

ВЫРАВНИВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ВОДО-ВОДЯНОМ ТЕРМОЭМИССИОННОМ РЕАКТОРЕ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

П.А. Алексеев, А.Д. Кротов, М.К. Овчаренко, В.А. Линник

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»

249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Р

Исследуется возможность уменьшения радиального коэффициента неравномерности k , энерговыделения в активной зоне водо-водяного термоэмиссионного реактора-преобразователя (ТРП). Из-за высокой неравномерности энерговыделения снижается вырабатываемая электрическая мощность ТРП и увеличивается температура элементов электрогенерирующего канала, что сказывается на продолжительности ресурса реактора.

В ТРП с промежуточным спектром нейтронов электрогенерирующие элементы (ЭГК) в активной зоне располагают по концентрическим поясам, что обеспечивает неравномерный шаг расстановки и позволяет уменьшить k . В рассматриваемом водо-водяном ТРП значительно большее количество ЭГК располагают по шестигранной равномерной решетке. Выравнивать энерговыделение в активной зоне с равномерным шагом решетки можно, например, используя ядерное профилирование или применяя дополнительные конструкции в активной зоне. Первое приводит к необходимости учета и создания различных типов ЭГК, второе может привести к ухудшению нейтронно-физических характеристик реактора; все это скажется на экономической эффективности проекта.

Предлагается разбить активную зону на части, каждая из которых имеет свой равномерный шаг, при этом шаг решетки увеличивается от центра к периферии, что приводит к снижению радиального коэффициента неравномерности энерговыделения до значений 1,06. Количество частей, на которые разбивается активная зона, зависит от шага решетки, от типа, размера ЭГК, толщины отражателя, ограничений, накладываемых на конструкцию реактора. Оптимальные для каждой части шаги решетки можно определить, применяя методику, основанную на технологии генетического алгоритма, которая позволяет находить решения, удовлетворяющие нескольким поставленным условиям.

При данном подходе не требуется значительного увеличения габаритов реактора, учета и создания различных типов ЭГК, дополнительных конструкций в центре активной зоны.

Ключевые слова: термоэмиссионный реактор-преобразователь, электрогенерирующий канал, коэффициент неравномерности энерговыделения, шаг решетки, генетический алгоритм, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Использование для ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) термоэмиссионных реакторов-преобразователей (ТРП) позволяет создать экономически эффективный компактный автономный источник электроэнергии и тепла.

© П.А. Алексеев, А.Д. Кротов, М.К. Овчаренко, В.А. Линник, 2017

Вместо обычно применяемых в ТРП с промежуточным спектром нейтронов гидрида циркония в качестве замедлителя и натрий-калиевой эвтектики [1] в качестве теплоносителя в водо-водяных ТРП бассейнового типа используется вода [2], что положительно сказывается на его безопасности. Увеличение же выходной электрической мощности возможно при увеличении КПД электрогенерирующих каналов (ЭГК) и их количества. И все-таки основным преимуществом ТРП остается его компактность, вследствие чего такой реактор может быть собран на заводе и доставлен к месту использования без сложных транспортных операций [3].

В работах [3, 4] описывается водо-водяной реактор-преобразователь малой АЭС АИСТ-МП, способной служить экономичным автономным источником теплоэнергоснабжения. При предполагаемом КПД ЭГК 20 – 25% мощность 2 МВт_{эл} обеспечивается 2142 ЭГК.

Кооперацией предприятий АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», НИИ НПО «Луч», ОКБМ «Африкантов» был представлен инновационный проект АЭС малой мощности на основе термоэмиссионной ядерной установки для энергообеспечения удаленных объектов в Арктике (рис. 1). Мощность установки в 10/100 кВт_{эл} обеспечивается 106 и 331 ЭГК, успешно верифицированными в ТРП ЯЭУ «Енисей» [5].



Рис.1. Концептуальная схема АЭС на основе термоэмиссионной ЯЭУ

Такое большое количество ЭГК в активной зоне (АЗ) располагают по шестигранной равномерной решетке в отличие от расстановки по концентрическим поясам, как в классическом ТРП с промежуточным спектром нейтронов. Это сказывается на габаритах реактора и способствует обеспечению естественной циркуляции теплоносителя в АЗ, а значит, и экономической эффективности ЯЭУ.

Для сравнения, в ТРП ЯЭУ «ТОПАЗ» и «Енисей» находились 79 и 37 ЭГК соответственно. Отвод тепла обеспечивался принудительной циркуляцией теплоносителя в кольцевом канале каждого ЭГК [1, 6]. АЗ набиралась из ЭГК, располагающихся по концентрическим поясам, что обеспечивало неравномерный шаг расстановки (рис. 2). Такое расположение позволяло за счет небольшого увеличения объемной доли замедлителя от центра АЗ к периферии значительно уменьшить радиальный коэффициент неравномерности энерговыделения k_r . В ТРП «ТОПАЗ» достигнуто значение k_r , равное 1,05, что свою

очередь положительно сказывается на работоспособности ЭГК, температурных режимах эмиттера и коллектора, электрической мощности реактора [7, 8].

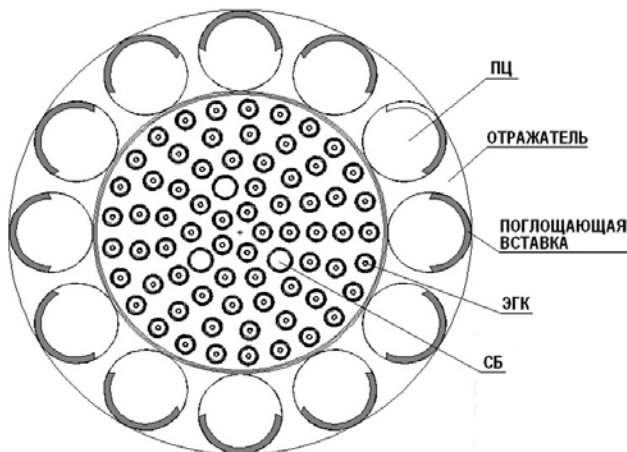


Рис. 2. Поперечное сечение реактора-преобразователя типа «ТОПАЗ» [6]

Для большого количества ЭГК, расположенных по концентрическим поясам, выравнивание энерговыделения за счет неравномерного шага приводит к увеличению диаметра АЗ.

С другой стороны, при расположении ЭГК в решетке с равномерным шагом при прочих равных условиях повлиять на распределение энерговыделения не представляется возможным.

На рисунке 3 показана зависимость электрической мощности реактора и температуры эмиттера от k_r для ТРП типа «ТОПАЗ» [9, 10]. Видно, что с ростом неравномерности энерговыделения вырабатываемая электрическая мощность падает, а температура растет.

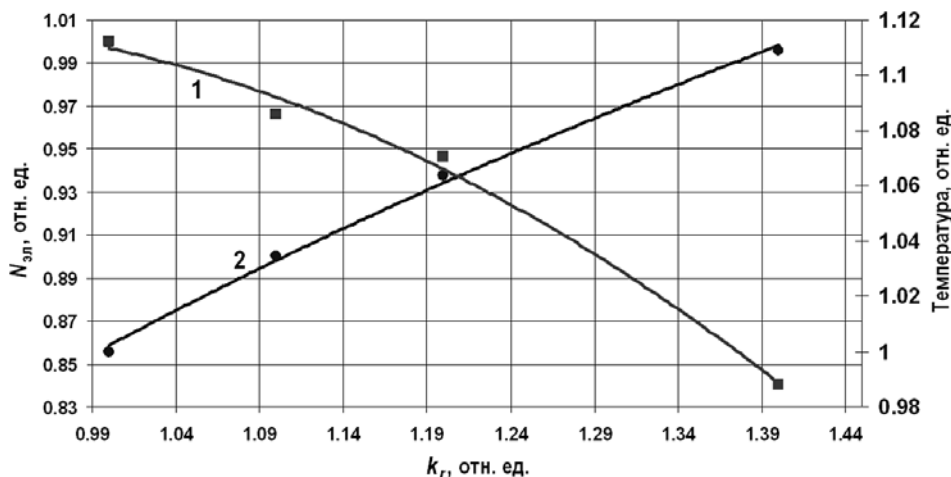


Рис. 3. Зависимость электрической мощности ТРП (1) и температуры эмиттера (2) от радиального коэффициента неравномерности энерговыделения

Из рисунка следует, что для стабильной и продолжительной работы ТРП, в котором ЭГК располагаются в решетке с равномерным шагом, необходимо уменьшать k_r .

Выравнивать энерговыделения в АЗ с равномерным шагом решетки можно, например, используя ядерное профилирование или применяя дополнительные конструкции в активной зоне. Первое приводит к необходимости учета и создания различных типов ЭГК, второе может привести к ухудшению нейтронно-физических характеристик реак-

тора; все это скажется на экономической эффективности проекта [11, 12].

В работе исследуется возможность уменьшения радиального коэффициента неравномерности энерговыделения в АЗ с равномерным шагом решетки. Предлагается разбивать АЗ на части, каждая из которых имеет свой равномерный шаг, увеличивающийся от центра к периферии.

МЕТОД СНИЖЕНИЯ κ_{eff}

АЗ водо-водяного ТРП ЯЭУ набирается из ЭГК, расположенных по равномерной шестигранной решетке. В АЗ также распложены органы регулирования реактивности (ОР), стержни безопасности (СБ) и вытеснители. АЗ окружена отражателем из бериллия (рис. 4).

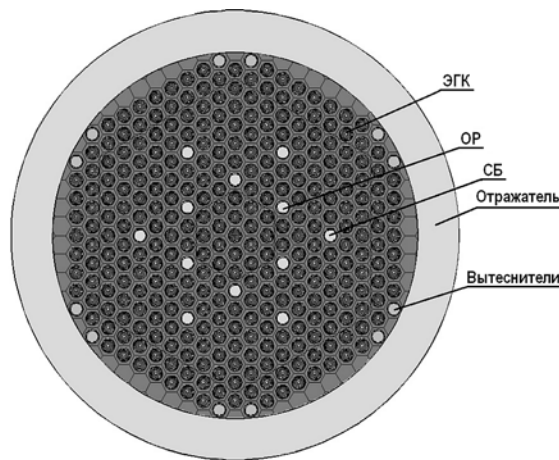


Рис. 4. Активная зона ТРП с водяным замедлителем и теплоносителем

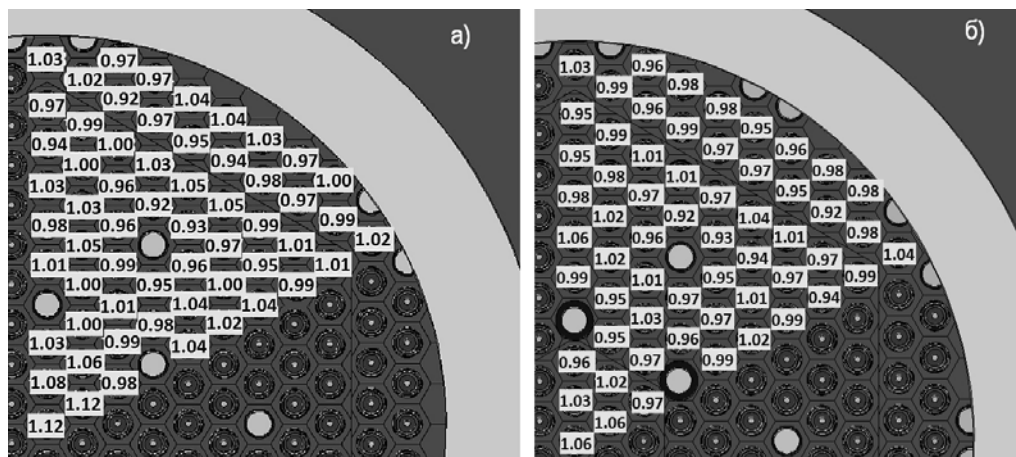


Рис. 5. Потвзльное распределение энерговыделения при разбиении активной зоны на две (а) и три (б) части

При моделировании и расчете АЗ применялись программа MNCР [13] и библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-6 [14] с учетом термализации нейтронов [15].

В данной модели находится 301 ЭГК, диаметр АЗ такой, что ОР поворотного типа – поворотные цилиндры (ПЦ) (см. рис. 2), располагающиеся в боковом отражателе, неэффективны, поэтому управление реактором осуществляется стержнями, содержащими поглощающий нейтроны материал. Вытеснители представляют собой пустотелые трубы, служащие для удаления лишней воды из окрестности ЭГК, тем самым изменяется

водо-урановое соотношение [16] и соответственно k_f .

При расчете энерговыделения ОР выставлялись на высоту, обеспечивающую значение эффективного коэффициента размножения нейтронов, равное единице, т.е. критическое состояние реактора. При равномерном шаге решетки, равном диаметру ЭГК плюс зазор, значение k_f составило 1,39, при этом максимальное энерговыделение соответствовало центральному ЭГК. При таком k_f можно ожидать уменьшение выходной электрической мощности на 10% по сравнению с проектной.

На рисунке 5а показано распределение энерговыделения при разбиении АЗ на две части. В периферийной части, занимающей два ряда ЭГК, шаг решетки увеличен на 2% по сравнению с шагом в центральной области.

Из распределения энерговыделения видно, что даже небольшое увеличение шага решетки приводит к значительному снижению k_f – до значения 1,12, т.е. вследствие изменения водо-уранового отношения в двух последних рядах ЭГК энерговыделение на периферии реактора вырастает.

Разбиение АЗ на три части (рис. 5б) привело к снижению k_f до значения 1,06. Шаги каждой части относятся друг другу как 1,0/1,02/1,04. При этом на периферии были добавлены вытеснители воды для уменьшения энерговыделения в периферийных ЭГК.

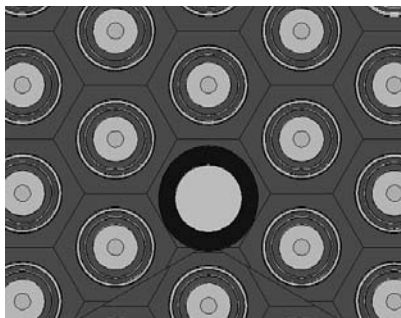


Рис. 6. Оболочка ОР в виде эллиптического цилиндра

Для ОР, располагающихся в вершинах шестиугольника и образующих центральную часть, потребовалось изменение формы оболочки канала (обычно оболочка канала ОР – это правильный цилиндр из стали). При разбиении АЗ на части около ЭГК, располагающихся рядом с ОР, образуется избыток воды и, следовательно, возрастает энерговыделение. Для того чтобы убрать лишнюю воду, оболочка канала была сделана в виде эллиптического цилиндра, что привело к снижению энерговыделения в данной области (см. рис. 6).

В общем случае распределение энерговыделения будет зависеть не только от шага решетки, но и от типа, размера ЭГК, толщины отражателя, ограничений, налагаемых на конструкцию реактора. Так для реактора с иной конструкцией и материальным составом ЭГК, а также с большей толщиной отражателя снижение k_f до 1,08 стало возможным при разбиении АЗ на четыре части (рис. 7). Соотношение шагов в каждой части 1/1,015/1,034/1,059. Дело в том, что при разбиении на три части в ЭГК на внешнем крае центральной области наблюдался всплеск энерговыделения, так как относительное энерговыделение на предыдущем ряду падало ниже значения 0,9.

Стоит отметить, что при минимальном равномерном шаге решетки диаметр АЗ уменьшался на 5,7%, но при этом потребовалось компенсировать уменьшение запаса реактивности за счет увеличения толщины отражателя. Значение k_f равнялось 1,20. При большом шаге решетки диаметр АЗ не изменялся, запас реактивности увеличивался, но коэффициент k_f равнялся 1,28. Если же брался средний шаг, то диаметр АЗ уменьшался

незначительно, запас реактивности совпадал с запасом реактивности в разделенном на части вариантом, а k_r был равен 1,27.

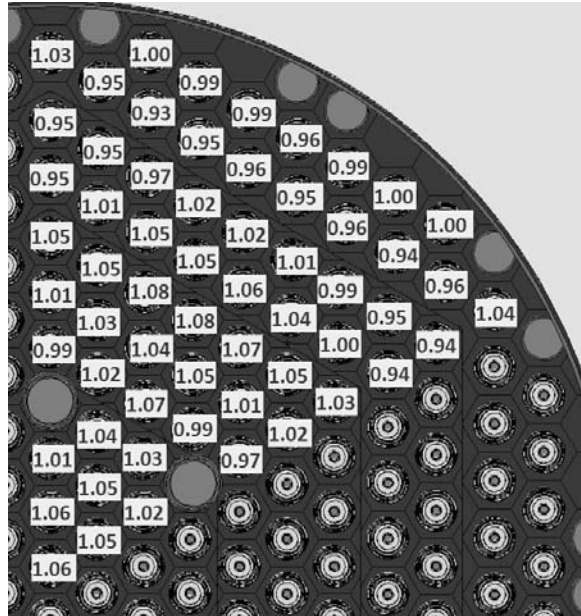


Рис. 7. Потвзльное распределение энерговыделения при разбиении активной зоны на четыре части

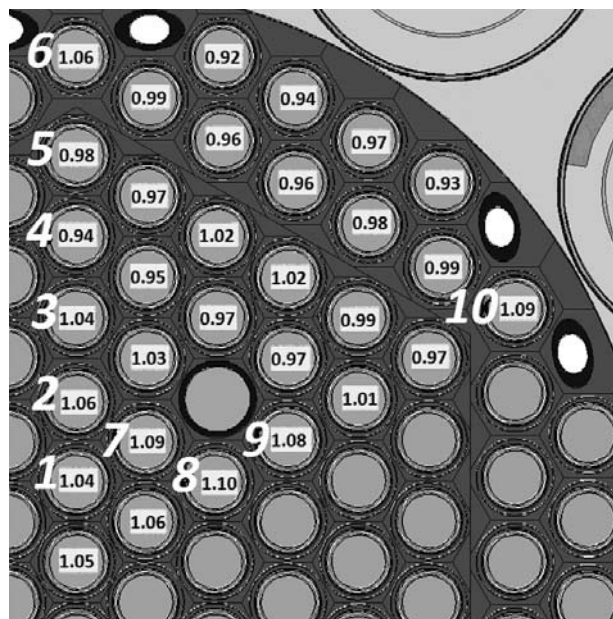


Рис. 8. Потвзльное распределение энерговыделения при разбиении активной зоны на три части

Таким образом, можно говорить о влиянии на k_r именно разделения АЗ на части с равномерным шагом решетки в каждой.

Такой подход к выравниванию энерговыделения полезен, если необходимо увеличить число ЭГК, не меняя при этом диаметра АЗ. Так добавление нескольких десятков ЭГК в АЗ с установленным диаметром и выровненным за счет неравномерного шага расстановки энерговыделением (k_r равен 1,08) приводит к необходимости увеличения

диаметра, при этом k_r не опускается ниже значения 1,15.

Если же ЭГК расположить в шестигранной решетке с разбиением на три части, то без изменения диаметра АЗ можно снизить k_r до 1,10; потвэльное энерговыделение для такого случая представлено на рис. 8.

В данном случае шаги для каждой из частей были найдены с использованием методики оптимизации, в основе которой лежит технология генетического алгоритма [17 – 20]. Поиск решения заключался в получении таких шагов, чтобы значения k_r не превышали 1,10. При этом учитывались ограничения на минимальный и максимальный шаги решетки. В качестве целевых функций были выбраны относительные энерговыделения ЭГК, отмеченных на рис. 8 номерами 1 – 6. Для трех факторов (шагов) было проведено восемь экспериментов (расчетов). После анализа полученной информации были добавлены еще четыре целевые функции – относительные энерговыделения ЭГК, отмеченных номерами 7 – 10. В результате были получены шаги решеток, относящиеся друг к другу как 1/1.018/1.055, обеспечивающие значение $k_r = 1,10$. При этом наибольшее относительное энерговыделение соответствует ЭГК, расположенным около каналов СБ и для отдельных ЭГК на периферии. На периферии уменьшить энерговыделение можно путем оптимизации формы и положения вытеснителей воды.

В центральных ЭГК всплеск энерговыделения происходит из-за образующегося избытка воды при разделении АЗ, т.е. эти всплески можно подавить оптимизацией формы и расположением канала СБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована возможность уменьшения радиального коэффициента неравномерности энерговыделения в АЗ с равномерным шагом решетки. Разбиение АЗ на части, каждая из которых имеет свой равномерный шаг при шаге решетки, растущем от центра к периферии, приводит к снижению радиального коэффициента неравномерности энерговыделения до значений 1,06. Данный подход не требует значительного увеличения габаритов реактора, учета и создания различных типов ЭГК, дополнительных конструкций в центре активной зоны.

Литература

1. Кузнецов В.А. Ядерные реакторы космических энергетических установок. – М.: Атомиздат, 1977. – 240 с.
2. Лазаренко Г.Э., Ярыгин В.И., Пышко А.П. и др. Автономная ядерная энергетическая установка электро- и теплоснабжения прямого преобразования тепловой энергии в электричество // Сб. док. Международной научно-практической конференции «Малая энергетика – 2006», Москва, 2006. – С. 68-70.
3. Кротов А.Д., Лазаренко Г.Э., Овчаренко М.К. и др. Автономная термоэмиссионная ядерная энергетическая установка для морских газо- и нефтедобывающих платформ. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 3. – С. 21-37.
4. Маслов П.А. Электрогенерирующая система малой АЭС с использованием высокоэффективного низкотемпературного термоэмиссионного процесса // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 2. – С. 24-33
5. Атомная станция малой мощности АСММ 10/100 кВт_{эл}. Электронный ресурс <http://www.ipre.ru/innov/1/in1-7.php> (дата обращения 24.11.2016).
6. Ярыгин В.И., Ружников В.А, Синявский В.В. Космические и наземные ядерные энергетические установки прямого преобразования энергии: Монография. – М: НИЯУ МИФИ, 2016. – 364 с.
7. Полоус М.А., Алексеев П.А., Ехлаков И.А. Современные расчетные технологии обоснования характеристик ЯЭДУ в проектных работах создания термоэмиссионных КЯЭУ нового поколения // Электронный журнал «Труды МАИ». – Вып. 68. – 03 сентября 2013. – 26 с.

8. *Забудько А.Н., Линник В.А., Раскач Ф.П.* Сравнение и анализ характеристик термоэмиссионных реакторов-преобразователей различного типа для космических ЯЭУ // Препринт ФЭИ-3025, Обнинск, 2004. – 28 с.
9. *Полоус М.А., Ярыгин В.И., Виноградов Е.Г.* Программный комплекс для трехмерного численного расчета тепловых и электрических характеристик многоэлементного электрогенерирующего канала термоэмиссионной ЯЭУ // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 2. – С. 151-160.
10. *Линник В.А.* Расчетно-теоретические методы исследования выходных характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих элементов, электрогенерирующих сборок (каналов) и реакторов-преобразователей космических ЯЭУ // Препринт ФЭИ-3058, Обнинск, 2005. – 70 с.
11. *Пупко В.Я. Кузмин В.И.* Использование функционалов теории возмущений для минимизации загрузки реакторов с произвольным спектром нейтронов. // Атомная энергия. – 1968. – Т. 24. – Вып. 3. – С 231-235.
12. *Sacco W.F., Filho H.A. and Pereira C.M.N.A.* Cost-based optimization of a nuclear reactor core design: a preliminary model. Proceedings of INAC, 2007.
13. MCNP – General Monte Carlo N-Particle Transport code. LA-12625-M, Vers. 4B, 1997.
14. ENDF/B-VI Data for MCNP TM. LA-12891-M, 1994.
15. *Кротов А.Д., Сонько А.В.* Расчет нейтронно-физических характеристик реактора и радиационной защиты в составе ЯЭУ космического назначения с использованием программного комплекса MCNP // Атомная энергия. – 2009. – Т. 106. – Вып. 2. – С 149-153.
16. *Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхутов М.С.* Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: Учеб.пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
17. *Konak A., Coit D.W., Smith A.E.* Multi objective optimization using genetic algorithms. A tutorial // Reliability Engineering & System Safety. – 2006. – Vol. 91. – PP. 992-1007.
18. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. – М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2010. – 368 с.
19. *Алексеев П.А.* Поиск оптимальной схемы расположения ЭГК в активной зоне термоэмиссионного реактора-преобразователя космического назначения // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 2. – С. 51-60.
20. *Алексеев П.А.* Развитие методики оптимизации активной зоны термоэмиссионного реактора-преобразователя космического назначения. / Итоги научно-технической деятельности Института ядерных реакторов и теплофизики за 2011 г. / Научно-технический сборник. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012. – С. 381-388.

Поступила в редакцию 13.02.2017 г.

Авторы

Алексеев Павел Александрович, старший научный сотрудник, канд. техн.наук

E-mail: palekseev@ippe.ru

Кротов Алексей Дмитриевич, руководитель группы

E-mail: akrotov@ippe.ru

Овчаренко Михаил Карпович, ведущий научный сотрудник

Линник Владимир Алексеевич, ведущий научный сотрудник, канд. техн.наук

E-mail: valin@ippe.ru

UDC 621.039.578:629.7

MINIMIZE FISSION POWER PEAKING FACTOR IN RADIAL DIRECTION OF WATER-COOLED AND WATER-MODERATED THERMIONIC CONVERSION REACTOR CORE

Alekseev P.A., Krotov A.D., Ovcharenko M.K., Linnik V.A.

JSC «SSC RF-IPPE n.a. A.I. Leypunsky»

1 Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

In this work we investigate the feasibility of minimizing the fission power peaking factor in radial direction of the thermionic conversion reactor (TCR) core. Due to the high nonuniformity of the power density the reactors electrical power reduces and the temperature of thermionic fuel elements (TFE) increases. This impacts the reactors lifetime.

In the core of a TCR with intermediate spectrum of neutron, thermionic fuel elements are located on concentric circles. This provides the nonuniformity of location TFE and allows reducing the fission power peaking factor. In the core of an earth-based TCR a larger number of TFE are located on hexagonal lattice with a uniform step.

Minimization of the fission power peaking factor can be achieved by using the nuclear profiling or installing additional constructions in the core. The first approach requires creating of some different types of TFE, the second might cause the degradation of reactors neutronic parameter. All this impacts the projects economic viability.

In this work we propose to split the core in sections, each of them having its uniform step on the hexagonal lattice. Moreover the step of lattice increases from center to periphery resulting in reducing the fission power peaking factor to 1,06. Number of sections is determined by step of lattice, type and size of the TFE, dimensions of the reflector and reactors design constraints. The optimal lattice step for each section can be determined using a genetic algorithm based method which can find the solution while satisfying a number of given constraints.

This method does not require any significant increase of the reactors dimensions, development and accounting of new types of TFE or additional constructions in the core.

Key words: thermionic conversion reactor, thermionic fuel elements, fission power peaking factor, step of lattice, genetic algorithm, optimization

REFERENCES

1. Kuznetsov V.A. Yadernye reaktory kosmicheskikh energeticheskikh ustanovok [Nuclear reactors of space nuclear power unit]. Moscow. Atomizdat Publ., 1977, 240 p. (in Russian)
2. Lazarenko G.E., Yarygin V.I., Pyshko A.P., Ovcharenko M.K., Miheev A.S., Linnik V.A., Krotov A.D., Lazarenko D.G., Son'ko A.V. Avtonomnaya yadernaya energeticheskaya ustanovka elektro- i teplosnabzheniya pryamogo preobrazovaniya teplovoj energii v elektichestvo [Autonomous nuclear power station for electricity and thermal supply of direct conversion thermal energy for electricity] Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Malaya energetika» [Proc. Int. Scientific-Practical Conference «Small Power Generation»], Moscow, 2006, pp. 68-70. (in Russian).
3. Krotov A.D., Lazarenko G.E., Ovcharenko M.K., Pyshko A.P., Son'ko A.V., Yarygin V.I., Lazarenko D.G. Avtonomnaya termoemissionnaya yadernaya energeticheskaya ustanovka

dlya gazo- i neftedobyvayuschih platform [Autonomus termonuclear nuclear power unit for oil and gas structures]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2011, no. 3, pp. 21-37 (in Russian).

4. Maslov P.A. Electricity generation system small nuclear power plant using high effective low temperature thermionic process. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2011, no. 2, pp. 24-33 (in Russian).

5. Atomnaya stanciya maloy moschnosti 10/100 kW_{el}. [Small thermionic nuclear power plant 10/100 kW_{el}]. Available at: <http://www.ippe.ru/innov/1/in1-7.php> (accessed 24 Nov. 2016) (in Russian).

6. Yarygin V. I., Rujnikov V.A., Sinayvskii V.V. Kosmicheskie i nazemnye yadernye energeticheskie ustanovki praimogogo preobrazovaniya energii. [Space and planetary nuclear power unit with direct energy conversion.]. Moscow. NIYaU MIFI Publ., 2016, 364 p. (in Russian).

7. Polous M. A., Alekseev P. A., Ekhlakov I. A. Modern computational technologies for justification the characteristics of nuclear power propulsion systems in design works of creation a new generation of thermionic space nuclear power unit. *Elektronnyj zhurnal Trudy MAI*, 2013, iss. 68, 26 p. (in Russian). Available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41822>

8. Zabad'ko A.N., Linnik V.A., Raskach F.P. Sravnenie i analiz harakteristik termissionnyh reaktorov- preobrazovatelej razlichnogo tipa dlya kosmicheskikh YaEU. Preprint GNC RF FEI-3025. [Comparision and analysis parameter of thermionic conversion reactor for space NPU: IPPE Preprint-3025]. Obninsk, FEI Publ., 2004, 28 p. (in Russian).

9. Polous M. A., Yarygin V. I., Vinogradov E.G. [Programnyj kompleks dlya tryohmernogo chislennoogo rascheta teplovyh i elektricheskikh harakteristik mnogoelementnogo elektrogeneriruyuschego kanala termoemissionnoy YaEU [Program complex for three-dimensional numerical calculation of thermal end electricity property for multiple-elements fuel elements of thermionic NPU]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2012, no.2, pp.151-160 (in Russian).

10. Linnik V.A. Raschyotno-teoreticheskie metody issledovaniya vyhodnyh harakteristik termoemissionnyh elektrogeneriruyuschikh sborok (kanalov) i reaktorov-preobrazovateley kosmicheskikh YaEU. Preprint GNC RF FEI-3058. [Teoretical metod for research property of thermionic fuel end conversion reactor in space power unit: IPPE Preprint -3058]. Obninsk, FEI Publ., 2005, 70 p. (in Russian).

11. Pupko V.Ya., Kuz'min V.I. Ispol'zovanie funkcionalov teorii vozmuschenij dlya minimizacii zagruzki reaktorov s proizvol'nym spektrom neitronov [Application functional of perturbation theory for minimization of reactor loading for reactor with any neutron spectrum]. *Atomnaya Energiya*, 1968, v. 24, no. 3, pp. 231-235. (in Russian).

12. Sacco W. F., Filho H. A. and Pereira C.M.N.A. Cost-based optimization of a nuclear reactor core design: a preliminary model. Proceedings of INAC, 2007.

13. MCNP – General Monte Carlo N-Particle Transport code. LA-12625-M, Vers. 4B, 1997.

14. ENDF/B-VI Data for MCNP TM. LA-12891-M, 1994.

15. Krotov A.D., Son'ko A.V, Raschyot neitronno-fizicheskikh kharakteristik reaktorf i radiatsionnoj zaschity v sostave YaEU kosmicheskogo naznacheniya s ispol'zovaniem programmnoogo kompleksa MCNP [Application code MCNP for computation of neutron-physic reactor parameter and radiation protection space NPU]. *Atomnaya Energiya*, 2009, v. 106, no. 2, pp. 149-153. (in Russian).

16. Bartolomei G.G., Bat' G.A., Baibakov V.D., Altuhov M.S. Osnovy teorii i metody raschyota yadernykh energeticheskikh reaktorov. [Bases theory and methods for computation nuclear power reactor]. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989, 512 p. (in Russian).

17. Konak A., Coit D.W., Smith A.E. Multi objective optimization using genetic algorithms. A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*. 2006, v. 91, pp. 992-1007.

18. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik B.M. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorism].

Moscow. FIZMATLIT Publ., 2010, 368 p. (in Russian).

19. Alekseev P.A. The search an optimal locations scheme for thermionic fuel elements in the core of space thermionic conversion reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2011, no. 2, pp. 51-61 (in Russian).

20. Alekseev P.A. Advancement of optimization method for core of space thermionic conversion reactor. Proc. of Results of scientific and technical activities of Institute of nuclear reactors and thermophysics in 2011. Obninsk. SSC RF-IPPE Publ., 2012, pp 381-388 (in Russian).

Authors

Alekseev Pavel Aleksandrovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: palekseev@ippe.ru

Krotov Aleksei Dmitrievich, Unit Chief

E-mail: akrotov@ippe.ru

Ovcharenko Mikhail Karpovich, Leading Researcher

Linnik Vladimir Alekseevich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: valin@ippe.ru