

Удк 621.039.526

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБОСНОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕАКТОРЕ БОР-60

© 2012 А.В. Варивцев<sup>2</sup>, И.Ю Жемков<sup>2</sup>, А.Н. Козолуп<sup>2</sup>, Н.С. Погляд<sup>2</sup>, Д.Я. Вострецов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский государственный университет

<sup>2</sup> ОАО «ГНЦ РФ НИИАР», Димитровград

Поступила в редакцию 20.11.2012

Для проверки возможности обеспечения требуемых условий облучения для различных материалов был проведен методический эксперимент. Цель эксперимента заключалась в обеспечении заданных значений температур в элементах экспериментального устройства на номинальном уровне мощности реактора. Для этого на стадии проектирования экспериментального устройства расчетным путём были определены величины теплоизолирующих газовых зазоров для каждого сегмента экспериментального устройства.

Ключевые слова: облучательное устройство, радиационное тепловыделение, сегмент, активная зона, температура, тепло-гидравлические характеристики.

### Введение

Изменения физико-механических свойств облучаемых быстрыми нейтронами материалов, главным образом конструкционных, в значительной степени зависят от условий облучения, к важнейшим характеристикам которых относятся температура. Без достоверной информации о температурном режиме облучения часто невозможно интерпретировать такие процессы, как набухание, коррозия, ползучесть и т.д. В настоящее время температуры облучения материалов в реакторе БОР-60 лежат в диапазоне от 320 °С («холодное» облучение) до 650 °С («горячее» облучение), а требования к стабильности и точности обеспечения температурных условий облучения становятся все более жесткими.

Температурные условия облучения экспериментальных устройств, включающих в себя теплоизолирующий газовый зазор между ампулами с образцами и охлаждающим их проточным реакторным натрием, в основном, зависят от радиационного тепловыделения в ампулах, от температуры реакторного натрия, состава и величины газового зазора, а также от степени черноты стенок ампулы (при высоких температурах).

Для повышения точности расчетного определения условий облучения исследуемых материалов, был проведен методический эксперимент. Целью эксперимента было получение реперных значений температуры в элементах экспериментального устройства и дальнейшей корректировки расчетных моделей и методик на основе полученных данных. Эксперимент проводился в инструментальной ячейке активной зоны реактора БОР-60 – ячейке Д23.

Целью данной работы было обоснование возможности обеспечения требуемых температурных условий при облучении различных материалов в активной зоне реактора БОР-60.

### КОНСТРУКЦИЯ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Для проведения методического эксперимента было разработано специальное облучательное устройство (ОУ), которое на период проведения эксперимента размещался в инструментальной ячейке Д23 реактора БОР-60.

Корпусом ОУ являлся пакет разборный ПР-1, представляющий собой конструкцию, которая состоит из чехла шестигранного, внутренней трубы, переходников верхнего и нижнего и хвостовика. Между чехлом шестигранным и внутренней трубой – газовая среда, состоящая из смеси воздуха и аргона, для теплоизоляции внутренней полости ОУ от окружающих ТВС. Хвостовик содержит боковые отверстия для протока теплоносителя (натрия) во внутреннюю полость корпуса из камеры высокого давления реактора БОР-60. Во внутренней полости корпуса ОУ размещена подвеска.

---

Варивцев Артем Владимирович, научный сотрудник.

E-mail: vav3@niiar.ru

Жемков Игорь Юрьевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории.

Козолуп Александр Николаевич, старший научный сотрудник.

E-mail: ziu@niiar.ru

Поглад Николай Степанович, младший научный сотрудник.

E-mail: ziu@niiar.ru

Вострецов Дмитрий Ярославович, старший научный сотрудник. E-mail: VostrecovDYa@ulsu.ru

Подвеска состоит из пяти сегментов, переходника, наконечника и втулки. Сегменты содержат стыковочные элементы, которыми они соединены между собой с фиксацией шплинтом.

На 1 и 2 этажах подвески (нижняя часть а.з.) располагаются сегменты с образцами гидрида гафния ( $HfH_x$ ), каждый из которых представляет собой герметичную сварную конструкцию, с двумя полостями: наружной и внутренней. Конструкция сегмента включает в себя оболочку сегмента, заглушку, внутреннюю оболочку, заглушку, канал, наконечник и втулку. Во внутренней полости сегмента расположена кассета, в которой размещены ампулы с образцами  $HfH_x$ . Внутренняя полость сегмента заполнена натрием. Наружная полость сегмента заполнена газом. Поперечное и продольное сечения сегмента с гидридом гафния приведены на рис. 1.

На 3 этаже подвески располагается сегмент с натрием и сталью, представляющий собой герметичную сварную конструкцию, с двумя полостями: наружной и внутренней, и включает в себя оболочку сегмента, заглушку, внутреннюю оболочку, заглушку, канал, наконечник и втулку. Внутренняя полость сегмента заполнена натрием. Наружная полость сегмента заполнена газом.

В сегменте расположен термопарный карман, состоящий из кармана и пробки. Поперечное и продольное сечения сегмента с натрием и сталью приведены на рис. 2.

На 4 и 5 этажах подвески (верхняя часть а.з.) располагаются сегменты со свинцом, каждый из которых представляет собой герметичную сварную конструкцию, с двумя полостями: наружной и внутренней, и включает в себя оболочку сегмента, заглушку, внутреннюю оболочку, заглушку, канал, наконечник и втулку. Во внутренней полости сегмента расположена кассета с образцами. Внутренняя полость сегмента заполнена свинцом. Наружная полость сегмента заполнена газом. В сегменте расположены два термопарных кармана. Поперечное и продольное сечения сегментов со свинцом представлены на рис. 3.

Состав газовых сред наружных полостей сегментов выбирался по результатам теплофизического расчета из ограниченного перечня газовых сред, включающего в себя: гелий и аргон. Величины теплоизолирующих газовых зазоров между оболочками сегментов, а также значение температуры в заданных точках определялись расчетным путем в зависимости от величины и состава газового зазора в сегменте, радиацион-

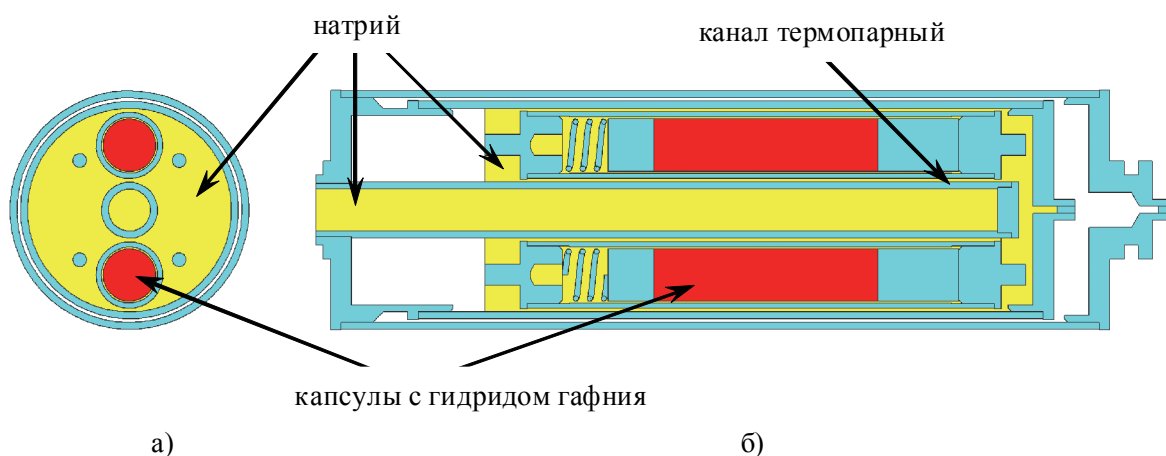


Рис. 1. Поперечное (а) и продольное (б) сечения сегмента с гидридом гафния (этажи 1 и 2)

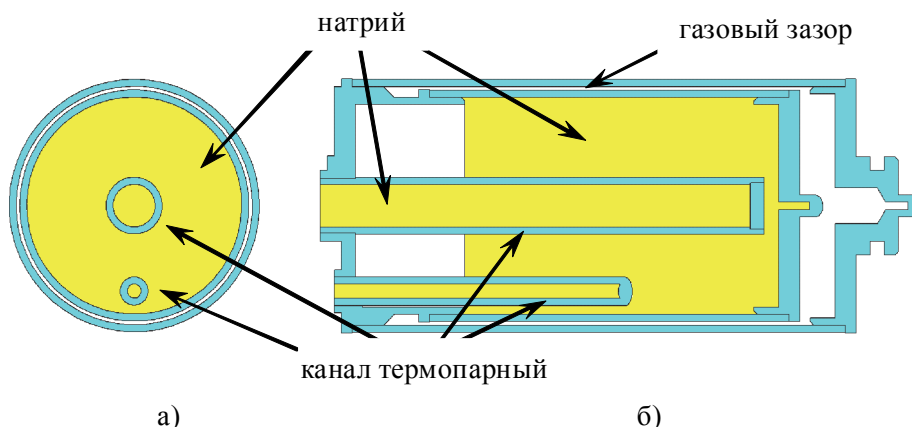


Рис. 2. Поперечное (а) и продольное (б) сечения сегмента со сталью и натрием (этаж 3)

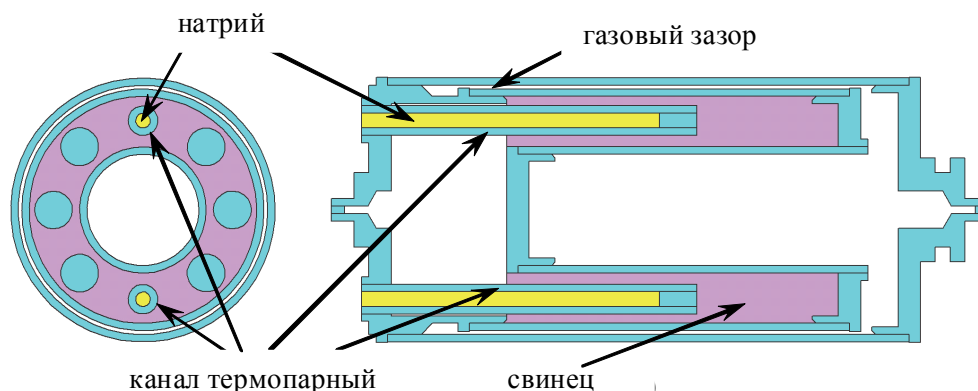


Рис. 3. Поперечное (а) и продольное (б) сечения сегмента со свинцом (этаж 3)

ного тепловыделения в элементах конструкции, степени черноты излучения, а также подогрева от соседних ТВС, с использованием экспериментального значения расхода теплоносителя через внутреннюю полость ОУ с учетом условий работы реактора БОР-60.

### РАСЧЕТНЫЕ ПРОГРАММЫ

Трёхмерная модель реактора для расчета НФХ была создана с помощью комплекса автоматизированного расчета (КАР) реактора БОР-60. КАР [1] предназначен для создания расчетных моделей реактора БОР-60 с учетом реального расположения всех пакетов в картограмме реактора, состава ядерного топлива, поглотителя и конструкционных материалов. Комплекс позволяет производить расчет и обработку нейтронно-физических характеристик (НФХ) реактора БОР-60, полученных на основе соответствующих картограмм загрузки реактора. В КАР создана и регулярно пополняется база данных по всем микрокомпаниям (МК) реактора, штатным и экспериментальным ТВС, воспроизводящим сборкам бокового экрана, экспериментальным сборкам, отдельным экспериментальным твэлам, стержням СУЗ и т.д. С помощью КАР отслеживаются и фиксируются изменения в нуклидном составе топлива, хранятся расчетные значения НФХ в виде пространственных распределений по а.з. и боковому экрану на начало и конец каждой МК.

Детальные расчеты НФХ в ОУ были проведены по прецизионному коду MSU-RR [2]. MSU-RR – универсальный код, моделирующий перенос нейтронов в произвольной трёхмерной конфигурации материалов с детальным учётом энергетической зависимости нейтронных сечений и гамма-квантов с веществом. Код MSU-RR регулярно используется в НИИАР для расчета НФХ реактора БОР-60 и сопровождения экспериментальных исследований.

Теплогидравлические характеристики ОУ рассчитывались по программе TVEKCF. Про-

грамма TVEKCF, входящая в аттестованный программный комплекс ДИНБОР [3], интегрирует системы дифференциальных уравнений теплопроводности при вычислении нестационарного температурного поля цилиндрического твэла в квазистационарном приближении. Контактный подслои не имеет массы, а создает только термическое сопротивление.

### НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Целью расчета было получение расчетных оценок радиационного тепловыделения в элементах конструкции ОУ, являющихся исходными данными для теплогидравлического расчета.

Время проведения методического эксперимента активная зона реактора состояла из 113-ти штатных ТВС, 6-ти пакетов для наработки радионуклидов (ПР) и 4-х материаловедческих пакетов (МП), в стальном боковом экране находилась 1 воспроизводящая сборка из обедненного урана (ВСБЭ).

Исследуемое ОУ было загружено в инструментальную ячейку Д23 (5-й ряд). Во время проведения эксперимента ОУ было окружено шестью штатными ТВС со средним выгоранием топлива от 2,0 до 11,5 %т.а. (среднее выгорание по шести ТВС ~7,1 %т.а.), а среднее выгорание топлива по а.з. реактора БОР-60 на начало МК-91 составляло 7,2 %т.а. Расчеты НФХ в ОУ проведены по коду MSU-RR и нормированы на тепловую мощность реактора 50 МВт.

Для того чтобы учесть возможные неравномерности НФХ по сечению ОУ, расчет проводился для каждого отдельного элемента конструкции. Расчет радиационного тепловыделения проводился по уточнённой расчетной методике [4], позволяющей учитывать как мгновенное, так и запаздывающее гамма-излучение от ТВС активной зоны реактора.

На рис. 4 приведено аксиальное распределение удельного радиационного тепловыделения на основных материалах (сталь, натрий, гидрид гафния и свинец), входящих в состав ОУ.

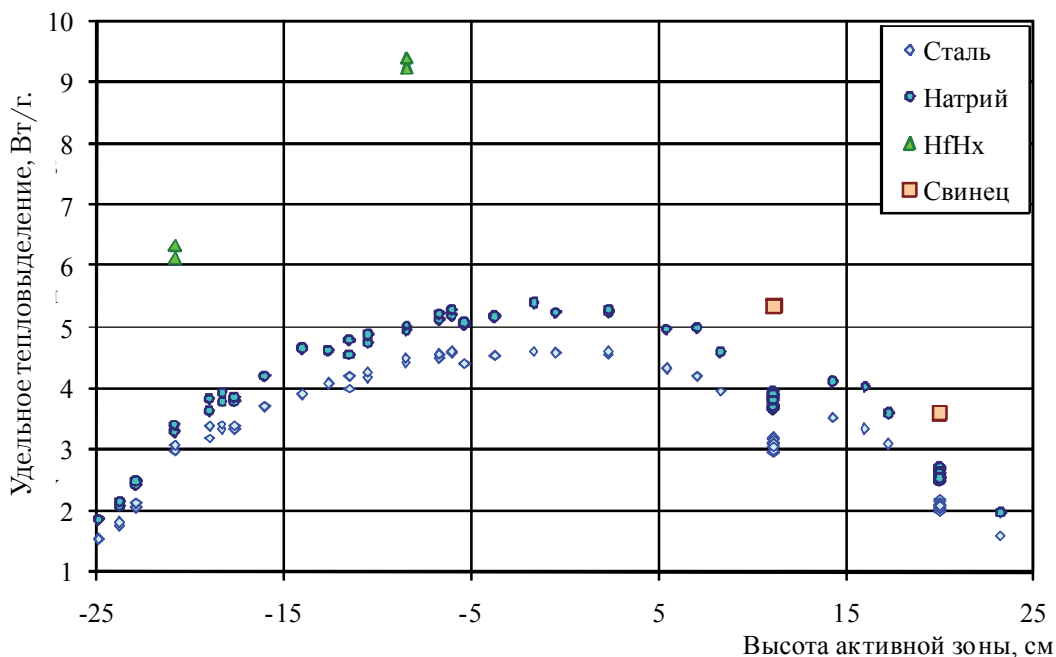


Рис. 4. Аксиальное распределение радиационного тепловыделения по ОУ

**ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ**

Теплогидравлический расчет ОУ был проведен на основе расчетных значений радиационного тепловыделения, полученных на предыдущем этапе. При проведении расчета учитывалось распределение тепловыделения в элементах конструкций, образцах и теплоносителе по высоте, радиальный и аксиальный теплообмен, а также теплообмен излучением.

Цель расчета – выбор состава газа и величины теплоизолирующего газового зазора по этажам ОУ для достижения требуемых температур. Требуемые температурные условия облучения приведены в табл. 1.

Теплогидравлический расчет ОУ был проведен для следующих параметров: тепловая мощ-

ность реактора – 50 МВт, температура Na на входе в реактор – 315°С, степень черноты капсулы была принята равной  $\epsilon=0.7$ . В результате выполненных расчетов было определено, что в теплоизолирующем газовом зазоре должен находиться гелий. Размеры теплоизолирующих зазоров в сегментах ОУ показаны в табл. 2.

После изготовления ОУ были замерены толщины теплоизолирующих зазоров и для полученных значений пересчитаны температуры. Реальные значения толщины теплоизолирующих зазоров по этажам приведены в табл. 3, там же приведены неопределенности в температурах, связанные с погрешностью определения толщины теплоизолирующего зазора (погрешность прибора для измерения диаметра оболочки сегмента составляет ~0,01 мм).

Таблица 1. Требуемые температурные условия облучения

Номер сегмента (этаж)	Среда заполнения	Требуемая температура облучения образцов, °С
5	Свинец	550
4	Свинец	550
3	Натрий	360
2	Натрий	600
1	Натрий	500

Таблица 2. Результаты расчета величины зазоров между оболочками в сегментах ОУ

Этаж	Материал	Зазор при $T \sim 20^\circ\text{C}$ , мм
1	Гидрид гафния в натрии	0,44
2	Гидрид гафния в натрии	0,50
3	Натрий	0,10
4	Стальные образцы в свинце	0,18
5	Стальные образцы в свинце	0,32

**Таблица 3.** Толщины теплоизолирующих зазоров (газ - гелий) по этажам ОУ (Т~20°С)

Этаж	Материал	Расчетный зазор, мм	Измеренный зазор, мм	ΔТ, °С
1	Гидрид гафния в натрии	0,44	0,45±0,05	±21
2	Гидрид гафния в натрии	0,50	0,51±0,03	±17
3	Натрий	0,10	0,12±0,05	±22
4	Стальные образцы в свинце	0,18	0,18±0,02	±26
5	Стальные образцы в свинце	0,32	0,33±0,04	±29

### МЕТОДИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Методический эксперимент по определению температурных условий облучения гидроксида гафния в натрии, стали в натрии и свинце в составе теплоизолированных капсул ОУ был проведен в начале МК-91.

22 июня 2010г. во время ППР № 91 в ячейку Д23 реактора БОР-60 было установлено ОУ и все 12 термопар были подключены к ИИС [5] для проведения измерения температур. На момент начала измерений реактор БОР-60 находился в подкритическом состоянии уже более 40 сут (остаточное тепловыделение в реакторе составляло менее 30 кВт), входная и выходная температуры натрия практически совпадали (в пределах ±1°С), расход натрия через реактор составлял 607±4 м<sup>3</sup>/час. Температуры, показываемые термопарами ОУ, отличались от температуры окружающего натрия от -1°С до +9°С, а среднее отклонение по всем термопарам составило (2ч5)°С, что соответствует суммарной погрешности термопар и погрешности определения температуры окружающего натрия (± 5,5ч7,3°С).

В ходе проведения эксперимента, после выхода реактора БОР-60 на номинальную мощ-

ность 48 МВт, были обработаны показания всех термопар на этажах. В табл. 4 приведены экспериментальные значения средних значений температур на этажах ОУ для номинальной мощности реактора, а также расчетные значения температур с учетом реальных значений газовых зазоров, приведенных в табл. 3.

Как видно из таблицы, в целом экспериментальные значения температур на этажах ОУ соответствовали расчетным (находились в пределах отмеченных выше погрешностей).

Следует отметить, что термопары показывают температуры в местах их постановки. В табл. 5 приведены расчетные отличия температур на термопарах и на образцах, а также при смещении термопары в вертикальном направлении на ±10 мм от заданного положения.

Выполненные уточняющие расчеты показали, что:

- для двух нижних этажей (с гидридом гафния) температуры в месте расположения термопар отличаются от температур оболочек капсулы на 20 °С (1 этаж) и 10 °С (2 этаж), для 3-го этажа температуры практически совпали, для верхних этажей расчетные значения температур выше показаний термопар на 20 °С (4 этаж) и 30 °С (5 этаж);

**Таблица 4.** Расчетные и экспериментальные значения средних температур на этажах ОУ

Этаж	Расчетный зазор, мм	Измеренный зазор, мм	Т, °С (требуемая)	Т, °С (расчет)	Т, °С (эксперимент)
1	0,44	0,470	500	485	466; 460
2	0,50	0,510	600	565	557; 555
3	0,10	0,135	360	373	380; 373
4	0,18	0,185	550	505	483; 490
5	0,32	0,325	550	520	485; 490
	$T_{вх}=315\text{ °С}$		$W_{p-pa}=50\text{ МВт}$	$W_{p-pa}=48\text{ МВт}$	

**Таблица 5.** Расчетные отличия температур на термопарах и образцах

Этаж	Показания термопар	ΔТ, °С	ΔТ <sub>н</sub> , °С
1	466; 460	1÷3	4÷7
2	557; 555	6÷9	7÷10
3	380; 373	8÷11	8÷10
4	483; 490	11÷15	6÷8
5	485; 490	5÷7	3÷4

ΔТ – расчетное отличие температур в месте постановки термопар и на образцах,

ΔТ<sub>н</sub> – изменение температуры при смещении термопары на ±10 мм от места установки

- небольшое смещение расположения термодатчиков относительно центра капсулы приводит к существенному изменению значений температур (до 10 °С);

Большие различия расчетных и экспериментальных значений температур на 1-м и 5-м этажах, чем на центральных этажах (2...4) могут быть связаны с завышением расчетных значений тепловыделения на границе а.з.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований в обоснование температурных условий облучения материалов в ячейке Д23 активной зоны реактора БОР-60.

В результате выполненных расчетно-экспериментальных исследований была показана возможность обеспечения (в пределах погрешности

20÷30 °С) требуемых температурных условий облучения различных материалов (для «горячих» режимов  $T = 500...600$  °С) в активной зоне реактора БОР-60. Для «холодных» режимов облучения ( $T = 350...380$  °С) отличия расчетных и экспериментальных температур составили 0 °С...7 °С, что показало высокую надежность обеспечения требуемых температур при облучении материалов в активной зоне реактора БОР-60.

Таким образом, было показано, что условия облучения в активной зоне реактора БОР-60 определяются с точностью достаточной для обеспечения облучения различных материалов при заданных температурных условиях.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы и государственного задания на 2012-2014 гг.*

## CALCULATIONS AND EXPERIMENTAL RESEARCH IN SUBSTANTIATION OF STRUCTURAL MATERIALS IRRADIATION CONDITIONS IN BOR-60 REACTOR

© 2012 A.V. Varivtsev<sup>2</sup>, I.Yu. Zhemkov<sup>2</sup>, A.N. Kozolup<sup>2</sup>, N.S. Poglyad<sup>2</sup>, D.Y. Vostretsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ulyanovsk State University

<sup>2</sup>Joint Stock Company “State Scientific Center Research Institute of Atomic Reactors”, Dimitrovgrad

Methodical experiment was performed to check a capability of needed irradiation condition support for different materials. A purpose of experiment is to support specified temperature of experimental rig elements during irradiation at a nominal level of reactor power. To achieve this purpose during rig designing some calculations were performed. Due to calculations, needed dimensions of isolating gas filled gaps were defined for each of experimental rig segment.

Key words: irradiation rig, radiation heat rate, segment, core, temperature, thermal-hydraulic characteristics

*Artem Varivtsev, Research Fellow. E-mail: vav3@niiar.ru*

*Igor Zhemkov, Candidate of Technic, Head of Laboratory.*

*E-mail: ziu@niiar.ru*

*Alexandr Kozolup, Senior Research Fellow. E-mail: ziu@niiar.ru*

*Nikolay Poglyad, Associate Research Fellow.*

*E-mail: ziu@niiar.ru*

*Dmitry Vostretsov, Senior Research Fellow.*

*E-mail: VostretcovDYa@ulsu.ru*