении. Анализ проводился для состояния активной зоны на начало кампании.

Набор макроконстант для ячеек активной зоны и отражателей готовился на базе расчетов по программе WIMS-D4. Расчет реактора был проведен в секторе симметрии 30° .

На рис. 2, а показано аксиальное распределение энерговыделения по высоте активной зоны реактора с обогащением по $U^{235} - 7,5\%$ на начало кампании, усредненное по радиусу активной зоны, которое представлено в виде зависимости коэффициента неравномерности от высоты.

Из графика видно, что максимальный аксиальный коэффициент неравномерности ($K_{z, \max}$) находится в центре по высоте активной зоны, где имеет место максимальное выделение энергии. Максимальный аксиальный коэффициент неравномерности ($K_{z, \max}$) на высоте активной зоне 130 см равен 1,42.

На рис. 2, б показано радиальное энергораспределение для центрального ряда тепловыделяющих сборок в плоскости реактора с обогащением по $U^{235} - 7,5\%$ на начало кампании, усредненное по высоте активной зоны. Оно представлено в виде зависимости коэффициента неравномерности от радиальной координаты.

Из графика видно, что максимальный радиальный коэффициент неравномерности ($K_{r, \max}$) находится в центре по радиусу активной зоны, где имеет место максимальная плотность нейтронов и постепенно снижается к периферии.

Максимальный радиальный коэффициент неравномерности в центре активной зоны с обогащением по $U^{235} - 7,5\%$ равен 1,61.

Создание реакторной установки с максимально выровненным и стабильным полем энерговыделения в течении кампании – одна из важных задач расчетного обоснования активной зоны. Выравнивание и стабилизация поля тепловыделения улучшают физические и экономические характеристики ядерного реактора.

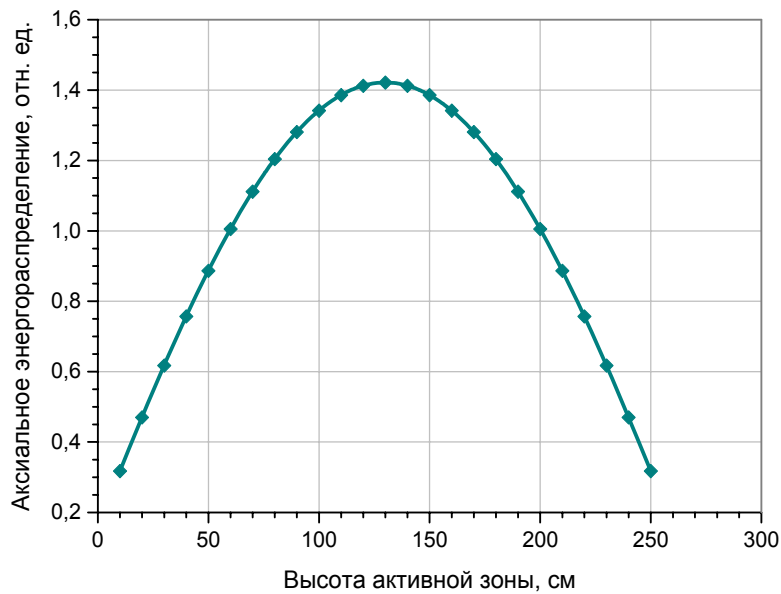
В центральной части активной зоны топливо выгорает интенсивнее, чем в периферийной части.

Одним из очевидных способов выравнивания удельного энерговыделения в твэлах по радиусу и высоте активной зоны является увеличение ядерной плотности (N) делящегося нуклида (нуклидов) пропорционально уменьшению плотности потока нейтронов. При этом, конечно, удельные тепловые нагрузки должны оставаться в допустимых пределах [6].

Однако практически выполнить такое профилирование нереально по технологическим и конструктивным причинам. Поэтому обычно используют *зонное* профилирование энерговыделения по радиусу активной зоны. В этом случае ядерная плотность делящегося нуклида изменяется скачком от зоны к зоне, оставаясь постоянной в пределах каждой зоны. В центральной зоне ядерная плотность U^{235} меньше, чем в периферийной. За счет этого удается увеличить мощность периферийных тепловыделяющихборок активной зоны [6].

Было проведено расчетное обоснование двух вариантов зонного профилирования активной зоны реакторной установки ВВЭР электрической мощностью 100 МВт.

а)



б)

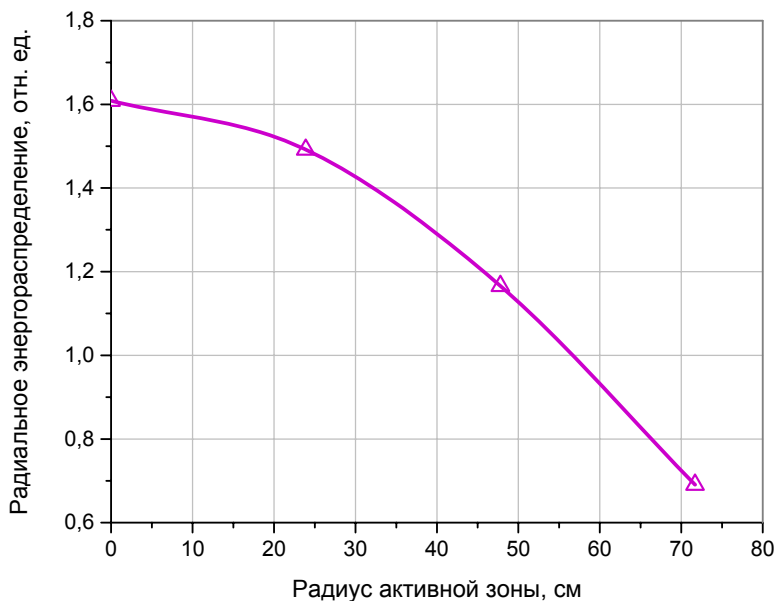


Рис. 2. Аксиальное (а) и радиальное (б) распределения энерговыведения

На рис. 3, а представлена картограмма активной зоны (окруженной радиальным отражателем) с двумя зонами обогащения по U^{235} : центральной и периферийной.

В центральной части активной зоны установлены ТВС с меньшим обогащением по U^{235} – 7%, в периферийной части установлены ТВС с большим обогащением по U^{235} – 8%. Среднее обогащение активной зоны U^{235} – 7,5%.

На рис. 3, б представлена картограмма активной зоны реакторной установки ВБЭР-100 с тремя зонами обогащения по U^{235} : центральной, промежуточной и периферийной.

В центральной части активной зоны установлены ТВС с обогащением по U^{235} – 7%, в промежуточной зоне установлены ТВС с обогащением по U^{235} – 7,5%, в периферийной зоне установлены ТВС с обогащением по U^{235} – 8%. Среднее обогащение активной зоны U^{235} – 7,6%.

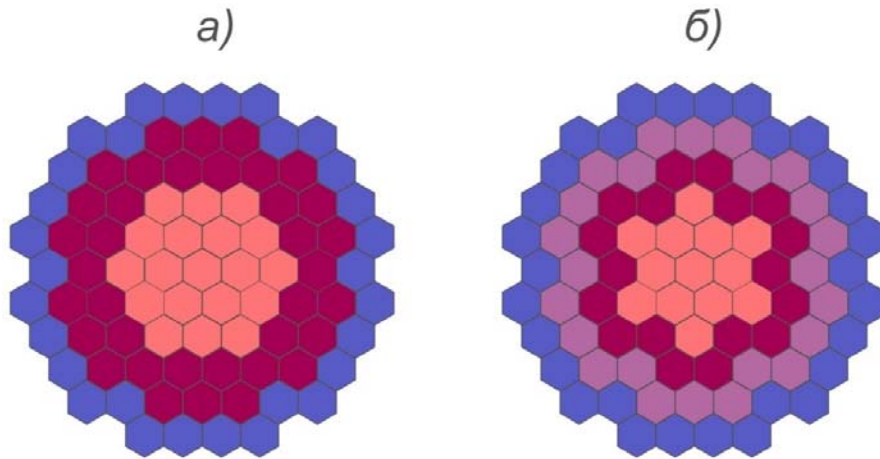


Рис. 3. Картограмма активной зоны с двумя (а) и тремя (б) зонами обогащения по U^{235}

На рис. 4 показано радиальное энергораспределение для центрального ряда тепловыделяющих сборок в плоскости реактора с одной (кривая 1) и двумя (кривая 2) зонами обогащения по U^{235} на начало кампании, усредненное по высоте активной зоны. Данное энергораспределение представлено в виде зависимости коэффициента неравномерности от радиальной координаты.

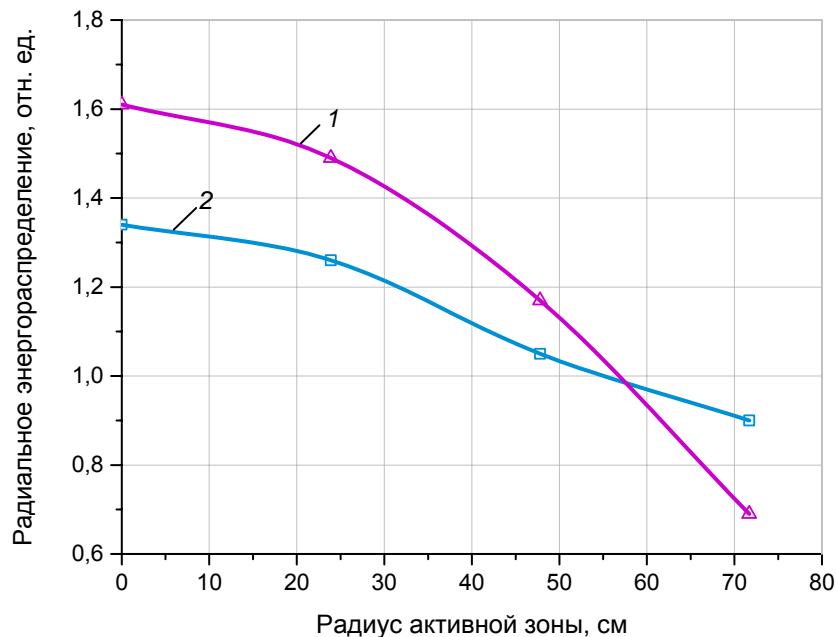


Рис. 4. Радиальное распределение энерговыделения с одной зоной обогащения по U^{235} (1) и с двумя зонами обогащения (2)

Из графиков видно, что значение максимального радиального коэффициента неравномерности в центре активной зоны с двумя зонами обогащения по U^{235} ($K_{r,max}=1,36$) за счет уменьшения обогащения по U^{235} ниже максимального радиального коэффициента неравномерности в центре активной зоны с одной зоной обогащения.

Ближе к периферии происходит выравнивание энерговыделения (кривая 2) за счет создания второй зоны большего обогащения по U^{235} – 8%, которая увеличивает мощность периферийных ТВС.

На рис. 5 показано радиальное энергораспределение для центрального ряда тепловыделяющих сборок в плоскости реактора с тремя (кривая 3) зонами обогащения по U^{235} на начало кампании, усредненное по высоте активной зоны. Энергораспределение представлено в

виде зависимости коэффициента неравномерности от радиальной координаты. Там же для сравнения нанесены зависимости для случая с одной зоной (кривая 1), а также с двумя зонами (кривая 2) обогащения по U^{235} .

Из рисунка видно, что в активной зоне с тремя участками обогащения по U^{235} (кривая 3) происходит максимальное выравнивание и стабилизация поля энерговыделения, чем в активной зоне с двумя участками обогащения (кривая 2) за счет создания промежуточного участка с обогащением по U^{235} в 7,5%.

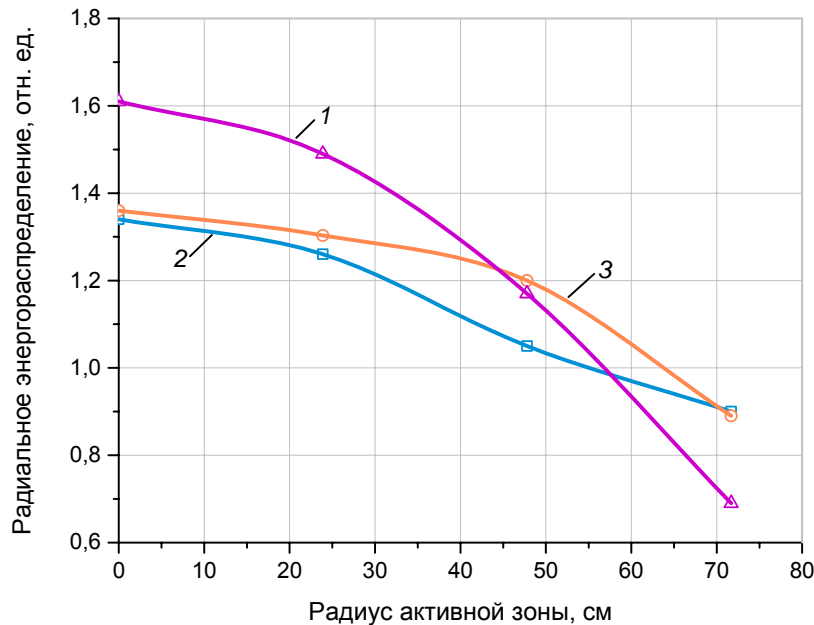


Рис. 5. Радиальное распределение энерговыделения с одной зоной (1), с двумя (2) и тремя зонами (3) обогащения по U^{235}

Картограммы активной зоны с двумя (а) и тремя (б) зонами обогащения по U^{235} со значениями радиального относительного энерговыделения в секторе симметрии 30° представлены на рис. 6.

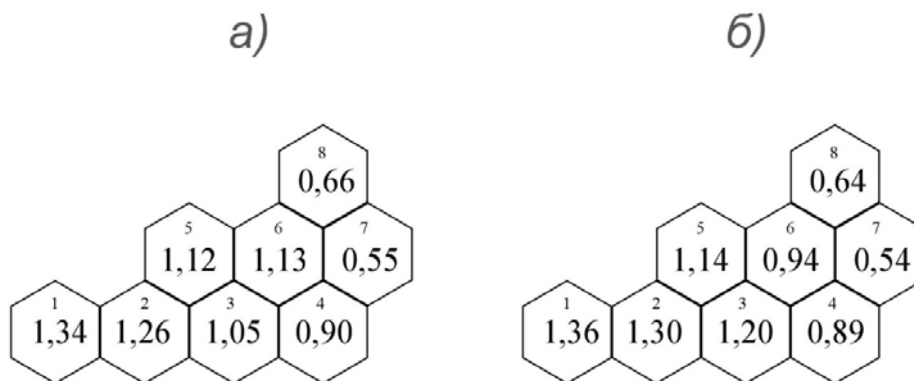


Рис. 6. Картограмма значений радиального распределения энерговыделения с двумя (а) и тремя (б) зонами обогащения по U^{235}

Выводы

В результате расчетного анализа выбраны оптимальные топливная загрузка, обогащение топлива и параметры средств компенсации избыточной реактивности реактора типа ВБЭР с тепловой мощностью 280 МВт. Оптимальная загрузка топлива для обеспечения кампании ядерного реактора около 3980 сут (10,9 лет) была выбрана на уровне 1,06 кг при обогащении по U^{235} – 7,5%. Данный вариант загрузки урана обеспечивает оптимальное выгора-

ние 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 5г/кг, позволяет уменьшить величину избыточной реактивности в начале кампании на 0,315. Значение коэффициента размножения системы на начало кампании равно 1,009, максимальный запас реактивности в процессе кампании – $\Delta K/K=20,6\%$. Произведено позонное профилирование активной зоны для выравнивания и стабилизации поля энерговыделения в течение кампании.

Библиографический список

1. 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).
2. ГОСТ Р 50088-92. Реакторы ядерные водо-водяные энергетические (ВВЭР). Общие требования к проведению физических расчетов. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 5 с.
3. Askew, J.R. A General Description of the Lattice Code WIMS / J.R. Askew [et al.] // JBWES, Oct. 1966.
4. 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.
5. Андреев, Б.М. Изотопы. Свойства, получение, применение / Б.М. Андреев [и др.]; под ред. В.Ю. Баранова.– Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – Т. 2. – 728 с.
6. Саркисов, А.А. Нейтронно-физические процессы в быстрых реакторах с тяжелыми жидкотеплоносителями / А. А. Саркисов, В. Н. Пучков; под ред. акад. РАН А.А. Саркисова. – М.: Наука, 2011. – 168 с.

Дата поступления
в редакцию 27.04.2017

E.I. Kulikov, G.N. Vlasichev

CALCULATED OPTIMAL NEUTRON-PHYSICAL CHARACTERISTICS RATIONALE OF LOW POWER TYPE VBER REACTOR FACILITY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

Purpose: The determination of optimal neutron-physical characteristics of low-power type VBER advanced nuclear reactor.

Findings: In the result of calculating analysis the optimal loading of fuel, the enrichment, the duration of reactor campaign, the optimal burnable absorber concentration are defined. The burnable absorbers analysis which are used to compensate the reactivity excess at the beginning of the campaign are held. Profiling of the reactor core is carried out.

Research implications: The possibility of applying as small power source for floating nuclear power plants and desalination facilities.

Originality: The active zone of the nuclear reactor is formed, the optimal neutron-physical characteristics calculated validation of low-power type VBER advanced nuclear reactor is carried out.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, fuel element, the campaign of the reactor, burn-up, burnable absorber, gadolinium oxide, boric acid.