

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЯ ВОДЫ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ МОДЕЛИ РЕАКТОРА

**И.А. Чусов\*, В.А. Саркисов\*, Ю.С. Юрьев\*\*, Д.В. Зайцев\*\*\***

*\* Обнинский государственный технический университет атомной энергетики  
г. Обнинск*

*\*\* ФГУП ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*

*\*\*\* ФГУП ОКБ «Гидропресс», г. Подольск*



В работе на основании трехмерных численных расчетов получено распределение скорости, давления в коллекторе и расходов в рабочих каналах гидравлической модели двухпетлевой реакторной установки. Расчеты проведены как для штатного режима работы, так и для случая снижения подачи одного из питательных насосов, вплоть до полного останова. Показано, что это приводит к значительному перераспределению расходов в каналах. Выполнен анализ интенсивности вихревых зон в нижнем коллекторе и опускном кольцевом канале.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее сложных задач реакторной теплогидравлики является определение значений расходов в рабочих каналах (РК) или в ТВС, объединенных общими коллекторами. Эта задача становится еще более сложной, когда подача теплоносителя осуществляется несколькими главными циркуляционными насосами (ГЦН), подающими в общий раздаточный коллектор различный расход. Ситуация такого типа имеет место в случае снижения расхода через один из ГЦН или в случае полного останова одного или нескольких насосов. Вследствие сложности таких течений применяется комплексный подход для их изучения:

- 1) инженерная оценка значений гидравлических неравномерностей на этапе эскизного проекта [1–3];
- 2) экспериментальное исследование на моделях на стадии технического проекта [3–7];
- 3) итоговые численные расчеты в полной трехмерной постановке для выбранной проточной части реактора [8, 9].

Эти этапы проектных расчетов сопровождаются научными исследованиями с целью обобщения результатов и выработки рекомендаций по оптимальному проектированию проточной части реакторов. В ИАТЭ создана гидродинамическая модель корпусного реактора для исследования этих эффектов.

Настоящая работа посвящена численному моделированию гидродинамических аспектов возникновения проектной аварийной ситуации. Все расчеты были про-

ведены для гидродинамической модели двухпетлевого реактора [10]. Настоящая работа является продолжением тематики расчетно-экспериментального обоснования, влияния различных факторов на неравномерность распределения расходов в каналах реакторных установок [11, 12]. Полученные результаты с использованием методов гидродинамического подобия могут быть перенесены на натурные реакторные установки.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 приведена принципиальная схема модели двухпетлевой реакторной установки. Вода через два напорных патрубка (Вход) поступает в опускной кольцевой канал. Кольцевой канал образован корпусом модели и обечайкой активной зоны. Далее вода попадает в нижний раздаточный коллектор и по имитаторам рабочих каналов (ИРК) поднимается в сборный коллектор. Из сборного коллектора она через отводные патрубки (Выход) направляется в контур циркуляции.

Детальное описание технических характеристик гидродинамического стенда с включенной в его состав гидравлической моделью (ГДМ) двухпетлевой реакторной установки приведено в работе [10].

Задача была сформулирована следующим образом: при заданных значениях расходов рабочего тела по обеим петлям, и заданной постоянной температуре в ГДМ, найти стационарное распределение расходов в ИРК модели РУ. Были рассмотрены ситуации с нарушением нормальных условий эксплуатации: снижением расхода одного из насосов – проектная авария, с несанкционированным остановом

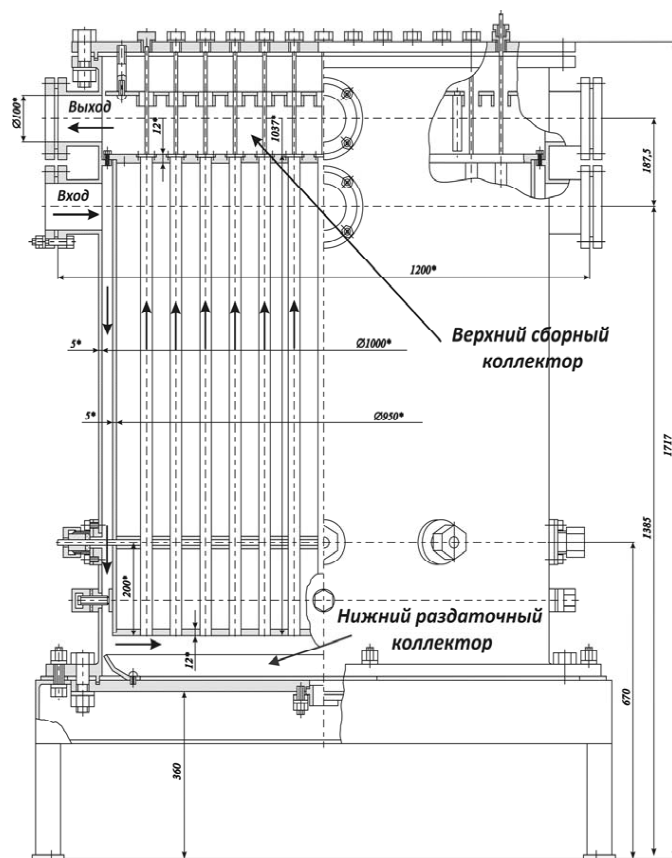


Рис. 1. Принципиальная схема модели реактора

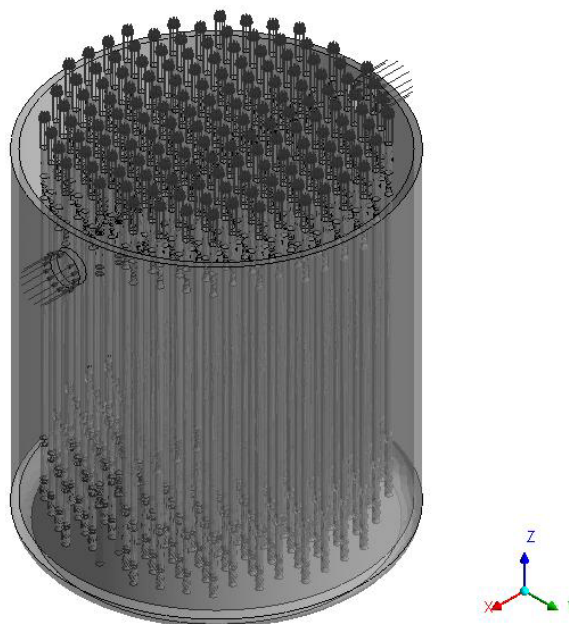


Рис. 2. Общий вид расчетной модели

одного из циркуляционных насосов. Система уравнений, описывающая стационарное течение в кольцевом зазоре, опускном канале, нижнем раздаточном коллекторе и системе параллельных ИРК, включала в себя уравнение неразрывности и количества движения [13, 14]. Для замыкания исходной системы уравнений использовалась  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, со стандартным набором констант [15]. Расчет турбулентных характеристик в областях, примыкающих к стенкам, осуществлялся при помощи пристеночных функций. Связь между кинетической энергией турбулентности, скоростью ее диссипации и турбулентной вязкостью находилась с использованием гипотезы Колмогорова [13, 15].

Общий вид расчетной трехмерной твердотельной векторной модели реакторной установки (без верхней крышки а.з. и верхней крышки корпуса) с плоскостями задания начальных условий, показан на рис. 2. При задании граничных условий полагалось, что на твердых границах три компоненты скорости, кинетическая энергия турбулентности и диссипация энергии равны нулю. Расчеты проводились для пяти значений расхода по левой петле. Значения величин, использовавшихся при проведении вычислений, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Значения величин, использовавшихся при проведении расчетов**

Параметр	Значение
Расход по правой петле, $Q_1$ , м <sup>3</sup> /ч	141,0
Расход по левой петле, $Q_2$ , м <sup>3</sup> /ч	1) 141,0; 2) 105,75; 3) 70,5; 4) 35,25; 5) 0,0
Средняя температура рабочего тела, °C	58
Давление на входе в ГДМ, МПа	0,23
Давление на выходе из ГДМ, МПа	0,1
Средняя расчетная плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	984
Средняя расчетная кинематическая вязкость жидкости, м <sup>2</sup> /с	$4,91 \cdot 10^{-7}$

Расчеты проводились на двухядерном компьютере с тактовой частотой  $\approx 6$  ГГц и объемом оперативной памяти 2 Гб. Время расчета одного варианта составляло  $\approx 48$  ч. Погрешность расчета полей скорости составляла  $10^{-6}$ . Поле давлений рассчитывалось с погрешностью  $10^{-7}$ . Среднее количество расчетных элементов в ГДМ равнялось  $\approx 1,2 \cdot 10^6$ .

Единичным расчетным элементом являлся октаэдр. Для проведения расчетов использовался код CFX 10.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Расчет нормального режима эксплуатации проводился на основании исходных данных приведенных в табл. 1 (вариант 1). На рис. 3а показано распределение скорости рабочего тела в кольцевом зазоре. Хорошо видно, что поток из напорного патрубка движется вдоль обечайки ВКУ и точка столкновения двух потоков от левого и правого напорных патрубков располагается на расстоянии  $1/4$  периметра; другая точка столкновения располагается симметрично (см. рис. 4а). Под каждым напорным патрубком располагается «застойная» зона. Будем обозначать застойную зону под «слабым» патрубком I (патрубок с меньшим расходом), а застойную зону под «сильным» патрубком II (патрубок с большим расходом). В рассматриваемом нами случае оба патрубка дают одинаковый расход, и угол раскрытия обеих застойных зон составляет  $\approx 60^\circ$ . В точке столкновения потоков происходит отрыв пограничного слоя и развернувшийся на  $90^\circ$  поток образует нисходящее движение по обечайке модели активной зоны (аналогично опытам [6]).

Образование вихрей в раздаточном коллекторе, с точки зрения безопасности

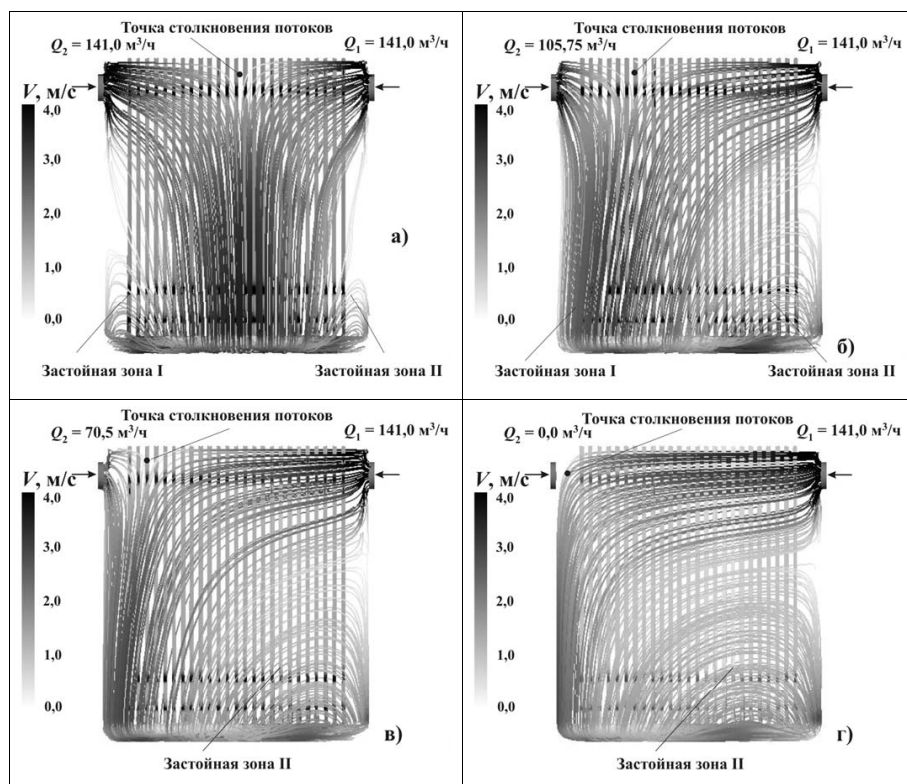


Рис. 3. Картина течения в кольцевом зазоре: а) штатный режим; б) 75% от штатного расхода по левой петле; в) 50% от штатного расхода по левой петле; г) 0% от штатного расхода по левой петле

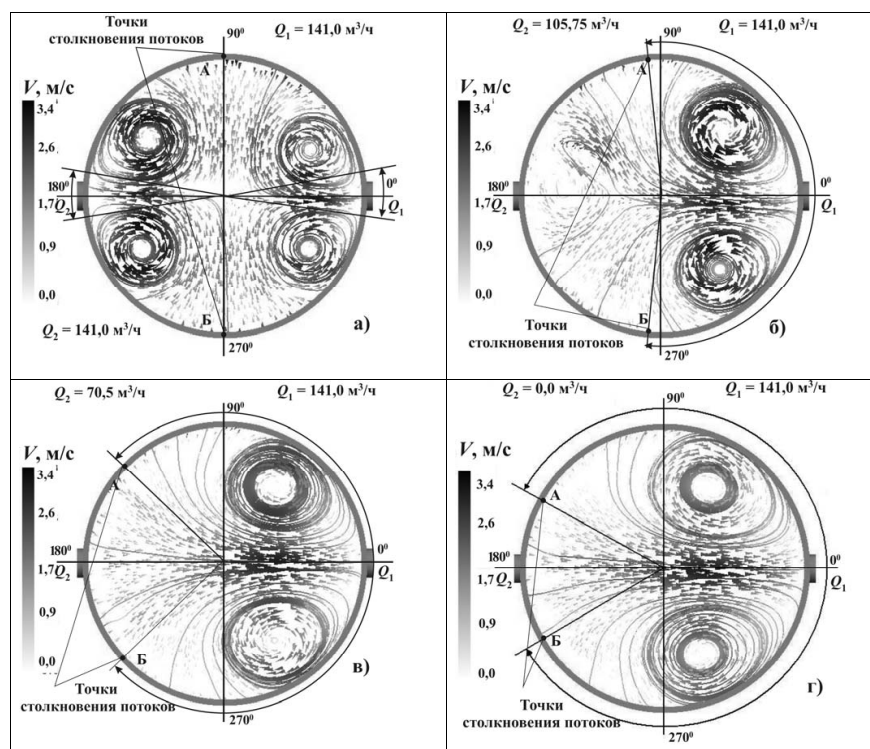


Рис. 4. Парные вихревые области в нижнем раздаточном коллекторе: а) штатный режим; б) 75% от штатного расхода по левой петле; в) 50% от штатного расхода по левой петле; г) 0% от штатного расхода по левой петле

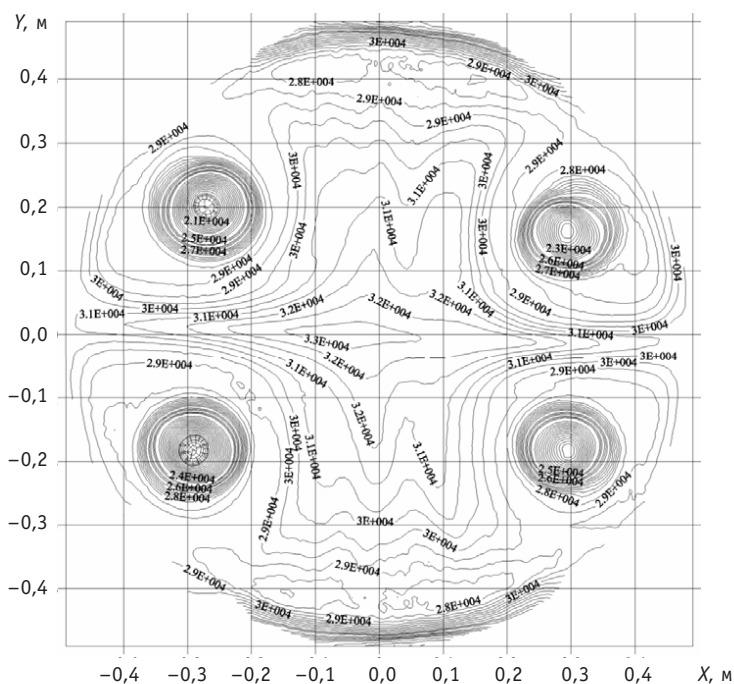


Рис. 5. Распределение избыточного давления на штатном режиме эксплуатации, Па



эксплуатации натурного реактора, может привести к нежелательным последствиям: снижению расхода в каналах, увеличению концентрации примесей и т.д. [2].

На рис. 5 показано распределение избыточного давления для штатного режима эксплуатации. Как и на рис. 3 и 4, на рис. 5 хорошо видны две парные вихревые области. Избыточное давление есть разность между статическим давлением в нижнем коллекторе  $P_{1k}$  в слое жидкости на входе в каналы а.з. и статическим давлением в верхнем коллекторе  $P_{2k}$  на выходе из каналов а.з. Оно по существу характеризует гидравлические потери на а.з.

$$\Delta P = P_{1k} - P_{2k} = \zeta_{\Sigma} \frac{\rho V^2}{2}.$$

Для «среднего» по характеристикам канала имеем ( $\zeta_{\Sigma}$  – коэффициент сопротивления)

$$\Delta \bar{P} = \bar{P}_{1k} - \bar{P}_{2k} = \zeta_{\Sigma} \frac{\rho \bar{V}^2}{2},$$

откуда получаем зависимость разверок относительного расхода в каналах

$$\left( \frac{V}{\bar{V}} - 1 \right) = \sqrt{\frac{P_{1k} - P_{2k}}{\bar{P}_{1k} - \bar{P}_{2k}}} - 1.$$

На рис. 6 приведено графическое изображение разверок для всех вариантов расчета, на рис. 3б (вариант 2) приведено распределение скорости в кольцевом зазоре при снижении расхода до 75% от штатной величины. Снижение расхода, как и в предыдущем случае, приводит к образованию застойных зон I и II. Из рис. 6 хорошо видно, что угол раскрытия застойной зоны II увеличивается до  $\approx 190^\circ$ . Точка столкновения потоков смещается в сторону более «слабого» (левого) напорного патрубка. На рис. 4б показано распределение потоков в нижнем коллекторе.

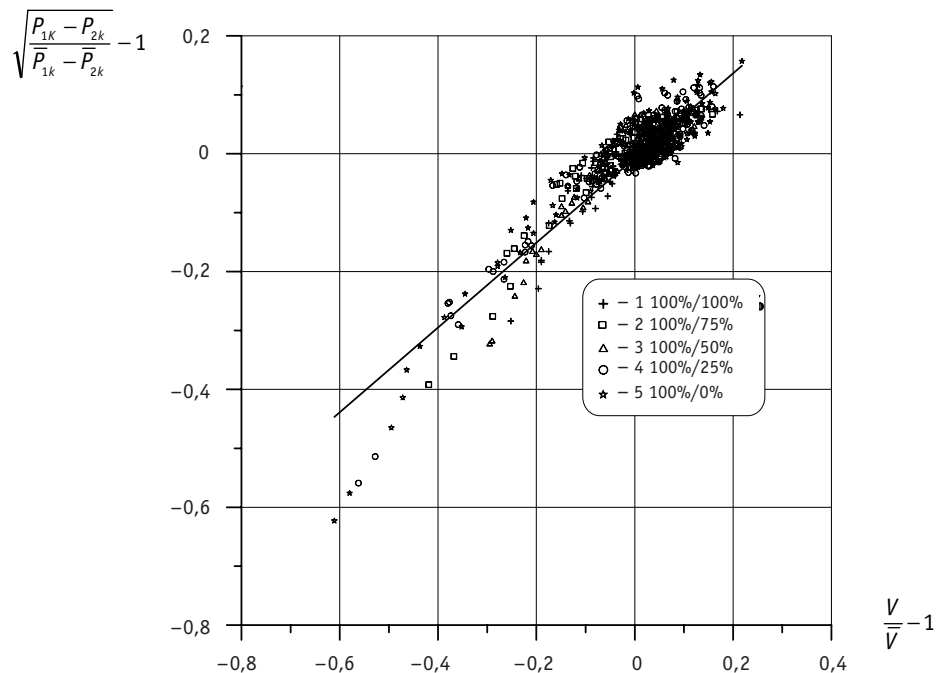


Рис. 6. Разверка относительного расхода

Из рис. 3 видно, вместо двух парных вихревых структур образовалась одна, но с большей интенсивностью закрутки.

Оценка интенсивности закрутки  $S$  проводилась по формуле

$$S = \frac{d \cdot G_\theta}{2G_x},$$

где  $G_\theta = \int_0^\infty (\overline{UW} + \overline{U'W'}) r^2 dr$ ,  $G_x = \int_0^\infty (\overline{U^2} + \overline{U'^2} + (P - P_\infty)) r dr$  и оказалась равна  $\approx 0,28$ . В

приведенных выше формулах  $U$ ,  $W$  – компоненты скорости по осям  $x$ ,  $\theta$  цилиндрической системы координат; верхний индекс штрих – пульсационные составляющие;  $P$  – давление;  $d$  – диаметр;  $G_x$  – осевая тяга, учитывающая вклад турбулентного нормального напряжения и давления. По классификации, приведенной в [9], такие вихревые структуры являются слабо закрученными. Замещение двух парных структур одной происходит вследствие «передавливания» потока жидкости от более «сильного» патрубка, встречного потока от более «слабого» патрубка.

Отметим одну особенность течения в нижнем раздаточном коллекторе при малых снижениях расхода. Кроме парной вихревой структуры в правой части модели активной зоны, в левой части зоны, в области «слабого» патрубка, виден слабо выраженный след от еще одной вихревой пары. Ее интенсивность мала и модуль полной скорости составляет  $\approx 0,3$  м/с. Таким образом можно сделать вывод, что небольшое снижение расхода по одной из петель не приводит к перестройке общей картины.

Распределение потока в кольцевом зазоре и нижнем раздаточном коллекторе при снижении расхода на 50% приведено на рис. 3в и 4в соответственно (вариант 3), анализ которых указывает на существенное изменение общей картины течения. Точка столкновения потоков значительно смещается в левую часть ГДМ. Угол встречи потоков составляет  $\approx 130^\circ$  при этом, застойная зона I значительно умень-

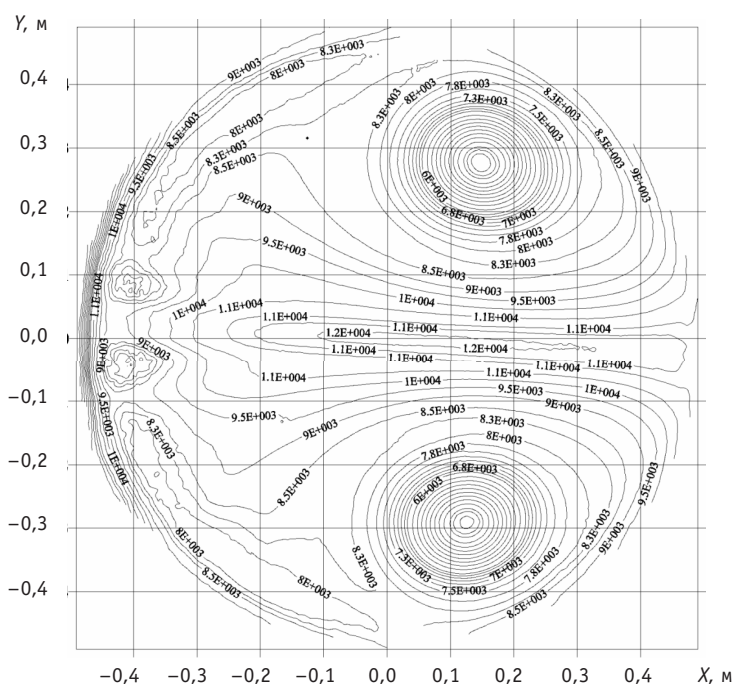


Рис. 7. Распределение избыточного давления при аварийном останове насоса, Па (100%/0%)

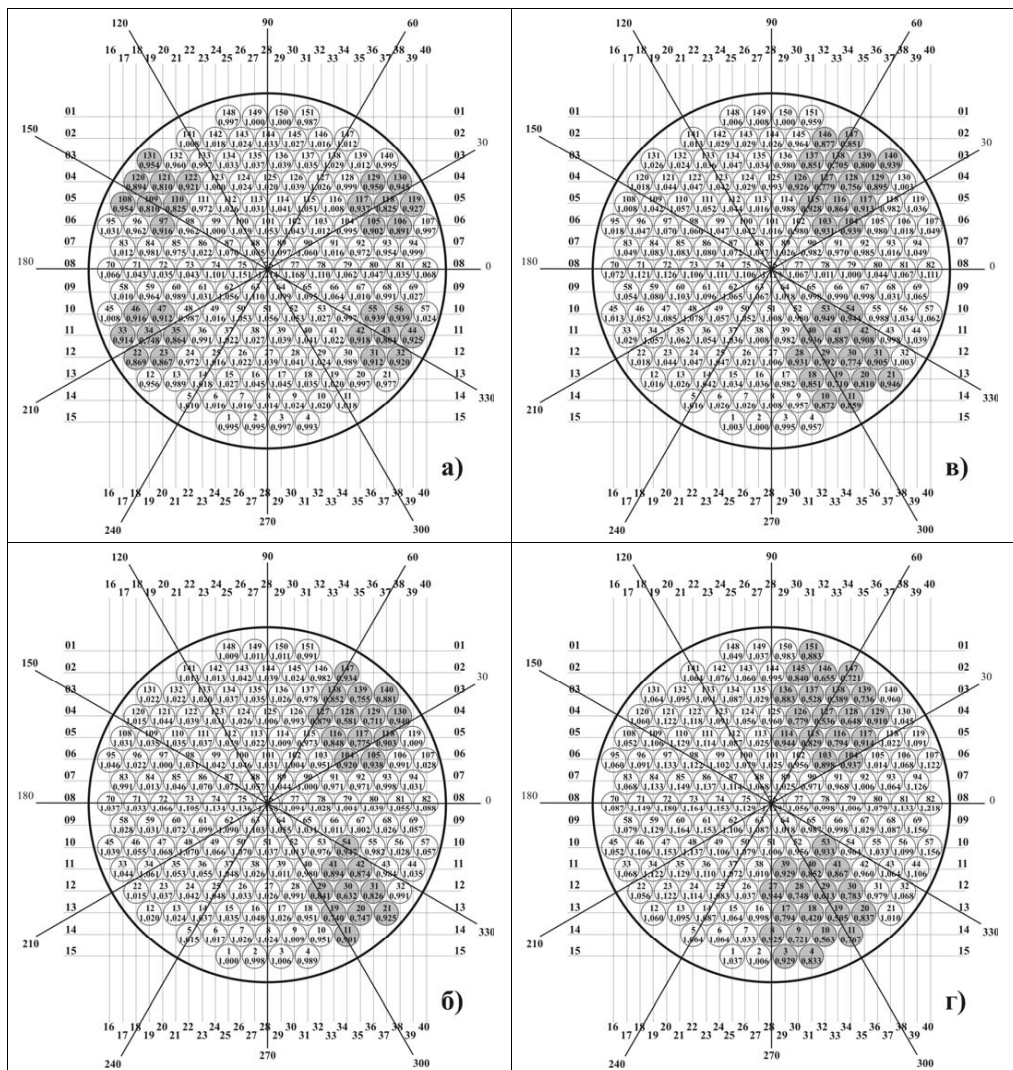


Рис. 8. Картограмма распределения относительных расходов при: а) штатном расходе; б) 75% от штатного расхода; в) 50% от штатного расхода; г) 0% от штатного расхода левого насоса

шается, в то время как застойная зона II увеличивается, практически «окутывая» обечайку активной зоны. Смещение положения точки столкновения потоков и изменение размеров застойных зон под обоими патрубками, объясняется «передавливанием» потока от «слабого» патрубка, потоком от более «сильного».

Расчеты показали, что по сравнению с предыдущим случаем, увеличивается интенсивность закрутки, которая составляет  $\approx 0,37$ . Парная вихревая структура становится более «широкой», что хорошо видно из сравнения рис. 4б и 4в, и смещается в центральную область раздаточного коллектора.

На рис. 3г и 4г (вариант 5) приведены данные расчета соответствующие полному останову левого насоса. Из рис. 3г хорошо видно, что критическая точка смещается практически к самому патрубку. Угол раскрытия застойной зоны II увеличивается до  $\approx 300^\circ$ . Положение точки отрыва пограничного слоя равно  $\approx 150^\circ$ . Застойная зона I значительно уменьшается, в то время как застойная зона II охватывает практически всю поверхность обечайки. Расчетная интенсивность



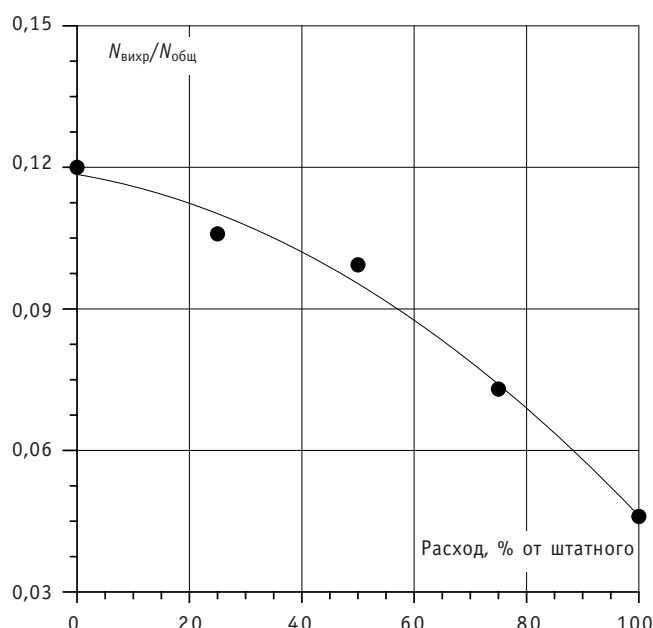


Рис. 9. Зависимость относительного числа каналов, попавших в область «действия» вихрей, от относительного расхода аварийного насоса

закрутки составляет  $\approx 0,46$ . Радиус каждого из вихрей в нижнем раздаточном коллекторе становится еще больше, по сравнению с предыдущим случаем, и значительно смещается к центру модели активной зоны. Причем образовавшаяся парная вихревая структура начинает захватывать ИРК, располагающиеся на левой половине модели активной зоны. На рис. 7 приведено распределение избыточного давления в нижнем раздаточном коллекторе для этого варианта.

Картограммы распределений относительных расходов в ИРК ГДМ приведены на рис. 8а–г, из которых видно, что снижение расхода приводит к снижению расходов в ИРК охваченных вихрями. Вихревая зона становится больше и смещается к центру активной зоны. Максимальный разброс относительных расходов для случая нормального режима эксплуатации составляет 0,748 (min) – 1,214 (max). Для случая 25-процентного снижения расхода, оценка разброса дает величины 0,581 (min) – 1,158 (max). Снижение расхода на 50% дает значения 0,472 (min) – 1,129 (max). Полный останов левого насоса приводит к значениям 0,42 (min) – 1,129 (max).

На рис. 9 приведена зависимость относительного количества ИРК, попавших в зону «действия» вихрей, от общего расхода через ГДМ (с уменьшением относительного расхода число ИРК возрастает).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные расчетные значения величин относительных расходов являются отражением расчетного подхода применительно к приведенной выше геометрии ГДМ. Вместе с тем, анализ результатов, приведенный выше, позволяет сделать следующие выводы:

- 1) при снижении расхода по одной из петель в нижнем раздаточном коллекторе формируется парная вихревая структура;
- 2) расчетная интенсивность закрутки вихрей возрастает с ростом значения неравномерности подачи рабочего тела в ГДМ;

3) увеличение неравномерности подачи рабочего тела приводит к смещению парного вихря к центру активной зоны и росту числа каналов, попавших в зону «действия» вихрей;

4) для данной модели отключение одного из насосов (проектная авария) приводит к снижению локального относительного расхода в ИРК на  $\approx 60\%$  относительно штатного.

### **Литература**

1. Идельчик И.Е. Аэродинамика промышленных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1983. – 520 с.
2. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 358 с.
3. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С. Гидродинамические расчеты. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2007.
4. Решетов В.А., Смирнов В.П., Пикулева Т.А. Гидравлика кругового раздаточного коллектора// ВАНТ. Сер.: Реакторостроение. – 1976. – Вып. 13. – С. 65-74.
5. Быстров П.И., Михайлов В.С. Гидродинамика теплообменных аппаратов. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
6. Фомичев М.С. Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Гусев Б.Р., Калинин Р.И., Благовещенский А.Я. Гидродинамические аспекты надежности энергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Avles A.P. Discrete Model in Fluid Dynamics. Apartado 3008. – Coimbra, Portugal, 2004.
9. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
10. Авдеев Е.Ф., Чусов И.А., Устюжанин А.Я., Максимовский В.В., Лазикиан Д.С., Левченко В.А., Бородастов С.В., Леонов И.Н., Белугин В.А., Левченко Ю.Д., Юрьев Ю.С. Гидравлический стенд для испытаний моделей ядерных реакторов//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – №4. – С. 70-83.
11. Авдеев Е.Ф., Чусов И.А., Левченко В.А., Левченко Ю.Д., Юрьев Ю.С. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления модели корпусного реактора//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – №4. – С. 77-85.
12. Юрьев Ю.С., Левченко Ю.Д., Чусов И.А., Казанцев А.А., Леонов И.Н. Влияние отклонений геометрии тракта двухпетлевой гидравлической модели на неопределенность общего коэффициента гидросопротивления//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – №3. – С. 81-86.
13. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
14. Шлихтин Г. Теория пограничного слоя/Пер. под ред. Л.Г. Лойцанского. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
15. Методы расчета турбулентных течений/Пер. под ред. В. Колльмана. – М.: Мир, 1984. – 464 с.

Поступила в редакцию 6.06.2008

natural uranium at partial loading a reactor by thorium are analyzed. The high neutron economy of the CANDU reactor, its ability to be refuelled while operating at full power, its fuel channel design, and its simple fuel bundle provide an evolutionary path for allowing full exploitation of the energy potential of thorium fuel cycles in existing reactors. The open thorium fuel cycle in CANDU reactors provides an evolutionary approach to exploiting the energy potential of thorium. Use of the thorium fuel cycle in CANDU reactors ensures long-term supplies of nuclear fuel, using a proven, reliable reactor technology.

#### УДК 539.1

*The Determination of the average Charge in the Ion Chamber \ S.A. Morozov, D.M. Shvetsov, P. S. Shutov, S.S. Shutov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 6 pages, 2 tables. – References, 8 titles.*

A method of the average charge measurements per neutron registration in the ion chamber has been described.

The method consists of two parts. The first part includes measurement of the average current and its spectral power density measurements. The second one consists in measurement of the amplitude spectrum in relative units.

In this article the algorithm of processing of experimental results with the purpose of calculation of an average charge per neutron registration is described. The method was used for KHT-25 chamber. The average charge is equal to  $(2,02 \pm 0,18) \cdot 10^{-13}$  C.

#### УДК 621.039.542

*Experimental Study of the Processes of Heat Exchange and Profiles of Temperature of the Flow of the Heavy Liquid Metal Heat-Transfer Agent \ A.V. Besnosov, O.O. Novozhilova, S.Yu. Savinov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 11 pages, 9 illustrations. – References, 6 titles.*

In this article are presented results of the experimental studies of the heat exchange to the lead heat-transfer agent in the annular clearance in the circulation contour with the controlled and operated processes of mass exchange and mass transfer of the oxygen admixture. The studies have been carry out in the non-isothermal contour (in this article the results of the experiments received in the heat-extended experimental section the imitator fuel element of the active zone) with the circulation of lead heat-transfer agent at a temperature 450–550°C, the average velocity of the heat-transfer agent 0.1 – 1.5 м/с, Peclet number 500 – 6000 and average heat flow 50 – 160 kW/m<sup>2</sup>. The Contents of the oxygen in different point of the sidebar was supported within the range of thermodynamic activity of the oxygen 10<sup>-5</sup>–10<sup>0</sup>. The oxygen content at different points of contour was supported in the range of the thermodynamic activity of oxygen 10<sup>-5</sup> – 10<sup>0</sup>. Processes in the non-isothermal liquid-metal contour with the heating (the imitator of the fuel element of the active zone) experimental section simulate the dependence of the characteristics of heat exchange in the contour on the characteristics of the mass transfer of admixtures.

#### УДК 621.039.5

*Numerical Simulation of Velocity Distribution and Water Pressure in Reactor Model Setting \ I.A. Chusov, V.A. Sarkisov, Yu.S. Yuryev, D.V. Zaytsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnich zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 9 illustrations, 1 table. – References, 15 titles.*

The velocity distribution, pressure in the header and the flowrates in working channels of two loops reactor plant hydraulic model were obtained in the paper based on three-dimensional numerical calculations. Calculations were carried out both for the standard operation mode and for case of the reduction of one of the feed water pumps delivery till the full shutdown. It was shown that it brings to the significant re-distribution of the flowrates in the channels. The analysis of the eddy zones in the lower header and in the downhole circular channel has been performed.