УДК 621.039.51

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖЕНИЯ НА ЗНАЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ОБЛУЧАТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ РЕАКТОРА БОР-60

Боев А.В., Варивцев А.В., Погляд Н.С.
АО «ГНЦ НИИАР», Димитровград, e-mail: avboev@niiar.ru

При проведении испытаний перспективных материалов в исследовательских реакторах одной из важнейших задач является обеспечение требуемых температурных условий. Облучательные устройства, предназначенные для обеспечения необходимой температуры, разрабатываются на основе расчетных данных, получаемых, как правило, при помощи современных CFD-кодов. Ввиду ограниченных вычислительных ресурсов моделируют лишь облучательное устройство (ОУ), а его окружение заменяется граничными условиями. Описанный подход позволяет использовать все доступные ресурсы для детализации моделируемого ОУ и его составных частей. Следует заметить, что граничные условия на поверхности ОУ заведомо не известны, так как состав и характеристики ОУ влияют на распределение температур и тепловых потоков на его границе, что является источником дополнительных неопределенностей. Авторами предложен подход, заключающийся в моделировании полиячеек реактора, состоящих из ОУ и окружающих его ТВС, и позволяющий исключить неопределённость граничных условий. Однако предложенный подход связан с неопределённостями параметров окружения ОУ. Авторами получены оценки влияния неопределённостей параметров окружения на значения температур. Показано, что предложенный подход к моделированию ОУ устойчив к изменению исходных параметров окружения ОУ в пределах погрешности расчёта.

Ключевые слова: теплообмен, температура, мощность, теплоноситель, расход, термопара, граничные условия

ESTIMATION OF ENVIRONMENT PARAMETERS UNCERTAINTIES EFFECT ON TEMPERATURE VALUES INSIDE BOR-60 REACTOR IRRADIATION RIG

Boev A.V., Varivtsev A.V., Poglyad N.S.
JSC «SSC RIAR», Dimitrovgrad, e-mail: avboev@niiar.ru

One of the most important tasks for promising material tests in research reactors is providing of required temperature conditions. Rigs intended to provide required temperatures are developed with use of data, calculated with modern CFD-codes. As a rule, due to limited PC's computational power, the only irradiation rig (IR) is modelled and all the surrounding core FAs are replaced by boundary conditions. This approach allows to use detailed mesh for IR and its' parts. However, boundary conditions at the IR surface are not well-known because of IR effect on temperatures and heat flows at the IR surface. So, boundary conditions add some uncertainty to calculations results. Authors proposed alternative approach: modelling of reactor polycells including IR and surrounding FAs. However, this approach has environment parameters uncertainties. Authors obtained Estimations of environment parameters uncertainties effect on temperature values inside irradiation rig. It's shown that proposed modelling method is sustainable to environment parameters uncertainties within calculational errors.

Keywords: heat-exchange, temperature, power, coolant, flow rate, thermocouple, boundary conditions

Для развития ядерной энергетики большое значение имеют испытания в исследовательских реакторах новых перспективных материалов и конструкций отдельных реакторных элементов, обоснование возможности повышения максимального выгорания ядерного топлива (ЯТ) и достижения предельных флюенсов нейтронов (повреждающих доз). Одной из важнейших задач при проведении испытаний перспективных материалов в исследовательских реакторах является обеспечение требуемых температурных условий. Для этого применяются различные типы облучательных устройств (ОУ).

При проектировании ОУ большое внимание уделяется расчетным данным, полученным при использовании современных CFD-кодов, на основе которых определяется конструкция ОУ и условия испытаний. Использование таких расчетных кодов позволяет детально моделировать многокомпонентные системы с неоднородным распределением внутренних источников тепловыделения и сложными взаимозависящими процессами теплообмена, как в стационарном состоянии, так и при переходных процессах.

Зачастую, ввиду ограниченных возможностей вычислительной техники, моделируется лишь само облучательное устройство (ОУ), а окружающие его ТВС активной зоны заменяются граничными условиями. Такой подход вносит дополнительную погрешность, связанную с неопределённостью теплофизических параметров на границе раздела ОУ и соседних ТВС.

В работе [1] предложен подход, при котором моделируется полиячейка реактора, состоящая из исследуемого ОУ и ближайших 6-ти ТВС окружения, позволяющий исключить неопределённость граничных условий на поверхности ОУ.

Цель исследования

Цель данной работы – оценка влияния неопределённостей параметров окружения на значения температур в облучательном устройстве реактора БОР-60. Для достижения поставленной цели были проведены расчетные исследования, результаты которых сравнивались с экспериментальными данными, полученными для облучательного устройства с твэльным подогревом реактора БОР-60 [2].

Материалы и методы исследования

В работе исследовалось влияние параметров окружения на характеристики облучательного устройства реактора БОР-60 с твэльным подогревом. ОУ состоит из корпуса и размещённой в нём подвески, в состав которой входят кассета с образцами и нагреватель из 24 твэлов.

Геометрические характеристики корпуса ОУ соответствуют корпусу штатной ТВС, Конструкция корпуса ОУ является разборной, что позволяет проводить замену и промежуточные внереакторные исследования образцов.

Диаметр оболочки и навивка твэлов нагревателя идентичны твэлам штатной ТВС. Топливная часть твэлов подогрева длиной 300 мм размещена на высотных отметках от –185 мм до –485 мм относительно центральной плоскости а.з. (ЦПАЗ). В качестве топлива используется штатное оксидное урановое виброуплотненное топливо реактора БОР-60 с обогащением ~70 % по изотопу ^{235}U.

Конструкция подвески обеспечивает протекание теплоносителя через внутреннюю полость корпуса ОУ, при этом осуществляется контакт теплоносителя с поверхностью твэлов и образцов. Исследуемые образцы размещаются над твэлами в пределах высоты а.з. реактора. ОУ с твэльным подогревом выбрано для проведения исследований процессов межпакетного теплообмена по следующим причинам:

1) отсутствие теплоизолирующего газового зазора приводит к выраженному теплообмену между пакетами и упрощению расчётной модели;

2) погрешность определения мощности твэлов ниже погрешности определения мощности элементов ОУ, не содержащих ядерного топлива.

Во время эксперимента ОУ облучалось в инструментованной ячейке реактора БОР-60 в пятом ряду активной зоны. Контроль температур в ОУ обеспечивался непрерывно с помощью шести термопар (ТП), показания которых записывались информационно-измерительной системой (ИИС) реактора БОР-60. Термопары расположены попарно над твэлами (Т1, Т2), над образцами (Т3, Т4) и в верхней части сборки (Т5, Т6). На рис. 1 представлена конструкция ОУ с твэльным подогревом.

В ОУ обеспечено значение расхода теплоносителя, при котором достигаются заданные значения температур образцов, равное 1,2 м^3/ч. Заданное значение расхода получено путём подбора диаметра специальной дросселирующей шайбы, обеспечивающей необходимую величину гидравлического сопротивления, при известном перепаде давления. Гидравлическая характеристика ОУ (зависимость расхода от перепада давления) экспериментально определена на стенде гидравлических испытаний экспериментальных устройств ядерных реакторов.

Перед проведением исследований теплообмена в рассматриваемых модельных полиячейках были рассчитаны значения удельного тепловыделения (Вт/г) для материалов, входящих в состав ОУ и окружающих ТВС. Для этого была создана трехмерная расчетная модель реактора БОР-60, соответствующая состоянию реактора на начало методического эксперимента. Расчёт проводился с помощью прецизионного кода MCU-RR [3] по методике [4], позволяющей учитывать вклад в тепловыделение основных компонент реакторного излучения – нейтронной, мгновенной и запаздывающей фотонной.

Вариантные теплогидравлические расчёты ОУ с твэльным подогревом проведены с использованием расчётного кода ANSYS CFX [5]. В расчётах использовалась k-ε модель турбулентности [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Моделировалась полиячейка реактора БОР-60, состоящая из ОУ и 6-ти ТВС ближайшего окружения. Поскольку мощности соседних ТВС отличаются слабо, а конструкция напорного коллектора реактора БОР-60 обеспечивает такое профилирование потока теплоносителя, что температуры теплоносителя в ТВС разных рядов активной зоны довольно близки, то на боковой поверхности полиячейки заданы адиабатические граничные условия: тепловой поток равен нулю.

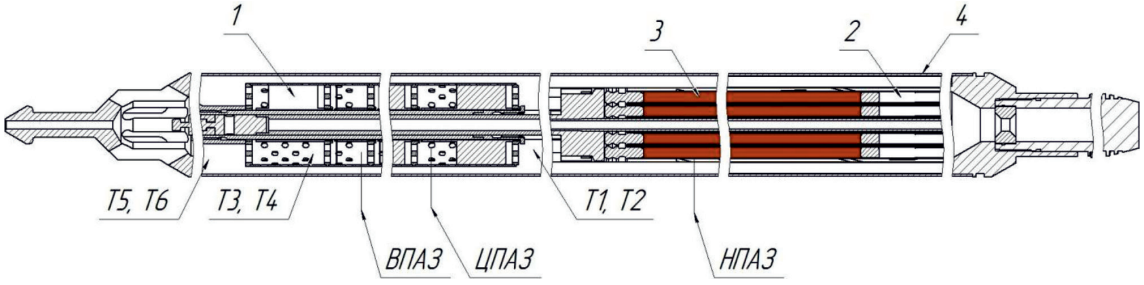


Рис. 1. ОУ с твэльным подогревом (продольное сечение): 1 – экспериментальный объем для размещения образцов исследуемых материалов, 2 – пучок твэлов, 3 – топливная часть твэла, 4 – корпус ОУ; ВПАЗ, ЦПАЗ, НПАЗ – верхняя, центральная и нижняя плоскости активной зоны соответственно

В расчётах варьировались следующие параметры окружения ОУ: тепловая мощность ТВС ($N_{ТВС}$, кВт), расход теплоносителя через ТВС ($G_{ТВС}$, м^3/ч) и расход теплоносителя в межпакетном зазоре вдоль одной грани чехла ($G_{зазор}$, кг/ч). Параметры каждой ТВС (тепловая мощность и расход) задавались индивидуально. Среднее значение мощности окружающих ТВС составило 410 кВт, а расхода теплоносителя через них – 6,3 м^3/ч.

Максимальная погрешность определения мощности ТВС и расхода теплоносителя через ТВС не превышает 10 %. Наибольшей неопределённостью обладает расход натрия в межпакетном зазоре, так как эта величина не измеряется непосредственно и подвержена влиянию формоизменения чехлов ТВС и ОУ под действием температур и радиационных эффектов. Для проведения расчётов используется средняя величина межпакетного расхода, составляющая 40 кг/ч вдоль одной грани чехла ТВС (или другого пакета). В данной работе этот параметр варьировался в широких пределах.

Всего было рассмотрено 7 вариантов, отличающихся друг от друга одним из варьируемых параметров. Параметры окружения для каждого смоделированного варианта приведены в табл. 1.

Мощность твэльного нагревателя и расход теплоносителя через ОУ одинаковы для всех вариантов и составляют 121 кВт и 1,2 м^3/ч соответственно. Суммарная абсолютная погрешность определения температуры натрия на выходе из твэльного пучка (и, соответственно, образцов) в ОУ оценена величиной ~30 °С.

На рис. 3 приведены распределения температур для вариантов 1–3, отличающихся значениями мощности ТВС, в сечении, соответствующем уровню расположения термопар 3 и 4 (+240 мм относительно ЦПАЗ).

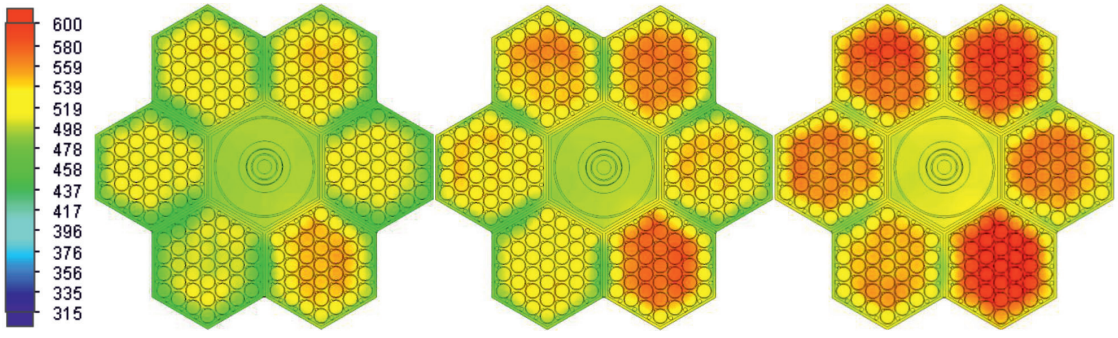
На рис. 3 приведены распределения температур для вариантов 1, 4 и 5, отличающихся значениями расхода натрия через ТВС, в сечении, соответствующем уровню расположения термопар 3 и 4 (+240 мм относительно ЦПАЗ).

Таблица 1

Расчётные и экспериментальные значения температур в ОУ

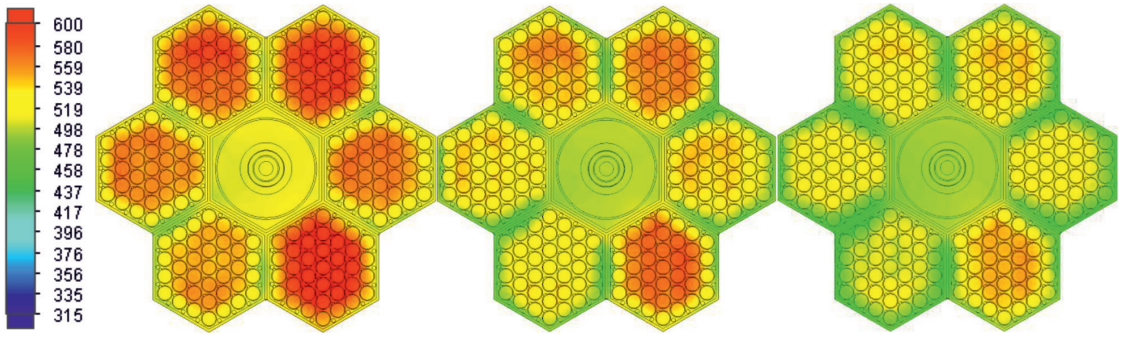
Вариант	Варьируемый параметр	$N_{ТВС}$*, кВт	$G_{ТВС}$*, м^3/ч	$G_{зазор}$, кг/ч
1	Базовый вариант	410	6,3	40
2	Мощность ТВС	370 (–10 %)	6,3	40
3	Мощность ТВС	450 (+10 %)	6,3	40
4	Расход Na через ТВС	410	5,6 (–10 %)	40
5	Расход Na через ТВС	410	6,9 (+10 %)	40
6	Расход Na в межпакетном зазоре	410	6,3	20
7	Расход Na в межпакетном зазоре	410	6,3	60

Примечание. * – среднее значение для 6 ТВС.



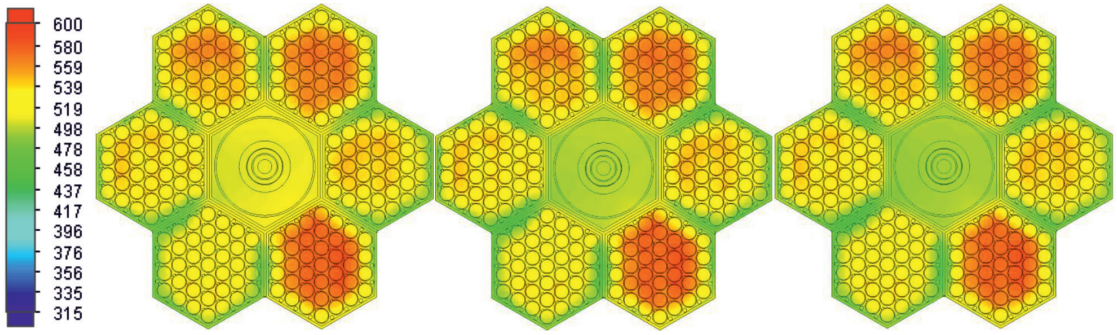
а) *б)* *в)*

Рис. 2. Распределение температур в полиячейке: а) вариант 2 ($N_{ТВС}$ = 370 кВт); б) вариант 1 ($N_{ТВС}$ = 410 кВт); в) вариант 3 ($N_{ТВС}$ = 450 кВт)



а) *б)* *в)*

Рис. 3. Распределение температур в полиячейке: а) вариант 4 ($G_{ТВС}$ = 5,6 м³/ч); б) вариант 1 ($G_{ТВС}$ = 6,3 м³/ч); в) вариант 5 ($G_{ТВС}$ = 6,9 м³/ч)



а) *б)* *в)*

Рис. 4. Распределение температур в полиячейке: а) вариант 6 ($G_{зазор}$ = 20 кг/ч); б) вариант 1 ($G_{зазор}$ = 40 кг/ч); в) вариант 7 ($G_{зазор}$ = 60 кг/ч)

Таблица 2

Расчётные и экспериментальные значения температур в ОУ

Высотная отметка*, мм	Параметр	Вариант							
		1	2	3	4	5	6	7	Эксперимент
	$N_{ТВС}$, кВт	410	370	450	410	410	410	410	410
	$G_{ТВС}$, м³/ч	6,3	6,3	6,3	5,6	6,9	6,3	6,3	6,3
	$G_{зазор}$, кг/ч	40	40	40	40	40	20	60	40
–102	T1, °C	594	593	594	594	593	596	591	600
–102	T2, °C	584	583	584	584	583	586	581	585
240	T3, °C	497	494	506	508	494	508	494	503
240	T4, °C	498	494	507	509	494	508	494	504
319	T5, °C	503	497	513	515	496	513	498	502
319	T6, °C	503	497	514	516	497	514	499	504

Примечание. * – относительно центральной плоскости активной зоны.

Как и ожидалось, уменьшение мощности ТВС и увеличение расхода натрия через ТВС на 10% (варианты 2 и 5 соответственно) приводят к одинаковому эффекту – снижению температур во всех элементах полиячейки (см. рис. 3, а, и 4, в). Обратный эффект (см. рис. 3, в, и 4, а) наблюдается при увеличении мощности ТВС и уменьшении расхода натрия через ТВС на 10% (варианты 3 и 4 соответственно).

На рис. 4 приведено распределения температур для вариантов 1, 6 и 7, отличающихся значениями расхода натрия в межпакетном зазоре, в сечении, соответствующем уровню расположения термопар 3 и 4 (+240 мм относительно ЦПАЗ).

Как видно из рис. 4, изменение расхода натрия в межпакетном зазоре не приводит к заметному изменению температур в ТВС, а влияет лишь на температуры внутри ОУ.

В табл. 2 приведены результаты расчетных и экспериментальных значений температур, полученные для всех 6-ти термопар ОУ (T_1-T_6).

Следует отметить совпадение расчетных значений для базового варианта (вариант 1) и экспериментальных данных в пределах 6 °С.

Сравнение приведенных в таблице расчетных значений показывает, что варьирование мощности окружающих ТВС в пределах ±10 % приводит к изменению температур в ОУ не более чем на 11 °С, а расхода натрия через них – не более чем на 13 °С.

Уменьшение расхода натрия в межпакетном зазоре в 2 раза приводит к снижению температур в ОУ не более чем на 11 °С.

Заключение

Проведены расчётные исследования, направленные на получение оценок влияния неопределённостей мощности окружающих ТВС, расхода теплоносителя через них и расхода теплоносителя в межпакетном зазоре на значения температур в облучательном устройстве с твэльным подогревом реактора БОР-60.

Показано, что неопределённости мощности окружающих ТВС и расхода натрия через них в пределах ±10 % приводят к изменению температур в ОУ не более чем на 11 °С и 13 °С соответственно. Уменьшение расхода натрия в межпакетном зазоре в 2 раза приводит к снижению температур в ОУ не более чем на 11 °С.

Таким образом, предложенный подход к моделированию ОУ (в составе полиячеек) устойчив к изменению исходных параметров окружения ОУ в пределах погрешности расчёта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00415 мол_а.

Список литературы

1. Варивцев А.В. Моделирование полиячеек для расчёта температур в облучательном устройстве исследовательского РБН с натриевым теплоносителем / А.В. Боев, А.В. Варивцев, Н.С. Погляд // ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы – 2017. – № 3. – С. 118–125.

2. Ерёмин С.Г., Жемков И.Ю., Плотников А.И. Устройство с твэльным подогревом теплоносителя для облучения материалов в ядерном реакторе // Патент РФ № 2524683. 2014. Бюл. № 22.

3. Gomin E., Maiorov L. The MCU Monte Carlo Code for 3D Depletion Calculation // Proceedings of International Conference, September 27–30, 1999, vol. 2. Madrid, Spain.

4. Varivtsev A.V. Improved method for calculating the radiation heat generation in the BOR-60 reactor // Physics of Atomic Nuclei. – 2014. – vol.77, no. 14. – P. 1664–1670.

5. Шалумов А.С., Вченко А.С., Фадеев О.А., Багаев Д.В. Введение в ANSYS. Прочностной и тепловой анализ: учебное пособие. – Ковров: КГТА, 2008. – 52 с.

6. Mohammadi B., Pironneau O. Analysis of the K-Epsilon turbulence model. – M. John Wiley & Sons, 1994. – 194 p.