

УДК 621.039.5

А.В. Кайнова, Ю.П. Сухарев, Г.Н. Власичев

## РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ БЕЗ АКТИВНОГО ТЕПЛОТВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

В настоящей статье представлены основные результаты первого этапа работ по рассмотрению и обоснованию возможности создания реактора теплоснабжения малой мощности без активного теплоотвода, проектируемого по типу высокотемпературного газоохлаждаемого реактора. Приведены полученные в ходе расчетов нейтронно-физические характеристики реактора (коэффициенты размножения, температурные эффекты реактивности, кампания реактора, распределение энерговыделения и плотности потока нейтронов, величина флюенса нейтронов), рассчитанные для двух вариантов материального состава активной зоны реактора с использованием программ WIMS-D4 и JAR-HTGR, а также его концептуальная схема. Проведен сравнительный анализ полученных результатов, отмечены основные преимущества предлагаемых вариантов материального состава активной зоны, а также достоинства предлагаемой концепции реактора в целом, в условиях ее предполагаемого применения для энерго- и теплоснабжения труднодоступных и удаленных районов.

*Ключевые слова:* реакторы малой и сверхмалой мощности, нейтронно-физические характеристики, компьютерные расчеты.

### Введение

Ввиду растущей потребности в электро- и теплоснабжении труднодоступных и удаленных районов, роста капитальных затрат при строительстве крупных реакторных установок, повышенных требований к уровню самозащищенности установки, необходимости проведения исследований по физике реакторов на реальных моделях, а также востребованности этих моделей для обучения квалифицированных специалистов для АЭС отмечается повышение заинтересованности в разработке проектов реакторов малой (до 300 МВт (э)) и сверхмалой (до 15 МВт) мощности, которые, однако, относятся к малоизученной области использования ядерной энергии.

В статье [1] авторами приводится краткий обзор некоторых из существующих российских и зарубежных проектов реакторов малой мощности, на основе которых предложена собственная концепция реактора малой мощности, представляющая интерес для дальнейшей разработки. Целью данной статьи является представление результатов расчетов нейтронно-физических характеристик описанного реактора как первого этапа разработки проекта реактора в целом.

### Концепция реакторной установки

Установка представляет собой маломощный реактор с цилиндрической активной зоной, проектируемый по типу высокотемпературного газоохлаждаемого реактора. Основной особенностью конструкции является отсутствие активного теплоотвода в первом контуре. Теплосъем осуществляется через боковую поверхность реактора на систему поверхностного охлаждения за счет теплопроводности и излучения. Система поверхностного охлаждения основана на принципе естественной циркуляции.

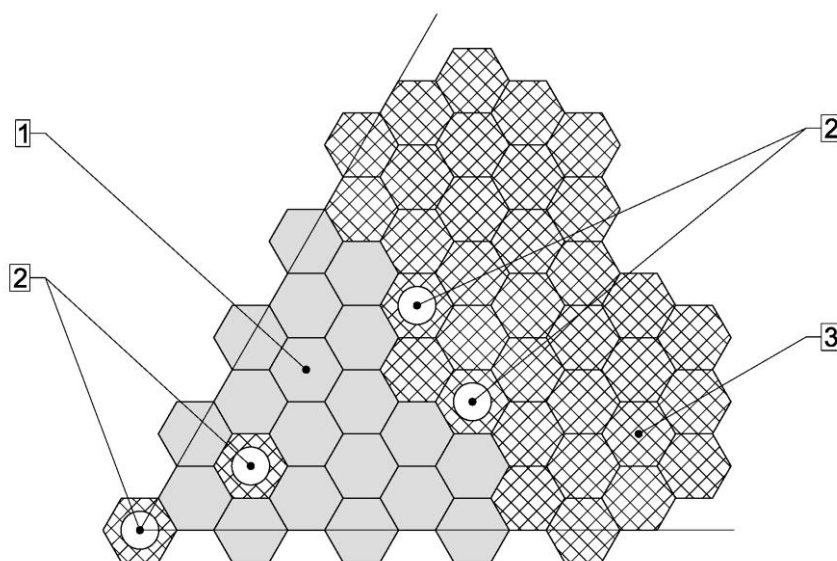
Энергонапряженность реактора выбирается на основании опыта проектирования модульных ВТГР с тем, чтобы удовлетворить условиям съема остаточных тепловыделений остановленного реактора через его боковую поверхность на систему поверхностного охлаждения за счет теплопроводности и излучения без превышения максимально допустимой для рассматриваемого топлива температуры 1700 °С. Описанные условия теплосъема накладыва-

вают существенные ограничения по уровню мощности, верхняя граница которого находится в пределах 1,5-2 МВт (т) и зависит, в частности, от материального состава активной зоны.

Обеспечение достаточного теплосъема при номинальной мощности без принудительной циркуляции теплоносителя придает установке значительно более высокие свойства внутренней самозащищенности. В данном типе реактора полностью отсутствует возможность аварии с прекращением энергопитания, которая, в случае своего возникновения в других типах реакторов, приводит к наиболее тяжелым последствиям.

### Описание конструкции активной зоны

Активная зона моделируется совокупностью шестигранных блоков, 1/6 активной зоны с боковыми отражателями и схемой расположения органов СУЗ представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Компоновка активной зоны реактора в поперечном направлении:**  
1 – топливный блок, 2 – каналы под АЗ и органы компенсации реактивности,  
3 – боковой отражатель

Активная зона реактора (АЗР) скомпонована из 126 колонн, включая 114 топливных колонн по 5 ТВС по высоте в каждой и 7 колонн для стержней СУЗ. При работе реактора на номинальных температурах стержни извлечены из АЗР.

Топливный блок – ТВС – представляет собой шестигранную призму высотой 600 мм, размером «под ключ» 195 мм. В топливном блоке предусмотрены 90 каналов диаметром 12,75 мм для размещения 90 топливных компактов. По высоте ТВС в каждом канале размещаются по 11 топливных компактов. Диаметр топливного компакта – 12,5 мм, высота – 50 мм. Топливный компакт представляет собой матрицу из карбида кремния с топливными частицами на основе сферических ядер оксида обогащенного урана диаметром 500 мкм с четырехслойным керамическим покрытием типа ТРИСО.

Активная зона окружена графитовыми отражателями. С наружной боковой поверхности активная зона окружена боковыми отражателями: сверху активной зоны помещается верхний торцевой отражатель, снизу активной зоны – нижний торцевой отражатель. В 12 колоннах бокового отражателя, примыкающих к активной зоне, размещаются каналы под органы компенсации реактивности.

Органы компенсации реактивности и стержни СУЗ содержат поглотитель – карбид бора ( $B_4C$ ). Основные характеристики реактора приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Основные характеристики реактора

Характеристика	Значение
Геометрические параметры АЗР:	
– диаметр, м	2,15
– высота, м	3
Геометрические параметры отражателей:	
– толщина бокового отражателя, м	~ 0,8
– толщина нижнего отражателя, м	1,0
– толщина верхнего отражателя, м	0,75
Количество топливных блоков в АЗР	570
Геометрические параметры топливных блоков:	
– размер под ключ, м	0,195
– высота, м	0,6
Количество топливных компактов в топливном блоке	990
Геометрические параметры топливных компактов:	
– диаметр, см	1,25
– высота, см	5
Параметры микротоплива, мкм/ – / г/см <sup>3</sup> :	
– диаметр зерна / материал / плотность	500 / $UO_2$ / 10,5
– толщина 1-го слоя покрытия / материал / плотность	90 / $PuC$ / 1,0
– толщина 2-го слоя покрытия / материал / плотность	40 / $PuC$ / 1,8
– толщина 3-го слоя покрытия / материал / плотность	40 / $SiC$ / 3,2
– толщина 4-го слоя покрытия / материал / плотность	40 / $PuC$ / 1,8

Принимая во внимание упомянутое выше влияние материалов активной зоны на тепловую мощность установки, авторами рассмотрены два возможных варианта материального состава. Конструкция топливных компактов совпадает в обоих вариантах, различен в двух исследуемых конструкциях материал топливного блока и отражателей: в первом варианте используется графит, во втором – карбид молибдена.

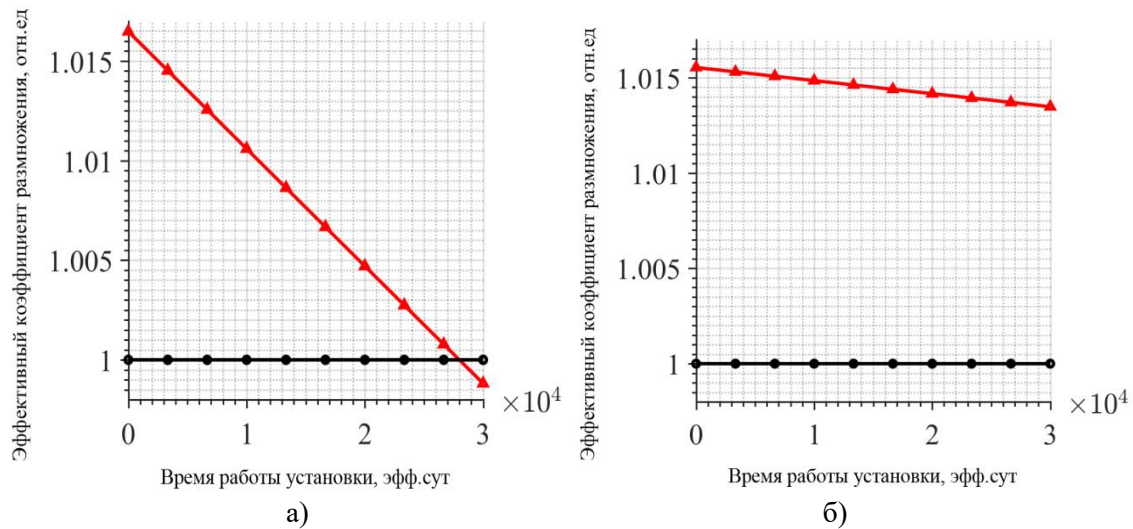
Для описанных материальных составов активной зоны с помощью программ WIMS-D4 [2] и JAR-HTGR [3] подобраны величины загрузок топлива, обогащение по основному делящемуся изотопу, рассчитаны нейтронно-физические характеристики (коэффициенты размножения, температурные эффекты реактивности, кампания реактора, распределение энерговыделения и плотности потока нейтронов, величина флюенса нейтронов), оценена эффективность систем управления. Полученные характеристики, рассчитанные для мощности 1,5 МВт (т) в графитовом реакторе, 2 МВт (т) – в молибденовом, приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Нейтронно-физические характеристики реактора

Параметр	Реактор с матрицей С	Реактор с матрицей МоС
Коэффициент размножения бесконечного реактора:		
– холодный разотравленный реактор	1,1531	1,0625
– горячий разотравленный реактор	1,0678	1,0617
Эффективный коэффициент размножения:		
– холодный разотравленный реактор	Без стержней: 1,1230	Без стержней: 1,0263
	Со стержнями: 0,9814	Со стержнями: 0,9853
– горячий разотравленный реактор	Без стержней: 1,0164	Без стержней: 1,0158
	Со стержнями: 0,9044	Со стержнями: 0,9757
Загрузка U-235 на топливный компакт, г	16.5	70
Обогащение по U-235, %	17	38
Температурный коэффициент реактивности, 1/град	$-7 \cdot 10^{-5}$	$-7,2 \cdot 10^{-7}$
Эффективность стержней, % $\Delta k/k$	13	4
Коэффициенты неравномерности энерговыделения:		
$K_s^{\max}$	1,4305	1,8477
$K_h^{\max}$	1,2565	1,4117
Кампания реактора, лет	~ 77	~ 90
Средняя плотность потока нейтронов в АЗР, н/(см <sup>2</sup> с)	$9,58 \cdot 10^{10}$	$5,23 \cdot 10^{12}$
Флюенс потока нейтронов, н/см <sup>2</sup>	$2,12 \cdot 10^{20}$	$1,5 \cdot 10^{22}$

На рис. 2 представлены зависимости эффективного коэффициента размножения нейтронов от времени облучения для ячейки с выбранными параметрами загрузки топлива и обогащения. Загрузка и топливное обогащение подобраны таким образом, чтобы начальная величина коэффициента размножения в горячем разотравленном реакторе была приблизительно одинакова для обоих вариантов материального состава активной зоны.



**Рис. 2. Зависимость эффективного коэффициента размножения от времени облучения:**  
 а) – для реактора с графитовыми топливными блоками,  
 б) – с блоками на основе карбида молибдена

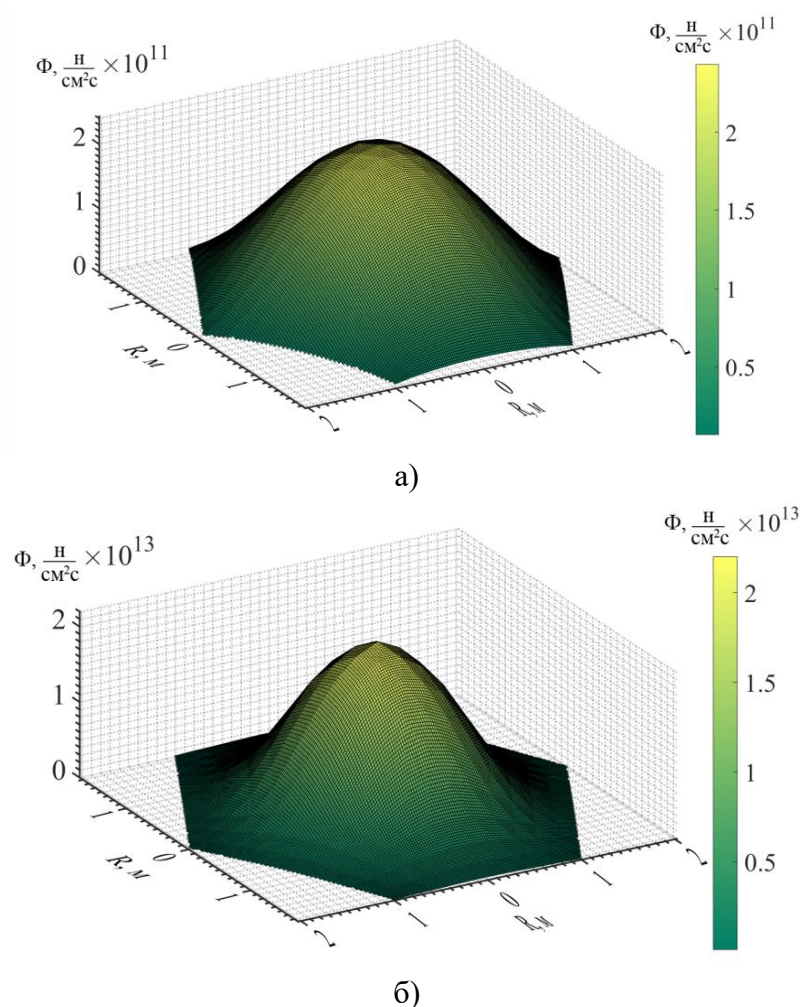
Как видно из приведенных графиков, снижение эффективного коэффициента размножения в реакторе с матрицей из графита в ТВС происходит несколько быстрее. Тем не менее, учитывая характер изменения величины коэффициента размножения, в обоих реакторах возможно реализовать значительную кампанию реакторной установки. Кампания реактора с графитовой матрицей была выбрана по времени выгорания топлива и составила  $\sim 28000$  эффективных суток ( $\sim 77$  лет). В случае же реактора с матрицей на основе карбида молибдена – коэффициент размножения мало изменяется с течением времени, в связи с чем кампания установки была определена по допустимому флюенсу конструкционных материалов:  $\sim 33000$  эфф. сут. ( $\sim 90$  лет). Реактор работает без перегрузок топлива в течение всей кампании.

Существенная кампания реактора является одним из критериев актуальности создания маломощных РУ, отмеченных в [1]. Рассматриваемая в настоящей статье концепция реактора не только в полной мере отвечает данному требованию, но и не требует перегрузок топлива в течение своей работы. Данный фактор имеет исключительную важность для удаленных районов, где и предлагается использование данной установки в связи с трудностями частого снабжения необходимыми ресурсами: доставкой ТВС, перегрузочного оборудования (либо постоянного его наличия и обслуживания на месте) и т. п.

Большой запас по температуре топлива  $\sim 400^\circ$  между выбранной рабочей температурой  $\sim 1200^\circ\text{C}$  и предельно допустимой  $1700^\circ\text{C}$  дает возможность обеспечить саморегулирование реактора, так как температурный коэффициент реактивности составляет  $-7 \cdot 10^{-5}$  1/град и  $-7,2 \cdot 10^{-7}$  1/град для реактора с графитовыми блоками и блоками из карбида молибдена, соответственно. Использование данного температурного запаса дает возможность введения более чем 3% отрицательной реактивности, что достаточно как для компенсации оперативного запаса реактивности на выгорание, так и прекращения ядерной реакции деления. Использование саморегулирования существенно упрощает конструкцию установки. В этом смысле реакторная установка аналогична «газовой колонке», в которой при отключении подачи охлаждающей воды (система поверхностного охлаждения) блокируется подача газа.

Приведенная в табл. 2 эффективность органов компенсации реактивности для двух рассматриваемых материалов активной зоны реактора демонстрирует, что использование графитовой матрицы топливного блока дает большую эффективность при одном и том же количестве поглощающих стержней. Меньшая эффективность в молибденовом реакторе объясняется жестким спектром нейтронов в активной зоне.

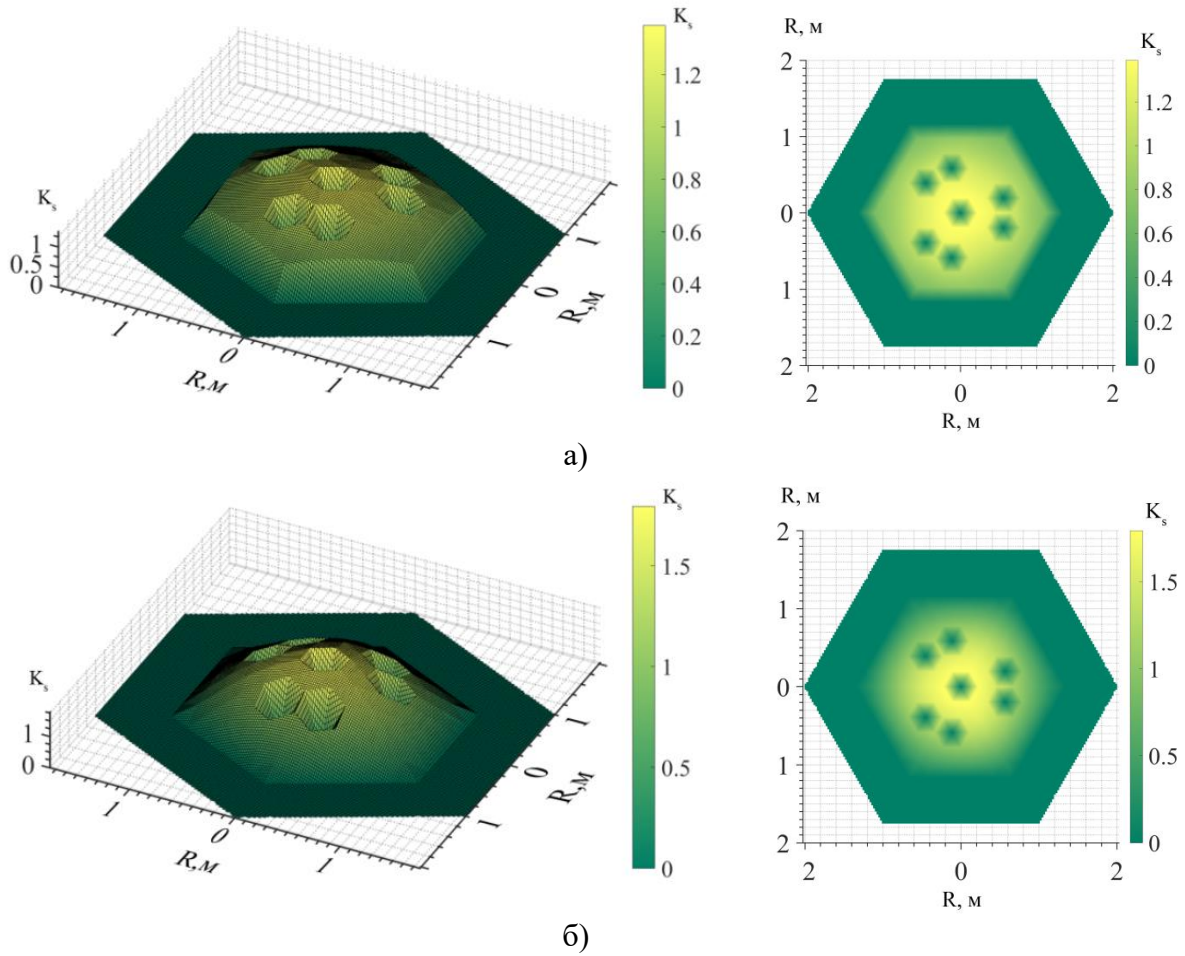
На рис. 3 приведены распределения плотностей нейтронных потоков для двух наполнений активной зоны в центральном ее сечении. На рис. 4, сверху, по аналогии – коэффициент неравномерности энергосвыделения  $K_s$ , снизу – коэффициент неравномерности энергосвыделения  $K_h$  (на рисунках:  $R$  – расстояние от центра АЗР).



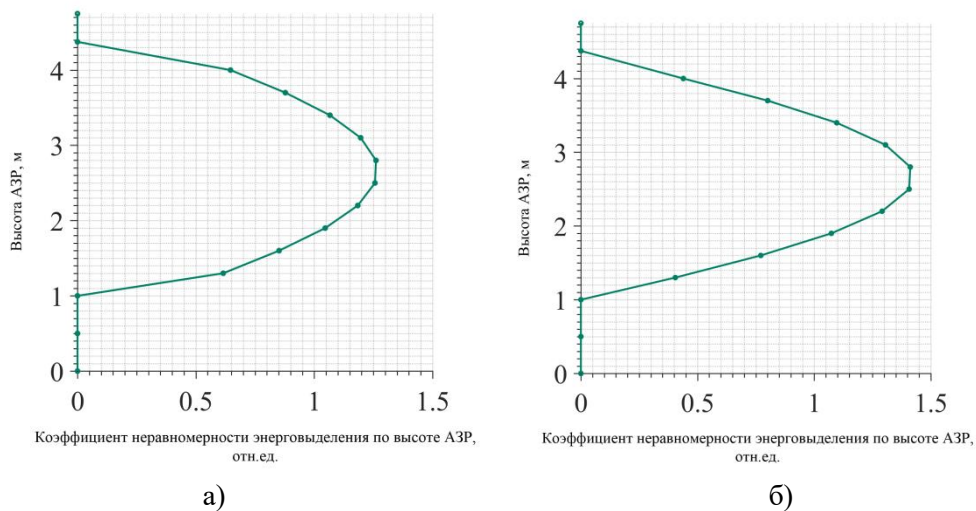
**Рис. 3. Плотность нейтронного потока в центральном сечении:**

- а) – для реактора с графитовыми топливными блоками,  
б) – с блоками на основе карбида молибдена

Величина плотности потока в реакторе с матрицей топливного блока на основе карбида молибдена на несколько порядков превышает аналогичную величину для реактора с графитовой матрицей, что является характерным для реакторов на быстрых нейтронах.



**Рис. 4. Коэффициент неравномерности энерговыделения  $K_s$  в центральном сечении:**  
 а) – для реактора с графитовыми топливными блоками,  
 б) – с блоками на основе карбида молибдена



**Рис. 5. Коэффициент неравномерности энерговыделения  $K_h$  по высоте АЗР**  
 а) – для реактора с графитовыми топливными блоками,  
 б) – с блоками на основе карбида молибдена

Провалы на приведенных поверхностях обусловлены месторасположением стержней СУЗ. Энерговыделение в реакторе с графитовыми топливными блоками более равномерно, что и подтверждают приведенные распределения коэффициентов неравномерности. Однако, для реактора с блоками на основе карбида молибдена, среднее энерговыделение в среднем

выше практически в два раза. Следовательно, как и упоминалось ранее, материальный состав активной зоны существенно влияет на уровень мощности, который можно достигнуть в описываемой реакторной установке.

### Заключение

В настоящей статье рассмотрены итоги первого этапа разработки проекта реактора малой мощности без активного теплоотвода, предложенного авторами ранее как представляющий интерес для проработки на фоне повышения заинтересованности к проектам маломощных и сверхмаломощных реакторных установок.

Таким образом, приведены результаты расчетов следующих нейтронно-физических характеристик реакторной установки: эффективный коэффициент размножения и коэффициент размножения бесконечного реактора, загрузка и обогащение U-235, эффективность систем управления, распределение плотности потока нейтронов и среднего энерговыделения, кампания реактора и флюенс нейтронов. Данные характеристики рассчитаны для двух вариантов топливной композиции: с топливными блоками с графитовой матрицей и матрицей из карбида молибдена. Решение о проведении подобного сравнительного анализа обусловлено тем, что уровень мощности, которого можно достигнуть в предлагаемом концепте реактора, зависит от материалов, составляющих активную зону установки.

Согласно вышеописанному, использование графитовой матрицы топливных блоков приводит к более равномерному полю энерговыделений и более высокой эффективности стержней СУЗ. Однако, по остальным указанным характеристикам, а именно: коэффициентам размножения, длительности кампании реактора, плотности потока нейтронов, тепловой мощности реакторной установки – использование матрицы из карбида молибдена является более предпочтительным.

Таким образом, параметры, которых можно достигнуть с использованием молибденовой матрицы в топливных блоках, более оптимальны в условиях основной цели разработки данного реактора – создание источника энерго- и теплоснабжения для удаленных и труднодоступных районов, так как в описанных условиях наибольшее значение имеют: длительность кампании реакторной установки, ее мощность и низкая потребность в регулярном обслуживании.

В целом по концепции реактора необходимо отметить высокий уровень самозащитности, прежде всего, за счет температурного коэффициента реактивности. Благодаря данному свойству установка может функционировать в режиме без регулярного присутствия оператора, что опять же повышает актуальность ее использования в качестве источника тепла и электричества в удаленных от основных энерго- и теплосетей населенных пунктах.

### Библиографический список

1. **Кайнова, А.В.** Реакторные установки сверхмалой мощности / А.В. Кайнова, Ю.П. Сухарев, Г.Н. Власичев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2018. – № 1 (120). – С. 108-116.
2. **Askew, J.R.** A General Description of the Lattice Code WIMS / J.R. Askew, F.J. Fayers, P.B. Kemshell // Journal of British Nuclear Energy Society. – 1966. – Vol.5, iss. 4. – P. 564-585.
3. **Ярославцева, Л.Н.** Комплекс программ JAR для расчета нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов // ВАНТ. сер. ФТЯР. – 1983. – № 8 (37). – С. 41-43.

*Дата поступления*

*в редакцию: 22.01.2019*



A.V. Kainova, Yu.P. Sukharev, G.N. Vlasichev

**NUMERICAL JUSTIFICATION FOR NEUTRON AND PHYSICAL PARAMETERS  
OF LOW POWER REACTOR WITHOUT ACTIVE HEAT RECOVERY**

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

**Purpose:** The article is aiming to represent the results of the first stage of work on Low Power Reactor project – Low Power Reactor without active heat recovery.

**Design/methodology/approach:** The computer model of the Low Power Reactor Core was created for calculating the neutron and physical parameters ( $k$ -effective, Doppler coefficient, reactor core campaign, power and neutron flux density distributions, value of the neutron fluence) for two types of reactor core. These types are differing in material of fuel unit – first base on molybdenum carbide and second – on graphite. Calculations were performed using WIMS-D4 and JAR-HTGR programs.

**Results:** The results obtained were compared for two types of fuel unit material. That comparison is represented at the current article with comments and explanations of the reasons for the differences. Based on it, the most important advantages of Low Power Reactor concept suggested are underlined (including the specific advantages for both types of fuel unit material).

*Key words:* Low and Super Low Power Reactors, neutron and physical parameters, computer calculations.