

температурой гелия перед турбиной. Режимы с изменением массы протекают с максимальным изменением давления в гелиевом контуре, что приводит к циклическим нагрузкам на теплопередающие поверхности в теплообменниках, на подшипники и уплотнения турбомашин, а также к изменению давления в полости генератора.

В транспортных ядерных установках, для которых на первый план выходит обеспечение требуемой маневренности, возникает проблема быстрого набора полезной мощности. Быстрый переход к режиму большей мощности закрытием перепускного клапана может осуществляться при условии работы на исходном режиме с частично открытым перепуском. При этом необходимо учитывать ограничение увеличения нейтронной мощности реактора.

Отметим, что при управлении многовальтной турбомашинной проблемной является защита от разгона турбины с генератором в случае аварийной потери нагрузки на генераторе. Как показали расчетные оценки [5], внезапная потеря нагрузки со срабатыванием защитных систем приводит к разгону турбокомпрессора до недопускаемой частоты в отличие от одновального варианта. Кроме того, в многовальных установках в турбине низкого давления быстро достигаются помпажные режимы.

**Заключение.** Данные о статических параметрах в требуемом диапазоне изменения мощ-

ности при разных способах управления позволяют получить информацию для формирования требований к оборудованию и системам реакторной установки и разработки алгоритмов прохождения режимов.

Высокие к.п.д. на 100%-ной и частичных нагрузках в совокупности с высокими технико-экономическими показателями и повышенной безопасностью определяют перспективность создания ВТГР с газотурбинным циклом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганин М.Е., Головкин В.Ф., Кодочигов Н.Г. Транспортные ЯЭУ с открытым и замкнутым газотурбинным циклом. — Атомная энергия, 2018, т. 124, вып. 5, с. 246—254.
2. Kiryushin A.I., Kodochigov N.G., Kuzavkov N.G. e.a. Project of the GT-MHR high-temperature helium reactor with gas turbine. — Nucl. Engng Design, 1997, v. 173, p. 119—129.
3. Кодочигов Н.Г., Головкин В.Ф., Дмитриева И.В. Статистический анализ параметров реакторной установки с прямым замкнутым газотурбинным циклом. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып. 1, с. 65—76.
4. Манушин Э.А., Бекнев В.С., Осипов М.И., Суровцев И.Г. Ядерные газотурбинные и комбинированные установки. М.: Энергоатомиздат, 1993.
5. Кодочигов Н.Г., Головкин В.Ф., Ганин М.Е. Выбор конструктивной схемы турбомашин замкнутого газотурбинного цикла АЭС с высокотемпературным газохладаемым реактором. — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 2, с. 88—94.

Поступила в Редакцию 22.08.18

УДК 621.039.519

#### МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖПЕТЛЕВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ВО ВНУТРИРЕАКТОРНОМ НАПОРНОМ ТРАКТЕ ВВЭР-1000

*Крапивцев В.Г., Солонин В.И. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)*

Постоянно растущие требования к безопасности АЭС определяют высокую степень актуальности исследований межпетлевого перемешивания теплоносителя во внутриреакторных трактах в области от входных патрубков до входа потока в активную зону. Исследования позволяют уточнить распределение температуры в ТВС, петлях, особенно в режимах работы реакторной установки с несимметричной нагрузкой или с неодинаковыми характеристиками петель. Они используются для расчета концентрации

бора в активной зоне, петлях при несимметричной подаче в первый контур [1].

Исследования [2—5] малочисленны, что требует дополнительных экспериментальных исследований. Такие исследования проводятся в объеме пусконаладочных работ и теплогидравлических испытаний блоков, а также с использованием маломасштабных моделей внутриреакторного тракта, в которых можно получить значительный объем информации. В настоящей статье приводятся экспериментальные результа-

ты таких модельных исследований, выполненных на маломасштабной модели напорного тракта ВВЭР-1000 [6].

Для экспериментального исследования используется метод «тепловой метки», создаваемой в потоке вводом в одну из петель модели подогретой воды. Температура в нижней части шахты модели реактора позволяет судить о степени смешения подогретого потока и истекающих из соседних петель неподогретых потоков. Подобные модельные исследования используются для обоснования теплогидравлической надежности ВВЭР [3].

**Обоснование метода экспериментального исследования.** Поток во внутриреакторном напорном тракте перемешивается при опускном течении от входных патрубков до коллектора днища шахты, в объеме коллектора и истекающих из перфорированного днища шахты струях. Число Рейнольдса и гидродинамика течения в этих областях определяют турбулентный характер потоков, при котором перенос количества движения, теплоты, концентрации примеси зависит от коэффициентов турбулентной вязкости, теплопроводности, диффузии.

Уравнение переноса теплоты в трехмерном потоке напорной камеры можно описать уравнением баланса в виде [7]

$$W_x \frac{\partial t}{\partial x} + W_r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{W_\phi}{r} \frac{\partial t}{\partial \phi} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r(\alpha + \alpha_t) \frac{\partial t}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[ (\alpha + \alpha_r) \frac{\partial t}{\partial \phi} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial t}{\partial x} \right], \quad (1)$$

где  $t$  — температура;  $W_x, W_r, W_\phi$  — проекция средней скорости турбулентного течения на ось  $x, r, \phi$ ;  $\alpha, \alpha_t$  — коэффициент молекулярной и турбулентной температуропроводности соответственно.

Подобие теплопереноса в реакторе и модели достигается при соблюдении условий геометрического, динамического, теплового подобия [6]. Для подобия теплопереноса необходимо равенство определяемых уравнением (1) критериев Пекле. Вследствие определяющей роли турбулентного переноса теплоты в модели и натуре критерии Пекле должны быть равны —

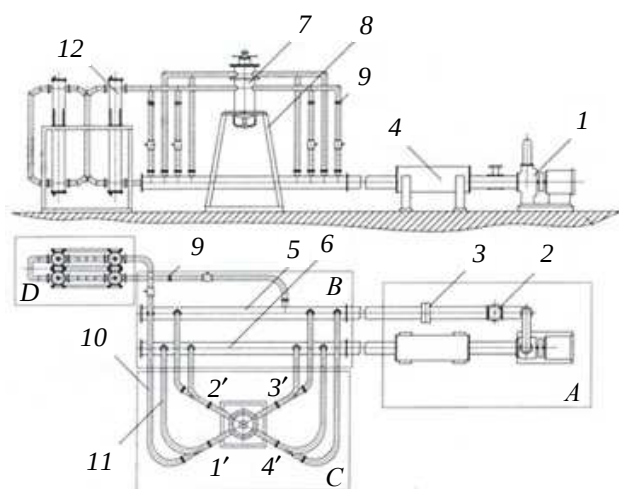
$$Pe_t = WL/\alpha_t = Re_t Pr_t,$$

где  $Re_t = WL/v_t$  и  $Pr_t = v_t/\alpha_t$  — турбулентное число Рейнольдса и Прандтля соответственно. Это равенство обеспечивается в модели напорного тракта, поскольку масштаб турбулентности  $l$  пропорционален размеру области течения, характерная пульсационная скорость — пространственным производным от средней скорости потока  $|\partial W_i/\partial x_j|$ , что соблюдается для чисел Рейнольдса потока — в модели  $3 \cdot 10^5$ , в натуре  $10^7$  [7]. Следовательно  $v_t = Cl^2 |\partial W_i/\partial x_j| \sim WL$ ,  $Re_t$  в натуре и модели одинаковы. Согласно исследованиям переноса теплоты и вещества [7, 8] турбулентные числа Прандтля и Шмидта близки и изменяются в турбулентных пограничных слоях и струйных зонах течения в пределах 0,5—0,7, что наблюдается и в напорном тракте. Подобие граничного распределения температурной метки обеспечивается выполнением условия равномерного распределения температуры по сечению потока в петле.

Следовательно, результаты экспериментов с использованием температурной метки применимы для анализа перемешивания (температурной, концентрационной неоднородности) в напорном тракте ВВЭР-1000.

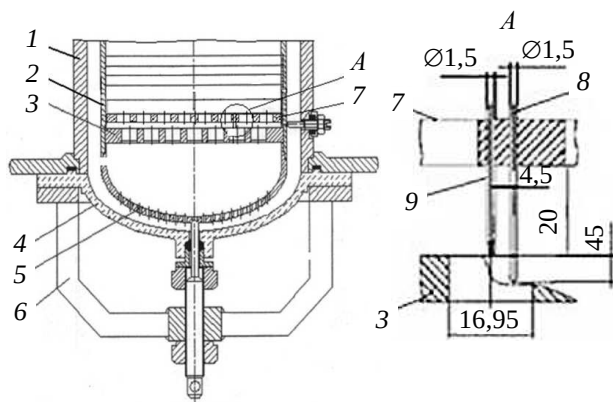
**Гидравлический стенд.** Эксперименты проводили на стенде для исследования гидродинамических процессов в напорном тракте реактора ВВЭР-1000, включающем модель напорного тракта в масштабе 1:17. Гидравлический стенд состоит из следующих функциональных блоков (рис. 1):  $A$  — блок формирования и подачи в контур стенда заданного расхода модельного теплоносителя,  $B$  — блок раздачи потока по входным патрубкам модели и сбора потоков теплоносителя на выходе из патрубков,  $C$  — блок модели реактора,  $D$  — блок нагревательных батарей.

Блок нагревательных батарей состоит из четырех последовательно соединенных трубопроводами цилиндрических емкостей объемом  $0,085 \text{ м}^3$  с электронагревательными элементами мощностью 5,2 кВт и предназначен для нагрева воды до 60—80 °С и ее ввода в первый напорный патрубок модели. Температура воды в каждой батарее контролируется термпарой, установленной в верхней части нагреваемого объема.

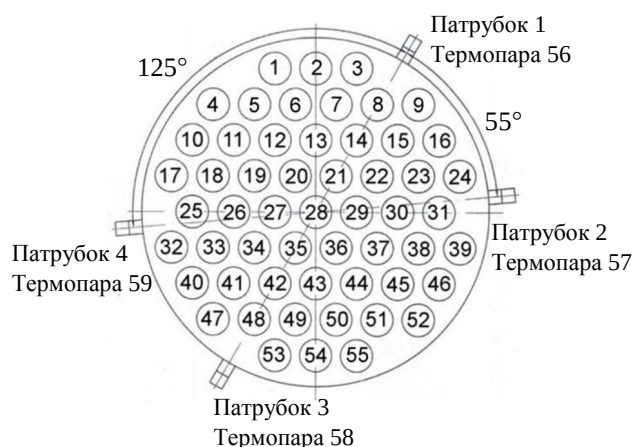


Р и с. 1. Гидравлическая схема стенда: 1 — насос; 2 — теплообменник-охладитель, шаровая задвижка; 3 — опорная рама, расходомер; 4 — модель для исследования межпетлевого перемешивания; 5 — нагревательная батарея; 6 — измерители расхода в подводящих патрубках; 7, 8 — подводящие и отводящие магистрали  $D_y$  50; 9, 10 — напорный и сборный коллектор  $D_y$  120 каждый; 11 — расходомер; 12 — шаровая задвижка; 1', 2', 3', 4' — нумерация напорных патрубков модели

**Модель напорного коллектора.** Для исследования распределения температурной метки на выходе из днища шахты в модели установлена измерительная решетка 7, позволяющая определить температуру потока на оси отверстий опорной решетки 3 (рис. 2). Для этого на измерительной решетке в координатах осей 55 отверстий опорной решетки закреплены термопары. Нумерация и расположение термопар относительно патрубков модели показаны на рис. 3, общий вид шахты модели реактора, измерительной решетки с закрепленными на ней термопарами и трассировки средств измерения — на рис. 4.



Р и с. 2. Измерительная решетка: 1 — корпус; 2 — шахта; 3, 7 — опорная и измерительная решетка соответственно; 4, 5 — днище корпуса и шахты соответственно; 6 — опора; 8, 9 — зонд статического и полного давления соответственно



Р и с. 3. Схема расположения термопар

**Методика измерения температуры потока.** Температуру за днищем шахты и в патрубках подвода измеряли с помощью хромель-алюмелевых термопар  $k$ -типа с линейной характеристикой в рабочем интервале. Термоэлектродвижущая сила преобразователей составляла  $4,12 \text{ мВ}/100^\circ\text{C} \pm 1\%$ , постоянная времени  $0,2 \text{ с}$ . Инерционные характеристики термопар позволили оценить динамику температурной метки, зафиксировать низкочастотные пульсации температуры, отражающие турбулентное смешение разнотемпературных потоков. Температуру и скорость потока измеряли в переходном процессе, начиная от переключения подачи холодной воды температурой  $\sim 20^\circ\text{C}$ , поступающей в патрубок 1, на подогретую воду температурой  $70\text{--}80^\circ\text{C}$  до исчерпания запаса последней в объеме блока нагревательных батарей.

В экспериментах измеряли расход в напорных патрубках модели на мерных участках с установленными стандартными дроссельными шайбами, расположенными в подводящих трактах. Шайбы тарированы с использованием турбинного расходомера ТДР 14-5-3 с паспортной зависимостью. Перепад давления на дроссель-



Р и с. 4. Монтаж измерительной решетки с термопарами и зондами давления в шахте модели напорного тракта ВВЭР-1000

ных шайбах измеряли датчиками «Сапфир-22МП» модели 2440. Погрешность измерения расхода  $\pm 3\%$ .

Общий расход воды в контуре стенда определяли ультразвуковым расходомером АКРОН-01 с погрешностью  $\pm 2,5\%$ . Сигналы, поступающие от термодатчиков, регистрировались и обрабатывались в информационно-измерительной системе, построенной на базе персонального компьютера и многоканальной платы сбора данных DAQ PCI-6071E (США). Информация отображалась на дисплее для оперативного контроля за процессом, а также сохранялась в формате электронных таблиц.

**Измерение температуры в модели.** Пример характера изменения температуры в патрубках модели и в области опорной решетки модели показан на рис. 5. Температура в патрубке 1 (термопара 56) на 4-й с переходного процесса достигает  $\sim 76 \pm 3^\circ\text{C}$  и находится в этих пределах до 28-й с. Незначительное изменение температуры в этом интервале отражает неодинаковость подогрева воды в последовательно соединенных нагревательных батареях. Температура в патрубке 3 (термопара 58) до 14-й с остается постоянной  $18,5^\circ\text{C}$ , затем увеличивается до  $38^\circ\text{C}$  на 46-й с переходного процесса, что связано с поступлением в напорный коллектор смеси холодной и подогретой воды, прошедшей через контур гидравлического стенда. Показания термодатчика 53, расположенной вблизи патрубка 3, совпадают с показаниями термодатчика 58, что свидетельствует об отсутствии влияния тепловой метки на эту область потока за днищем шахты.

Температура в отверстиях опорной решетки, расположенных в окрестности патрубка 1,

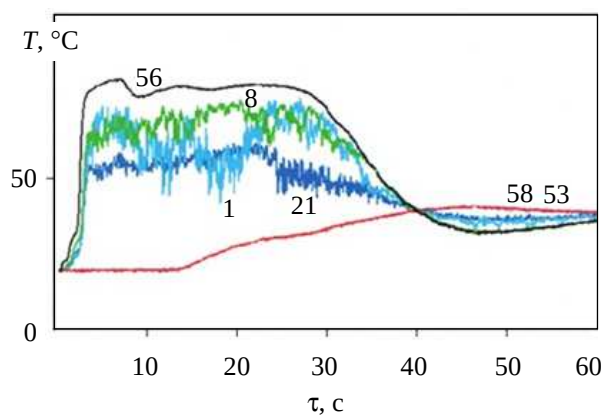


Рис. 5. Изменение температуры в патрубке 1, 8, 21, 53, 56, 58 и в области опорной решетки модели

достигает квазистационарных значений на 4-й с переходного процесса. Наибольшую температуру фиксирует термодатчик 8, наименьшую — 21. Сигналы термодатчиков содержат пульсационную составляющую с частотой до  $\sim 5$  Гц и амплитудой 5—10% средней, что свидетельствует о незавершенности перемешивания разнотемпературных потоков. Показания температуры в разные периоды переходного процесса не остаются одинаковыми. После начала поступления во 2-й, 3-й, 4-й патрубки подогретой воды из напорного коллектора температура за днищем шахты увеличивается. Снижение температуры воды в патрубке 1 приводит к ее уменьшению, фиксируемому термодатчиками 1, 8, 21.

Изменение температуры в экспериментах показывает, что в области опорной решетки модели через  $\sim 6$  с создается квазистационарное распределение температуры. При этом в патрубок 1 поступает вода температурой  $70\text{--}80^\circ\text{C}$ , превышающей на  $45\text{--}55^\circ\text{C}$  температуру основного потока в контуре стенда. Для обобщения результатов измерений выбран период времени эксперимента 6—24 с, когда температура воды в контурах повышается не более чем на  $10^\circ\text{C}$  исходной.

Результаты измерения температуры представлялись в виде изотерм, для построения которых выбиралась максимальная и минимальная температура потока в патрубках, определялись их разность  $\Delta T$  и интервал между изотермами  $\Delta T(k-1)$ , где  $k$  — число изотерм. К изотерме  $T_i$  принадлежали измерения, удовлетворяющие условиям

$$T_i = T_{i-1} + \Delta T / (k - 1); \quad T_i \in T_i \pm \Delta T / (k - 1).$$

Результаты определения  $T_i$  в последовательные моменты времени усредняли. При этом переменными усреднения являлись интервал  $\Delta T$  и изменяющаяся температура в патрубках.

**Программа исследований.** Целью экспериментальных исследований являлось получение данных о распределении температурной метки за днищем шахты при разном расходе воды в патрубках. Режимы с нулевым расходом через отдельные патрубки воспроизводят отключение циркуляции в петле реакторной установки ВВЭР без учета обратного потока в ней. Режимы расхода воды в патрубках модели для реализованной программы экспериментов приведены в таблице. Во всех измерениях расход

## Режимы измерения температуры в модели

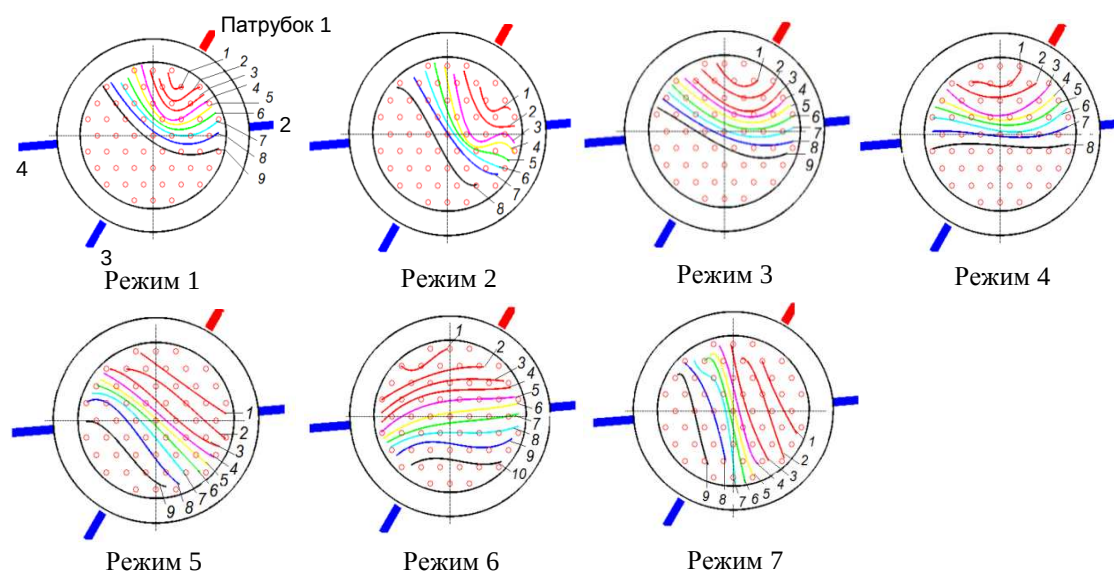
| Режим | Соотношение расхода по напорным патрубкам 1—2—3—4 | Суммарный объемный расход в контуре, м <sup>3</sup> /ч | Объемный расход в патрубках, м <sup>3</sup> /ч |       |       |       |
|-------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|       |                                                   |                                                        | $G_1$                                          | $G_2$ | $G_3$ | $G_4$ |
| 1     | 1—1—1—1*                                          | 100                                                    | 25                                             | 25    | 25    | 25    |
| 2     | 1—0—1—1                                           | 73                                                     | 24,3                                           | 0     | 24,3  | 24,3  |
| 3     | 1—1—0—1                                           | 73                                                     | 24,3                                           | 24,3  | 0     | 24,3  |
| 4     | 1—1—1—0                                           | 75                                                     | 25                                             | 25    | 25    | 0     |
| 5     | 1—0—1—0                                           | 50                                                     | 25                                             | 0     | 25    | 0     |
| 6     | 1—1—0—0                                           | 49                                                     | 24,5                                           | 24,5  | 0     | 0     |
| 7     | 1—0—0—1                                           | 49                                                     | 24,8                                           | 0     | 0     | 24,3  |
| 8     | 1—0—0—0                                           | 25                                                     | 25                                             | 0     | 0     | 0     |
| 9     | 1—0,5—0,5—0,5                                     | 63,8                                                   | 24,6                                           | 13,1  | 12,8  | 13    |
| 10    | 1—0,5—0,5—1                                       | 74,3                                                   | 24,2                                           | 12,7  | 12,9  | 25,4  |
| 11    | 1—0,5—1—0,5                                       | 73,8                                                   | 25                                             | 12,8  | 25,7  | 12,9  |
| 12    | 1—1—0,5—0,5                                       | 75,6                                                   | 24,4                                           | 25,6  | 12,6  | 12,8  |
| 13    | 1—1—1—0,5                                         | 87,5                                                   | 24,6                                           | 25,7  | 25    | 13,5  |

\*1, 0,5, 0 — полный, половинный расход, отсутствие расхода соответственно.

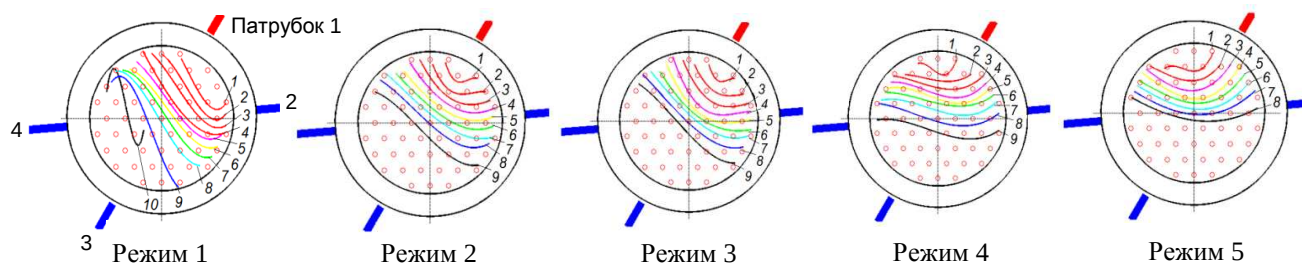
подогретой воды в патрубке 1 сохранялся на уровне 24,3—25 м<sup>3</sup>/ч, в других 2, 3, 4 был близок к расходу в патрубке 1, в 2 раза ниже или патрубков был отключен от напорного коллектора. Исследовано температурное распределение при отключении одного любого (режим 2, 3, 4) и двух (встречных или смежных) патрубков (режимы 5, 6, 7). Для условий со сниженным расходом в петлях температурное распределение получено при уменьшении расхода в

трех (режим 8), двух (режимы 9, 10, 11) или одном патрубке (режим 12).

**Результаты измерений.** Положение изотерм в области опорной решетки в разных условиях подачи холодной воды через патрубки 2, 3, 4 показано на рис. 6 для равномерного распределения расхода воды и полного отключения воды через один или два патрубка, на рис. 7 — для снижения расхода воды в трех, двух или одном патрубке.



Р и с. 6. Распределение изотерм с интервалом между ними 5 °С в потоке теплоносителя за днищем шахты для режимов с отключением циркуляции в одном или двух подводящих патрубках: режим 1—7 — максимальная температура 69,21, 70,8, 68,32, 69,41, 67,48, 72,57, 67,96 °С, минимальная — 29,21, 35,8, 28,32, 34,91, 27,48, 27,57, 27,96 °С соответственно



Р и с. 7. То же, что на рис. 6, для режимов с уменьшенным расходом в подводящих патрубках: режим 1—7 — максимальная температура 69,21, 70,8, 68,32, 69,41, 67,48, 72,57, 67,96 °С, минимальная — 29,21, 35,8, 28,32, 34,91, 27,48, 27,57, 27,96 °С соответственно

Изотермы, соответствующие равномерному распределению расхода воды через патрубки модели (см. рис. 6, режим 1), примерно симметричны направлению от первого патрубка к третьему. При отключении второго, третьего и четвертого патрубков (режим 2, 3, 4) линии симметрии изотерм смещаются в сторону отключаемого патрубка, особенно если он расположен рядом с патрубком 1. При равном расходе в патрубках изотермы зоны смешения охватывают 50% площади шахты модели. При одном отключенном патрубке соответствующая площадь увеличивается до 60%.

При отключении двух встречных патрубков (см. рис. 6, режим 5) изотермы симметричны направлению вдоль патрубков с подачей воды (патрубки 1, 3). При отключении рядом расположенных патрубков (режим 6 и 7) изотермы симметричны направлению, смещенному в сторону от первого патрубка к отключаемым. Площадь поперечного сечения шахты модели, охватываемая изотермами, увеличивается при отключении двух патрубков подвода воды до 80%.

Изотермы, приведенные на рис. 7, показывают изменение их положения, отмеченные при рассмотрении изотерм рис. 6. При уменьшении расхода через один патрубок (режим 12) изотермы симметричны направлению, смещенному от патрубка 1 в сторону патрубка 4 с уменьшенным расходом. Аналогичное отмечается для условий уменьшения расхода через два соседних патрубка (режим 9, 11). Для снижения расхода в трех патрубках (режим 8) изотермы симметричны направлению между первым и вторым патрубком. Область поперечного сечения шахты, находящаяся в пределах изотерм, увеличивается по мере снижения расхода через патрубки 2, 3, 4. Для режима 8 этот расход равен 1,5, для режимов 9, 10, 11 — 2, для режима 12 — 2,5 расхода через первый патрубок.

**Анализ результатов измерения температуры.** Петлевые потоки в модели и реакторе перемешиваются при опускном кольцевом течении между корпусом и шахтой, в раздаточном конфузорном коллекторе днища шахты, в струях, истекающих из днища шахты и формирующих течение перед опорной решеткой. В этих трех областях течения перемешивание потоков определяется конвекцией, формирующей тангенциальной неоднородностью распределения скорости в опускном течении и турбулентной теплопроводностью в сформированных потоках.

Изотермы на рис. 6 и 7 подтверждают связь формирования распределения скорости в опускном кольцевом течении при различном расходе в патрубках и температурного распределения за днищем шахты. Для опускного кольцевого течения при одинаковом расходе в патрубках (режим 1), для отключения расхода во втором (режим 4), в третьем и четвертом патрубках (режим 10) область с минимальной скоростью в потоке, истекающем из патрубка 1, на входе в конфузорный коллектор (сечение 4) расположена в угловых координатах 10, 340 и 330° (угол патрубка 1 составляет 0°, 2 — 305°, 4 — 125°). Область с минимальной скоростью в потоке, истекающем из патрубка 1, примерно соответствует положению средней линии (оси) подогретого потока, поступающего из этого патрубка. Сравнение угловых координат оси подогретого потока с расположением линии симметрии изотерм в режимах 1, 2, 7, имеющих аналогичное распределение расхода по патрубкам, показывает их совпадение (см. таблицу). Следовательно, течение в опускном кольцевом тракте, зависящее от режима работы петель, определяет положение изотерм относительно патрубков в течении за днищем шахты.

Ширина области потока, истекающего из патрубка 1, составляет в сечении 4 для режима 1, 4, 10  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  и  $180^\circ$  соответственно. Эти угловые размеры для режимов 1 и 4 меньше занятых изотермами за днищем шахты, которые составляют согласно рис. 6 для режима 1 и 2  $150^\circ$  и  $190^\circ$ , что связано с турбулентным переносом теплоты в области коллектора и струй напорного тракта. При подаче воды через два патрубка в кольцевом опускном тракте формируются две близкие по характеристикам струи, смешение которых и приводит к линиям изотерм, показанным на рис. 6 (режим 7).

Приведенные результаты показывают, что при несимметричной нагрузке или различных характеристиках петель, несимметричной подаче бора в петли за днищем шахты ВВЭР сохраняется неравномерность температуры, состава теплоносителя, равная исходной неравномерности в петлях. Градиенты температуры, состава потока теплоносителя по сечению шахты зависят от числа работающих петель. Они максимальны для близкого расхода в петлях и уменьшаются при отключении одной или двух петель циркуляции теплоносителя.

**Заключение.** Исследования и анализ результатов межпетлевого перемешивания потоков показывают, что:

изотермы за днищем шахты имеют симметрию относительно оси подогретого потока, формируемого в опускном тракте из подогретой воды патрубка подвода;

положение оси подогретого потока относительно патрубка подвода зависит от распределения расхода по трем петлям с неподогретым потоком;

доля сечения за днищем шахты, занятая областью смешения (изотермами), составляет 0,5 для равномерного распределения расхода по патрубкам, 0,6 для отключения одного и 0,9 двух патрубков. При уменьшенном расходе в патрубках указанная доля сечения увеличивается по мере снижения расхода;

тангенциальные размеры области потока из патрубка 1, сформированного в опускном тракте модели, перед раздаточным коллектором шахты

составляют для равномерного распределения расхода по патрубкам  $1/4$  периметра, при отключении одного  $1/3$ , двух патрубков  $1/2$  периметра потока;

тангенциальные размеры области изотерм за днищем шахты модели составляют для равномерного распределения расхода по патрубкам  $150^\circ$ , для отключения одного  $190^\circ$ , двух патрубков  $360^\circ$ . Градиенты температурной неоднородности в потоке за днищем шахты максимальны для равномерного распределения расхода по патрубкам и минимальны при отключении потоков в двух патрубках.

Таким образом, конвективный перенос теплоты (концентрации) в опускном кольцевом тракте и турбулентный (концентрации) в окрестности днища шахты определяют неоднородность распределения температуры, концентрации бора в потоке за днищем шахты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спассков В.П., Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б. и др. Расчетное обоснование теплогидравлических характеристик реактора и РУ ВВЭР. М.: ИЦК «Академкнига», 2004. 390 с.
2. Bezrukov Yu., Dragunov Yu., Logvinov S. Study of coolant mixing in the VVER vessel. — In: Symp. of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety. Drezden, Germany, 22—26 September, 2003, p. 61—73.
3. Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 255 с.
4. Rohde U., Kliem S., Hohnе T. e.a. Fluid mixing and flow distribution in the reactor circuit, measurement data base. — Nucl. Engng Des., 2005, № 235, p. 421—433.
5. Bieder U., Fauchet G., Betin S. e.a. Simulation of mixing effects in a VVER-1000 reactor. — Ibid., 2007, № 237, p. 1718—1727.
6. Крапивцев В.Г. Модельные исследования гидродинамики течения теплоносителя во внутриреакторном напорном тракте ВВЭР-1000. — Атомная энергия, 2017, т. 122, вып. 5, с. 253—258.
7. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели. Новосибирск: Наука, 1986.
8. Исаев С.И., Кожинев И.А., Кофанов В.И. и др. Теория тепломассообмена. Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 343 с.

Поступила в Редакцию 27.06.18