

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСТАНОВКИ КОНТЕЙНЕРОВ С УРАНСОДЕРЖАЩИМ МАТЕРИАЛОМ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КАНАЛ РЕАКТОРА ВВР-ц

О.Ю. Кочнов*, Ю.Д. Левченко, И.А. Чусов*****

** Филиал научно-исследовательского физико-химического института
им. Л.Я. Карпова. 249033, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109-й км*

*** ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского.*

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

**** Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.*

249040, Обнинск, Калужской обл., Студгородок, 1



На основании численных расчетов показана возможность установки в один из экспериментальных каналов реактора ВВР-ц дополнительных контейнеров с урансодержащим делящимся материалом. Приводится описание методики расчета теплогидравлики экспериментального канала. Показано, что циркуляционные насосы, установленные в экспериментальных петлях, обеспечивают расход теплоносителя, достаточный для снятия объемного энерговыделения и поддержания в допустимых пределах температур теплоносителя и стенок контейнеров.

Ключевые слова: экспериментальный реактор, ВВР-ц, экспериментальный облучательный канал, экспериментальный стенд, теплогидравлические параметры экспериментального канала.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Исследовательская установка ВВР-ц представляет собой гетерогенный реактор бассейнового типа. Реактор имеет двухконтурную систему охлаждения. Разрешенная к настоящему времени мощность реактора – 15 МВт. Теплоносителем первого контура и замедлителем является предварительно подготовленная обессоленная вода.

Одним из направлений использования исследовательского ядерного реактора ВВР-ц являются исследования в области радиационной химии и радиационной обработки материалов с производством опытно-промышленных партий радиационно обработанных материалов.

Основные технологические параметры исследовательской реакторной установки (ИРУ) даны в табл. 1.

Корпусом реактора является бак – сосуд цилиндрической формы высотой 5340,0 мм с внутренним диаметром 2268,0 мм (рис. 1а). Сверху бак закрыт крышкой толщиной 30,0 мм. В крышке имеются отверстия для доступа к активной зоне, для крепления

экспериментальных каналов (ЭК) и каналов для рабочих органов (стержней) СУЗ.

Таблица 1

Основные технологические параметры ИРУ ВВР-ц

Наименование величины	Значение
Мощность реактора, МВт	15
Объем активной зоны, литров	206
Число ТВС в активной зоне, шт.	70
Обогащение топлива ²³⁵ U в активной зоне, %	36
Среднее выгорание по активной зоне, %	20
Количество стержней СУЗ в активной зоне, шт.	9
Количество экспериментальных каналов в активной зоне, шт.	6
Расход теплоносителя в первом контуре, м ³ /ч	1400
Давление воды на входе в активную зону, МПа	0,226
Перепад давления на активной зоне, МПа	0,144
Температура воды на входе в активную зону, °С	до 50
Температура воды на выходе из активной зоны, °С	≤ 65
Коэффициент запаса до кипения	1,72
Средняя скорость теплоносителя в ТВС, м/с	≈ 2,13

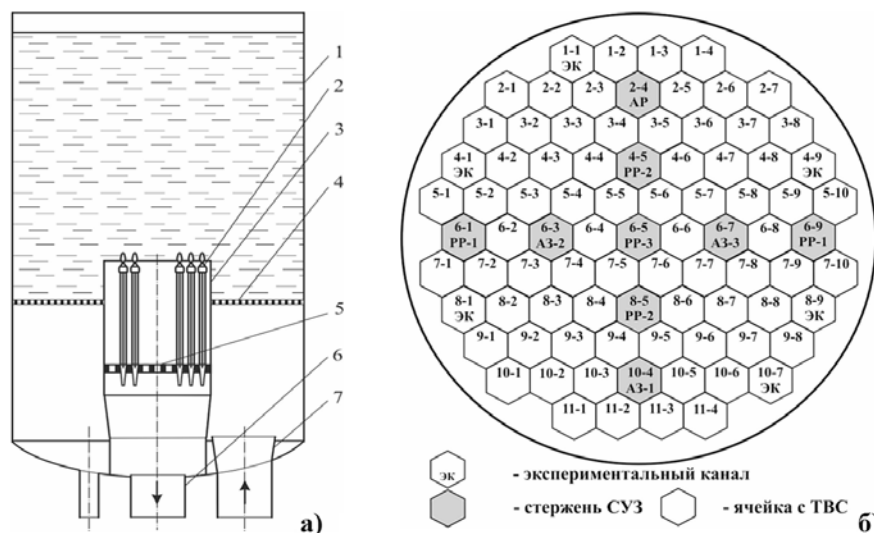


Рис.1. Общий вид ИРУ ВВР-ц и картограмма типичной загрузки: 1 – бак; 2 – ТВС; 3 – корпус реактора; 4, 5 – отбойная и опорная решетки; 6, 7 – трубопроводы всаса и напора; ЭК – экспериментальные каналы; РР – стержни СУЗ

В баке реактора размещена активная зона, каналы рабочих органов СУЗ, вертикальные и горизонтальные ЭК. Бак реактора и элементы корпуса активной зоны изготовлены из сплава САВ-1. Активная зона набирается из тепловыделяющих сборок (типа ТВС ВВР-ц). Всего в активной зоне 70 ТВС, девять каналов для стержней СУЗ и шесть верти-

кальных ЭК. Картограмма загрузки активной зоны и расположение в ней ЭК показаны на рис.16.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КАНАЛ И БЛОК-КОНТЕЙНЕР

Основными целями работы являются

- определение температуры стенки блок-контейнера (БК) и теплоносителя в местах расположения БК в ЭК;
- расчет максимальной температуры урансодержащего материала в БК при установке в ЭК до четырех БК включительно;
- определение давления в газовых зазорах БК при различных уровнях мощности реактора ВВР-ц;
- расчет гидравлических потерь в циркуляционных петлях ЭК при использовании штатных насосов.

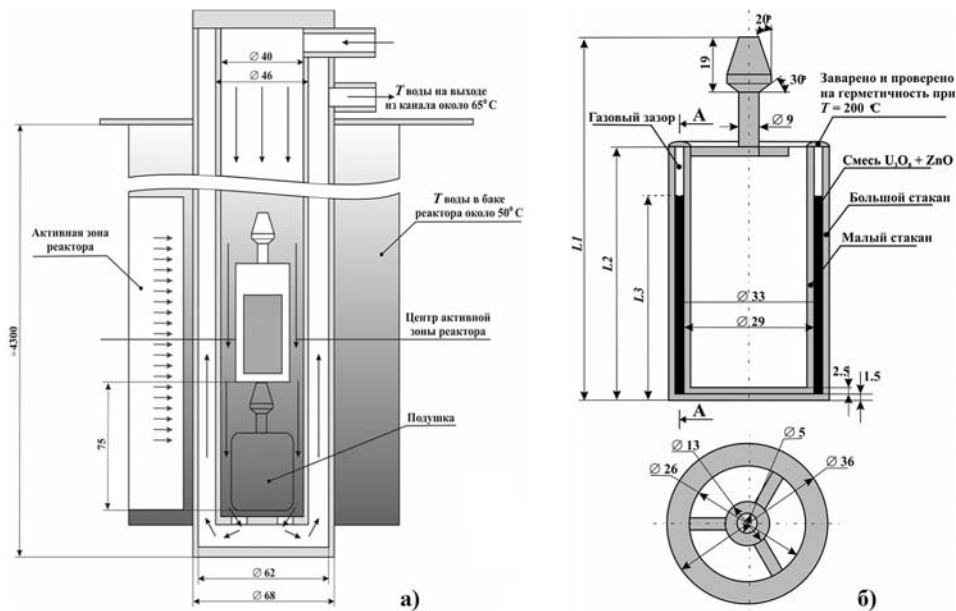


Рис. 2. Общий вид и основные геометрические характеристики ЭК и БК с указанием схемы движения теплоносителя: а) ЭК; б) БК

Таблица 2
Технические и геометрические характеристики блок-контейнеров

Смесь $U_3O_8 + ZnO$, обогащение по $^{235}U = 90,0\%$		
	Вариант №1	Вариант №2
	Масса	Масса
U_3O_8 , г	4,5	5,0
ZnO , г	22,5	25,0
	Длина	Длина
L_1 , мм	135,0	140,0
L_2 , мм	85,0	90,0
L_3 , мм	65,0	70,0

На рисунках 2 а, б приведены геометрические характеристики ЭК и БК. В соответствии с техническими условиями работы реакторной установки возможны два способа подключения системы охлаждения к ЭК:

- последовательный – ЭК последовательно подключаются друг за другом (рис. 3а);
- параллельный – ЭК подключаются к раздаточному коллектору и после охлаждения БК поступают в сборный коллектор (рис. 3б). Особенностью такого подключения является деление общего расхода примерно по половине в каждый ЭК. Принципиальная схема системы отвода тепла с высотными отметками и длинами тракта циркуляции приведена на рис. 4.

Размещение блок-контейнеров в ЭК показано на рис. 2а. В самом низу ЭК устанавливается подушка, а затем один над другим – четыре или три блок-контейнера (на рисунке для простоты показан только один блок-контейнер).

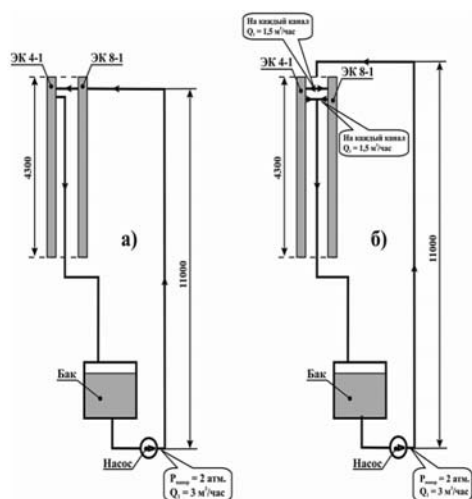


Рис. 3. Схема подключения двух экспериментальных каналов: а) последовательная; б) параллельная

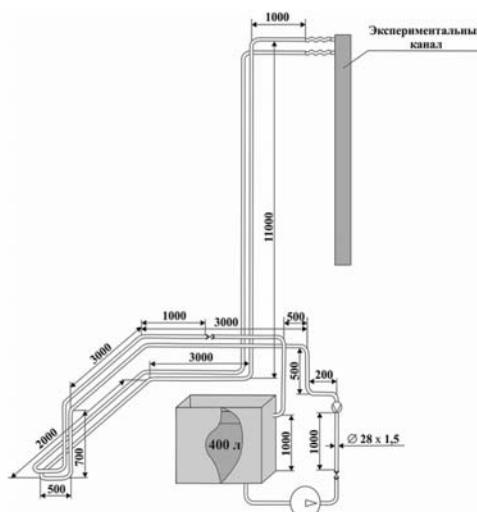


Рис. 4. Принципиальная гидравлическая схема системы отвода тепла от экспериментального канала

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

При расчете теплогидравлических характеристик ЭК с помощью программного кода ANSYS [1] использовалась классическая k - ϵ -модель турбулентности со стандартным набором констант и соотношением Колмогорова для расчета турбулентной вязкости [2]. Выбор модели турбулентности обусловлен ее апробацией многочисленными расчетами и сравнением с экспериментальными данными. По мнению авторов, классическая k - ϵ -модель турбулентности является достаточно надежным инструментом получения сравнительно достоверных физических результатов и может рассматриваться как типовой инструмент для расчета турбулентных течений.

Основные расчеты были проведены для нескольких уровней мощности реакторной установки и различного количества установленных в ЭК БК.

Далее все расчеты со штатным БК будем называть Вариант № 1 (В1), а расчеты БК с увеличенной загрузкой – Вариант № 2 (В2). Характеристики БК по В1 и В2 приведены в табл. 2.

Для расчета нейтронно-физических характеристик, т.е. поля энерговыделения в БК, был использован код MCNP [3].

РАСЧЕТЫ ТЕМПЕРАТУР СО СТАНДАРТНОЙ ЗАГРУЗКОЙ ТОПЛИВА

Расчет по В1 проводился для пяти наиболее характерных режимов работы реакторной установки ВВР-ц (табл. 3).

Таблица 3

Расчетные величины при различных режимах работы РУ (В1)

W, МВт	T_{α} , °С	T_{β} , °С	T_{γ} , °С	$T_{вх}$, °С	$T_{вых}$, °С	$T_{гз}^{max}$, °С	$\Delta P_{вх}^{вых}$, Па
1	58,73	51,12	58,11	50,0	50,15	54,79	70015
5	93,16	56,25	89,91	50,0	50,83	73,5	70060
10	136,73	62,56	130,2	50,0	51,67	98,44	70066
12,5	158,07	63,96	150,3	50,0	51,88	116,77	68669
15	181,14	66,67	171,88	50,0	52,26	122,67	72204

Для более компактной записи заголовков табл. 3 – 6 введены следующие обозначения: T_{α} – максимальная температура топлива в блок-контейнере; T_{β} – максимальная температура наружной стенки блок-контейнера (со стороны кольцевого канала); T_{γ} – максимальная температура внутренней стенки блок-контейнера; $T_{вх}$ – температура теплоносителя на входе в канал охлаждения блок-контейнеров; $T_{вых}$ – температура теплоносителя на выходе из канала охлаждения блок-контейнеров; $T_{гз}^{max}$ – максимальная температура газовой смеси в объеме блок-контейнера; $\Delta P_{вх}^{вых}$ – падение давления в канале охлаждения блок-контейнеров.

Из таблицы 3 следует, что максимальная температура оболочки БК не превосходит 175 °С. Это значение существенно ниже температуры плавления сплава САВ-1 (температура плавления сплава САВ-1 \approx 900 °С). Температура топлива не превышает примерно 181 °С, что также указывает на невозможность подплавления внутренней оболочки БК.

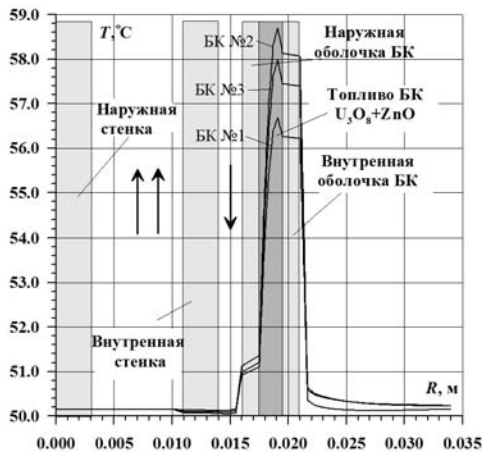


Рис. 5. Распределение температуры по поперечному сечению ЭК с тремя загруженными БК на мощности 1 МВт

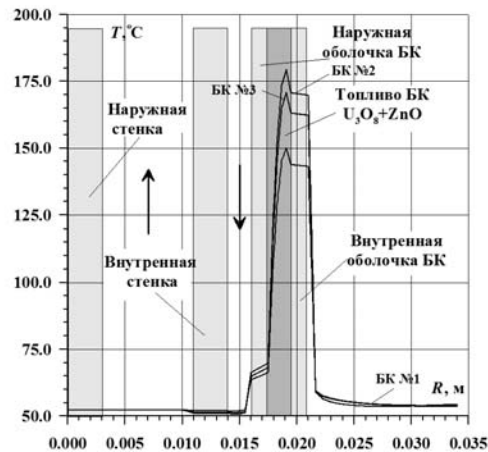


Рис. 6. Распределение температуры по поперечному сечению ЭК с тремя загруженными БК на мощности 15 МВт

На рисунке 5 показано поперечное распределение температуры в ЭК на уровне мощности 1 МВт. Отметим, что сечения, для которых приводятся графические зависимости, расположены на 10 мм ниже центра БК и соответствуют геометрическому месту точек центра топливного столба твэлов реактора. Из рисунка видно, что на этом уровне мощности максимальные температуры топлива и оболочек БК не превышают температуру

кипения теплоносителя. На рисунке приведены данные только по БК 1 – 3, поскольку в четвертом БК (первом от входа в ЭК) энерговыделение самое маленькое и теплоноситель является еще холодным (температура теплоносителя на входе в ЭК $\approx 50^\circ\text{C}$). Наименьшее энерговыделение объясняется тем, что четвертый блок-контейнер расположен на самом верху экспериментального канала, где плотность потока нейтронов наименьшая. Численные расчеты показали, что значения температур в четвертом БК примерно на 30% меньше, чем в остальных.

На рисунке 6 представлено распределение температуры в поперечных сечениях первых трех блок-контейнеров для мощности 15 МВт, откуда видно, что сохраняется общая тенденция в распределении температур (подобная форма кривых распределения имеет место и для случая 1 МВт) в поперечных сечениях.

Рисунок наглядно демонстрирует, что на уровне мощности 15 МВт на внутренней поверхности блок-контейнера в очень тонком пристенном слое существует значительное повышение температуры теплоносителя, сопровождающееся пузырьковым кипением. На факт, что режим кипения является пузырьковым, указывает достаточно низкая температура стенки. В случае, если бы режим кипения был пленочным, то температура стенки была бы значительно выше, поскольку образовавшаяся в результате вскипания теплоносителя пленка оттеснила бы жидкий теплоноситель от стенки, что немедленно привело бы к росту ее температуры. Поскольку разность температур между топливной засыпкой и внутренней стенкой блок-контейнера составляет 10°C , т.е. существует значительный градиент температуры, то режим пленочного кипения не реализуется, а происходит пузырьковое кипение. Из курса тепломассообмена [4, 5] хорошо известно, что в общем случае пузырьковый режим кипения благотворно сказывается на процессах переноса теплоты, интенсифицируя ее перенос.

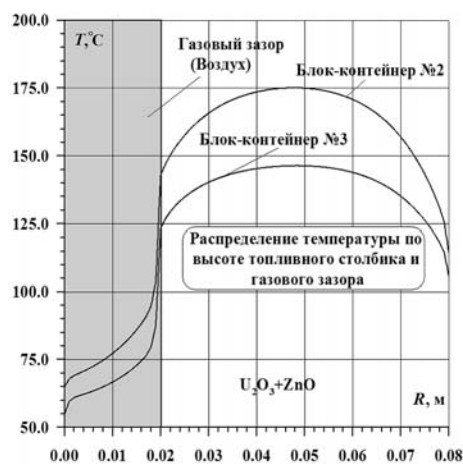


Рис. 7. Распределение температур по высоте топлива и газового зазора для второго и третьего БК (см. рис. 2, сечение А–А)

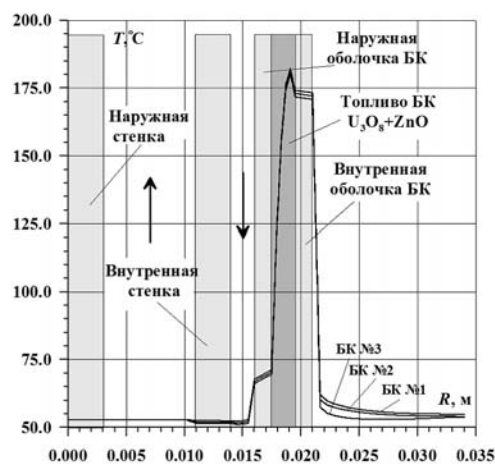


Рис. 8. Распределение температуры по поперечному сечению ЭК с первыми тремя блок-контейнерами на мощности 15 МВт

На рисунке 7 показано продольное распределение температуры вдоль стенки блок-контейнера. Рисунок представляет геометрическое место точек расположения сечения А–А в блок-контейнере, для которого строилось распределение температур (см. рис. 2). Из рисунка хорошо видно, что в области топливной засыпки распределение температур соответствует классическому закону косинуса.

Отметим, что максимальные температуры по оси, проведенной через середину топливной засыпки (см. рис. 7), не совпадают по абсолютной величине с максимумом температуры, приведенной на рис. 6. Это объясняется смещением положения максимума

энерговыведения относительно центра. Радиальное смещение центра максимума температуры указывает на то, что процессы теплопереноса через наружную стенку значительно превосходят по интенсивности процессы переноса через внутреннюю стенку во внутреннюю полость.

РАСЧЕТЫ ТЕМПЕРАТУР С УВЕЛИЧЕННОЙ ЗАГРУЗКОЙ

По классификации, приведенной в табл. 2, этот случай соответствует варианту В2. Принципиальное различие между В1 и В2 – увеличенная на 5 мм величина топливного столба (и как следствие, увеличение общей длины блок-контейнера) при сохранении всех остальных геометрических характеристик блок-контейнера неизменными. Результаты расчетов для тех же уровней мощности реакторной установки, что и в предыдущем случае, показаны в табл.4.

Таблица 4

Расчетные величины при различных режимах работы РУ (В2)

W, МВт	T_{α} , °С	T_{β} , °С	T_{γ} , °С	$T_{вх}$, °С	$T_{вых}$, °С	$T_{г}^{max}$, °С	$\Delta P_{вх}^{вых}$, Па
1	59,36	51,21	58,68	50,0	50,16	55,45	68882
5	96,79	56,08	93,37	50,0	50,81	75,41	66248
10	143,52	62,52	136,74	50,0	51,63	104,14	66395
12,5	166,71	63,61	151,73	50,0	52,06	112,97	67327
15	190,3	68,21	181,15	50,0	52,42	121,91	67422

Анализируя табличные данные, можно сделать вывод о том, что максимальная температура

– топлива ≈ 190 °С;

– внутренней стенки полости блок-контейнера ≈ 181 °С, что указывает на невозможность расплавления внутренней стенки и одновременно на наличие локального подкипания теплоносителя ($P_s = 0,145$ МПа, $T_s = 110,3$ °С);

– в газовом зазоре (в точках непосредственного контакта воздуха и газов, выделившихся за счет ядерных реакций в топливной засыпке) ≈ 121 °С, что приводит к повышению давления в газовой полости со 101,325 до 135,889 кПа ($\approx 1,34$ атм). Отметим, что повышение давления не может привести к разрыву сварных швов, герметизирующих топливную загрузку (расчет выполнен в соответствии с ГОСТ 14806-80 «Стыковые и угловые соединения»).

Сравнивая табл. 3 и 4, можно сделать следующие выводы:

– увеличение загрузки приводит к повышению максимальной температуры топлива на 9,2 °С;

– максимальная температура внешней стенки блок-контейнера увеличивается на 1,5 °С, что практически не влияет на температуру теплоносителя;

– максимальная температура стенки внутренней полости увеличивается на 9,3 °С, т.е. практически на такое же значение, как и температура топлива;

– в случае В2 наблюдается снижение перепада давления между входом и выходом ЭК, что объясняется ростом температуры и, как следствие, падением плотности теплоносителя.

В построении графиков распределения температур для этого случая нет необходимости, поскольку они отличаются от графиков В1 только абсолютными значениями параметров, величины которых приведены в табл. 4.

РАСЧЕТЫ С МАКСИМАЛЬНЫМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕМ СО СТАНДАРТНОЙ И УВЕЛИЧЕННОЙ ЗАГРУЗКОЙ БЛОК-КОНТЕЙНЕРА

Расчет проведен для варианта, когда энерговыделение во всех блок-контейнерах одинаковое и равно максимальному значению. Такой случай является гипотетическим, зато он дает оценку «сверху» для основных теплофизических параметров: температур стенок блок-контейнеров, температур в топливной загрузке и температур на выходе из ЭК.

Полученные в результате расчета данные для стандартной загрузки приведены в табл. 5, а с увеличенной загрузкой – в табл. 6.

Таблица 5

Результаты расчета на мощности 15 МВт (стандартная загрузка)

W, МВт	T _α , °С	T _β , °С	T _γ , °С	T _{вх} , °С	T _{вых} , °С	T _{г3} ^{max} , °С	ΔP _{вх} ^{вых} , Па
15	182,47	68,07	173,26	50	52,81	128,64	72241

Таблица 6

Результаты расчета на мощности 15 МВт (увеличенная загрузка)

W, МВт	T _α , °С	T _β , °С	T _γ , °С	T _{вх} , °С	T _{вых} , °С	T _{г3} ^{max} , °С	ΔP _{вх} ^{вых} , Па
15	193,65	69,14	185,31	50	53,5	129,47	66158

Графики распределения основных теплофизических параметров аналогичны графику на рис. 6 и отличаются от него только числовыми значениями рассчитываемых величин.

Из таблиц следует, что при увеличении загрузки топлива, как и следовало ожидать, растет абсолютное значение максимальной температуры. Оно составляет ≈ 194 °С. Абсолютные значения всех остальных температур возрастают незначительно. Максимальная температура подогрева в ЭК составляет ≈ 3,5 °С.

Анализ таблиц 5 и 6 позволяет сделать следующие выводы:

- максимальные температуры топлива во всех блок-контейнерах одинаковы и составляют ≈ 183 °С (случай В1) и ≈ 194 °С (случай В2);
- во внутренней полости всех четырех блок-контейнеров температура достигает ≈ 173 °С (случай В1) и ≈ 185 °С (случай В2), что указывает на наличие пузырькового кипения;
- максимальная температура в газовом зазоре также значительно подрастает и достигает ≈ 129 °С (случай В1) и ≈ 129,5 °С (случай В2); в то же время эти величины не являются предельными и вызывают сравнительно небольшой рост давления в газовом зазоре.

Отметим, что в качестве оценки «снизу» могут использоваться данные расчетов, приведенные в табл. 3 и 4 для уровня мощности 1 МВт.

РАСЧЕТ ТРАКТА ЦИРКУЛЯЦИИ КОНТУРА ОХЛАЖДЕНИЯ ЭК

Расчет гидродинамических параметров тракта циркуляции проводился с помощью уравнения Д. Бернулли. В наиболее общем случае перепад давления на участке трубопровода, имеющего различные местные сопротивления и разные нивелирные отметки, определялся как

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left[\sum_i^N \zeta_i V_i^2 + \sum_k^M \lambda_k \frac{l_k}{d_{гk}} V_k^2 + \right] + \rho g \sum_k^L (z_k - z_{k-1}),$$

где z_k и z_{k-1} – нивелирные высоты для первого и второго сечений; V_1 и V_2 – среднерасходные скорости в первом и втором сечениях соответственно; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; ζ – коэффициент местного сопротив-

ления; d_{Γ} – гидравлический диаметр; l – длина рассматриваемого участка; λ – коэффициент сопротивления трения.

Минимальная мощность насоса на прокачку рабочего тела вычислялась по формуле

$$N = Q\Delta p,$$

где Δp – общий перепад давления на рассматриваемом участке, Па; Q – объемный расход, м³/с.

При проведении расчетов учитывалось следующее

- все варианты использовали диапазон рабочих температур 40 – 70 °С;
- давление на напоре питательного насоса задавалось в соответствии с паспортными данными и равнялось 2 атм;
- внутренний диаметр трубопровода принимался равным $25,0 \cdot 10^{-3}$ м;
- расход охлаждающей воды составлял $Q = 3$ м³/ч;

Расчет системы охлаждения проводился для двух различных вариантов включения экспериментальных каналов: последовательного и параллельного. Перепад низовых высот на экспериментальных каналах не учитывался вследствие его малости ($\approx 7 \cdot 10^{-2}$ м). Результаты расчета показали, что более предпочтительным оказался случай с параллельным включением ЭК, вызывающим потери давления в районе рабочей точки (≈ 60 °С) 1,67 атм. При последовательном включении ЭК потери давления составили 1,86 атм. Отметим, что в обоих случаях обеспечивается запас на прокачку: при последовательном включении каналов он составляет 7%; при параллельном – 16,5 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Циркуляционная петля с экспериментальными каналами ЭК 4-1 и ЭК 8-1, оснащенная циркуляционными насосами, обеспечивающими напор ≈ 2 атм и расход теплоносителя 3 м³/ч, не требует модернизации для организации нормального отвода тепла от облучаемых блок-контейнеров при всех уровнях мощности реактора (до 15 МВт).

ЭК 4-1 и ЭК 8-1 могут подключаться параллельно или последовательно без достижения предельных температур теплоносителя и блок-контейнеров.

Подогрев теплоносителя в циркуляционной петле для случаев последовательно или параллельно установленных экспериментальных каналов (из четырех блок-контейнеров) составляет ≈ 4 °С.

Максимальные температуры стенок блок-контейнеров со стороны основного потока и со стороны застойной зоны значительно различаются. В наиболее нагруженных блок-контейнерах (третий снизу из четырех) максимальная температура стенки со стороны основного потока не превышает 70 °С, а со стороны застойной зоны превышает температуру насыщения воды, где возможно подкипание теплоносителя.

Давление в газовой полости наиболее нагруженного блок-контейнера не превышает $\approx 1,5$ атм, что ниже допустимого.

Необходимы специальные исследования на реакторе ВВР-ц при различных уровнях мощности по установлению влияния подкипания на поведение реактивности реактора.

Литература

1. Описание программного кода ANSYS. Интернет-ресурс <http://www.ansys.com>
2. Лойцанский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 6 изд., -1987. -840 с.
3. Forrest B.B., Booth T.E. et al. «MCNP – A General Monte-Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Overview and Theory, Volume I», LA-UR-03-1987, LANL (2003).
4. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим

расчетам в ядерной энергетике. / Под ред. П.Л. Кириллова. – М.: Издат. – Т.1, -2010, - 770 с.
5. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: МЭИ, -2003, - 548 с.

Поступила в редакцию 14.05.2014 г.

Авторы

Кочнов Олег Юрьевич, главный инженер, доктор техн. наук
E-mail: kochnov2000@mail.ru

Левченко Юрий Данилович, ведущий научный сотрудник, доктор техн. наук
E-mail: levchenko@ippe.ru

Чусов Игорь Александрович, зав. каф. «Теплофизика», доктор техн. наук
E-mail: igrch@mail.ru

УДК 621.039

THERMOHYDRAULIC JUSTIFICATION FOR THE INSTALLATION OF BLOCK-CONTAINERS WITH URANIUM-BEARING MATERIAL INTO EXPERIMENTAL CHANNEL OF WWR-C REACTOR

Kochnov O.Yu. *, Levchenko Yu.D. **, Chusov I.A. ***

* Obninsk Branch of State Scientific Center of the Russian Federation – Scientific-Research Institute of Physical Chemistry. 109-th km, Kiev highway, Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

** State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. 1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

*** Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Nuclear Research University «MEPhI». 1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

This paper presents the feasibility of block-containers with uranium-bearing fissionable material being installed into the experimental channels of the WWR-c reactor. Two versions of the block-container structure were examined, namely, those with regular and enhanced loading of the fissionable material. The arrangement of the cooling system for the experimental channels of the nuclear reactor was examined in detail, including the geometry of bench marks disposition where the basic equipment is located. Design-basis justification was performed using the ANSYS CFX 10.0 code. Design-basis justification for the cooling loop of the experimental channel was performed based on the solution of the Bernoulli equation. The following is shown: 1) the circulation loop with two experimental channels equipped with circulation pumps ensuring the head of ≈ 2 atm and the coolant flow of $3 \text{ m}^3/\text{h}$ does not require modernization for standard heat removal from irradiated block-containers at all reactor power levels (up to 15 MW); 2) the coolant heating in the cooling loop for experimental channels placed in series or in parallel (consisting of 4 block-containers) amounts to ≈ 4 °C; 3) the maximum temperature of the block-container walls significantly varies on the side of the main flow and on the side of the stagnant zone. In the most loaded block-containers (the third-from-the-bottom of four) the maximum temperature of the wall on the side of the main flow is no more than 70 °C, and on the side of the stagnant zone the wall temperature exceeds saturated water temperature where coolant sub-boiling is possible; 4) the pressure inside the gas cavity of the most loaded block-container

does not exceed ≈ 1.5 atm which is the subtolerance value. It can be concluded that practically at all reactor power levels (up to and including 15 MW) bubble boiling occurs in the inner cavity of the block-container and has a beneficial effect on the heat transfer in general. The key results of the present paper are as follows: 1) the cooling loop of the experimental channels does not require modernization; 2) three or four block-containers can be installed into the reactor without affecting the safe operation of the nuclear facility.

Key words: experimental reactor, WWR-c, experimental irradiation channel, experimental testbed, thermohydraulic characteristics of experimental channel.

REFERENCES

1. ANSYS. Available at <http://www.ansys.com>
2. Lojcanskiy L.G. *Mehanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of Fluid and Gas] 6-nd edition. Moscow, Nauka Publ., 1987, 840 p. (in Russian)
3. Forrest B.B., Booth T.E. et al. «MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Overview and Theory, Volume I», LA-UR-03-1987, LANL (2003).
4. Kirillov P.L., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Jur'ev Ju.S., *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam v yadernoj energetike* [Thermal-hydraulic Calculations in Nuclear Power. Handbook]. Moscow, Izdat Publ., 2010, v. 1, 770 p. (in Russian).
5. Petuhov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A., Solov'ev S.L. *Teploobmen v yadernyh energeticheskikh ustanovkakh* [Heat Transfer in Nuclear Power Plants]. Moscow, MEI Publ., 2003, 548 p. (in Russian).

Authors

Kochnov Oleg Yu'evich, Chief Engineer, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: kochnov2000@mail.ru

Levchenko Yuriy Danilovich, Leading Researcher, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: levchenko@ippe.ru

Chusov Igor' Aleksandrovich, Head of Thermal Physics Department, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: igrch@mail.ru