

## Разработка CFD модели реактора проекта АЭС-2006

В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков, О.В. Кудрявцев, Ю.Н. Надинский,  
А.П. Скибин

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

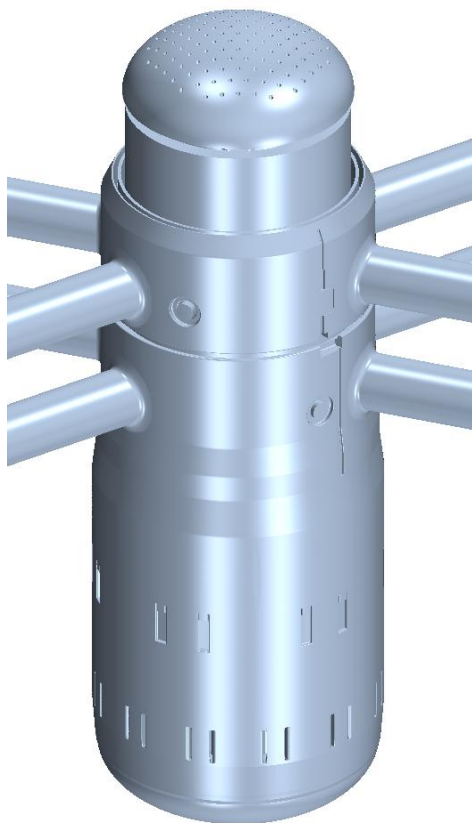
В работе представлено поэтапное создание CFD-модели проточного тракта реактора проекта АЭС-2006. Расчет процессов тепломассообмена в активной зоне, представленной потвэльно, выполнен с помощью специально разработанной методики, основанной на гипотезе «изобарного сечения». Размерность CFD-модели составляет 700 млн. контрольных объемов. Разработанная модель позволяет определять распределение температуры, компонент вектора скорости и давления теплоносителя в реакторе. Обработка результатов расчета позволяет получить ряд интегральных параметров, характеризующих работу реакторной установки, таких как распределение расходов на входе и на выходе из активной зоны, распределение подогревов в тепловыделяющих сборках активной зоны, коэффициенты гидравлического сопротивления элементов проточного тракта реактора и т.д.

*Ключевые слова:* АЭС-2006, ВВЭР, CFD, модель, реактор, теплогидравлический расчет, распределение расходов.

### 1. Введение

Течение теплоносителя в реакторе сопровождается наличием трехмерных явлений, которые не могут быть в полной мере учтены при помощи одномерных инженерных подходов к численному моделированию. Исследование неравномерного распределения параметров теплоносителя в реакторе, включая определение гидравлических характеристик внутрикорпусных устройств, осуществляется на основе соответствующих НИОКР. Настоящий уровень развития науки и техники дает возможность в дополнение к экспериментальным исследованиям применять методы вычислительной гидродинамики и тепломассообмена (CFD). В связи с этим была разработана CFD модель реактора ВВЭР-1200 и проведена серия расчетов с целью подтверждения возможности трехмерного моделирования тепломассообмена в проточном тракте реактора.

Втекание теплоносителя из входных патрубков в кольцевой участок характеризуется изменениями направления движения, резкими сужениями и расширениями, частичными смешениями петлевых потоков между собой. Геометрическая модель проточной части реактора ВВЭР-1200 представлена на **Рис. 1** [1, 2].



**Рис. 1.** Геометрическая модель проточной части реактора ВВЭР-1200

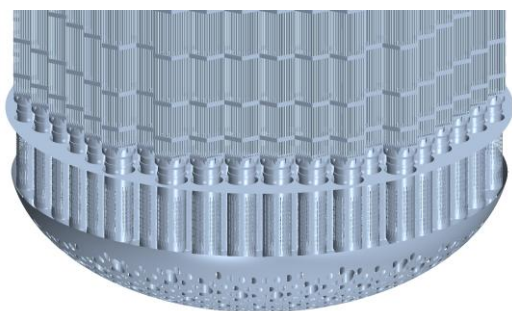
Тракт течения теплоносителя в реакторе условно разделяется на три участка: напорную камеру реактора, активную зону и сборную камеру реактора.

Напорная камера реактора образована входными патрубками, кольцевым зазором между внутренней поверхностью корпуса реактора и наружной поверхностью шахты внутрикорпусной (ШВК), а также включает область прохода теплоносителя через перфорацию днища ШВК и последующее поступление в отверстия опор тепловыделяющих сборок (ТВС).

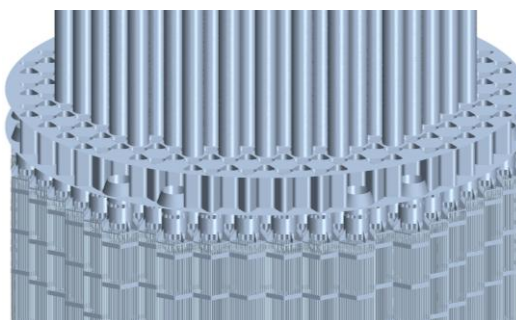
Активная зона образована геометрией 163 ТВС, каждая из которых состоит из хвостовика, нижней опорной решетки, пучка из 312 тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), дистанционирующих решеток, верхней отбойной решетки и головки.

Сборная камера реактора образована нижней, средней и верхней перфорированными плитами блока защитных труб (БЗТ), защитными трубами БЗТ, а также перфорациями в боковых поверхностях БЗТ и ШВК, расположенных в области выходных патрубков реактора. В сборную камеру включена также геометрия возможного прохода некоторой части теплоносителя из активной зоны под крышку реактора и последующего его поступления через частичную перфорацию средней плиты БЗТ в выходной патрубок реактора.

Все описанные выше конструктивные особенности учтены в твердотельной модели проточной части реактора (**Рис. 1** и **Рис. 2**).



а)



б)

**Рис. 2.** Особенности геометрии проточного тракта реактора в области: а) напорная камера реактора и вход в активную зону; б) выход из активной зоны и БЗТ

## 2. Постановка задачи

Условия однозначности для данной задачи состоят из замыкающих соотношений и граничных условий (рисунок 3). Расчетная область ( $\Omega$ ) образована граничными условиями трех типов – входное ( $\Gamma_1$ ), выходное ( $\Gamma_2$ ), граница на стенках с условием прилипания ( $\Gamma_3$ ). Необходимо отметить, что входное и выходное ГУ состоят из четырех подводящих патрубков и, следовательно, делятся на четыре части  $\Gamma_{11}$ ,  $\Gamma_{12}$ ,  $\Gamma_{13}$ ,  $\Gamma_{14}$  для входа и  $\Gamma_{21}$ ,  $\Gamma_{22}$ ,  $\Gamma_{23}$ ,  $\Gamma_{24}$  для выхода. Расход теплоносителя задается через каждый патрубок, в том числе и расход «обратного тока» для моделирования режимов работы реактора на частичном количестве петель.

Расположение ГУ выбирается из условий, чтобы расчетная область включала в себя проточную часть объекта исследования, а влияние ГУ на результаты расчета было минимальным.

Граничные условия:

– первого рода для уравнений движения на входе ( $\Gamma_{11}$ ) (первый патрубок):

$$u_j(\vec{r}) = (\vec{u}_{\text{ex1}}(\vec{r}), \vec{x}_j), \quad \vec{r} \in \Gamma_{11}, \quad (1)$$

где  $\vec{x}_j$  – орт декартовой системы координат;  $\vec{u}_{\text{ex1}}$  – распределение вектора скорости теплоносителя во входном сечении  $\Gamma_{11}$ ;

– второго рода для уравнений движения на выходе ( $\Gamma_2$ ):

$$\frac{\partial u_j(\vec{r})}{\partial n} = 0, \quad \vec{r} \in \Gamma_{21}, \quad (2)$$

где  $j$  – номер оси декартовой системы координат ( $j = 1, 2, 3$ );

– условий прилипания для уравнений движения на поверхности  $\Gamma_3$ :

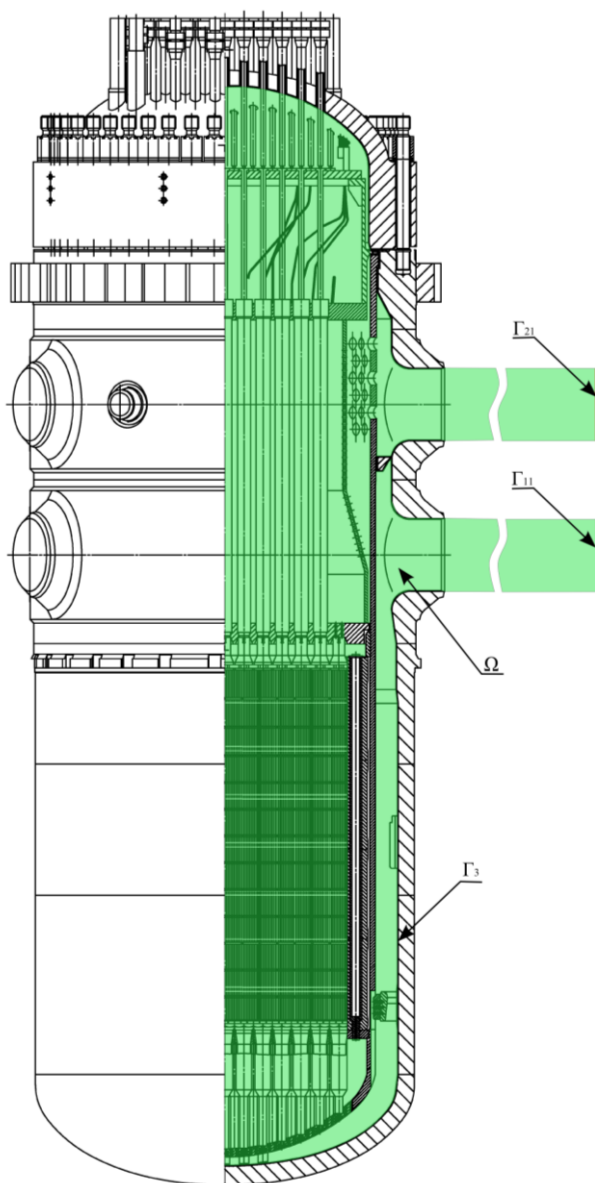
$$u_j(\vec{r}) = 0, \quad \vec{r} \in \Gamma_3. \quad (3)$$

В уравнениях (1) и (2) представлены ГУ только одного входного и одного выходного патрубков, для остальных патрубков ГУ записываются аналогично. При этом должно выполняться условие равенства расходов по входным и выходным границам. Например, при работе реактора на четырех петлях это условие выглядит следующим образом:

$$\frac{\int_{f_{\Gamma_{11}}} (\rho \vec{u}, \vec{n}) dS + \int_{f_{\Gamma_{12}}} (\rho \vec{u}, \vec{n}) dS + \int_{f_{\Gamma_{13}}} (\rho \vec{u}, \vec{n}) dS + \int_{f_{\Gamma_{14}}} (\rho \vec{u}, \vec{n}) dS}{4} = \int_{f_{\Gamma_{21}}} (\rho \vec{u}, \vec{n}) dS = \int_{f_{\Gamma_{22}}} (\rho \vec{u}, \vec{n}) dS = \int_{f_{\Gamma_{23}}} (\rho \vec{u}, \vec{n}) dS = \int_{f_{\Gamma_{24}}} (\rho \vec{u}, \vec{n}) dS \quad (4)$$

где  $\vec{n}$  – вектор, нормальный к поверхности;  $f_{\Gamma_{11}}$ ,  $f_{\Gamma_{12}}$  и т.д. – площади соответствующих граничных поверхностей.

Для замыкания математической модели использовались двухпараметрические модели турбулентности. Все уравнения, применяемые в настоящей математической модели, приведены в [3-5]. Расчет тепломассообмена процессов в активной зоне выполнен с помощью специально разработанной методики, основанной на гипотезе «изобарного сечения».



$\Gamma_1$ -Входное граничное условие;  $\Gamma_2$ - Выходное граничное условие;  $\Gamma_3$ - Граница с условием прилипания

**Рис. 3.** Расчетная область

### 3. Сеточная модель

Важной особенностью рассматриваемой установки является возможное заметное влияние на течение потока теплоносителя геометрически малых элементов конструкции. Поэтому при создании твердотельной модели рассматриваемой расчетной области и ее последующей дискретизации были максимально подробно учтены элементы проточного тракта реактора.

При дискретизации расчетной области были использованы два типа сеток на базе полиэдрических и гексаэдрических контрольных объемов. В созданной сеточной модели основной является полиэдрическая сетка, а гексаэдрическая сетка используется для мелких повторяющихся элементов и потвальной модели активной зоны реактора.

Фрагменты сеточной модели опор и хвостовиков ТВС, а также нижней части активной зоны представлены на **Рис. 4а**. Область соединения головок ТВС и нижней плиты БЗТ показана на **Рис. 4б**.

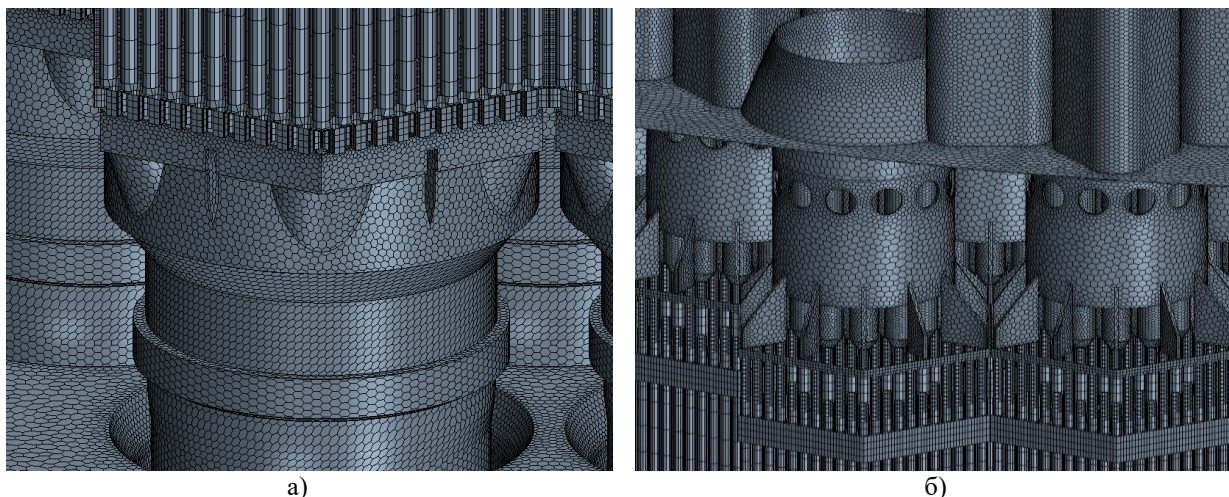


Рис. 4. Фрагмент сеточной модели:  
а) область хвостовиков ТВС и входа в активную зону;  
б) область выхода из активной зоны, головок ТВС и нижней плиты БЗТ

Общая сборка CFD модели и расчеты выполнены с использованием кода STAR-CCM+. Размерность расчетной сетки составила 700 млн. контрольных объемов.

## 4. Расчет

С применением разработанной в среде STAR-CCM+ [3] CFD модели выполнен ряд расчетов реактора в стационарных режимах работы. В результате моделирования получены распределения температуры, компонент вектора скорости и давления теплоносителя в проточном тракте реактора.

Для анализа результатов расчета необходимо получить интегральные параметры, характеризующие работу реактора. К таким параметрам можно отнести распределение расходов на входе и на выходе из активной зоны, распределение подогревов в тепловыделяющих сборках активной зоны, коэффициенты гидравлического сопротивления элементов проточного тракта реактора и т.д. Для получения интегральных параметров необходимо провести обработку полученных расчетных данных.

### 4.1 Моделирование гидродинамики РУ

В качестве примера на **Рис. 5.** и **Рис. 6.** для режима работы реактора на четырех петлях при минимально контролируемом уровне мощности приведены распределения модуля вектора скорости и статического давления, соответственно,

Полученные в расчете потери давления сравнивались с экспериментальными данными. Отклонение расчетных данных от эксперимента не превышает 5 % [1, 2].

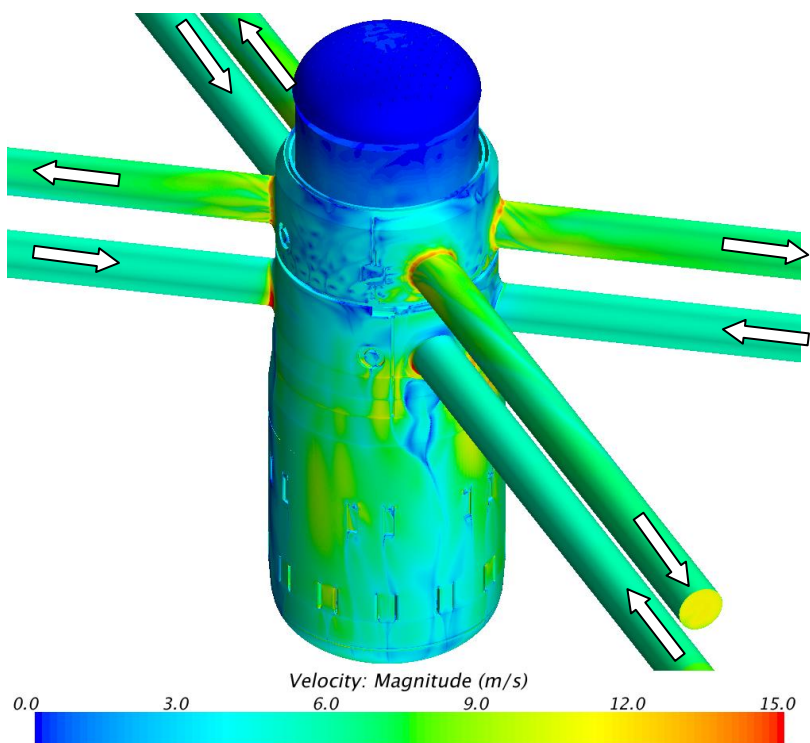


Рис. 5. Распределение абсолютных значений скорости

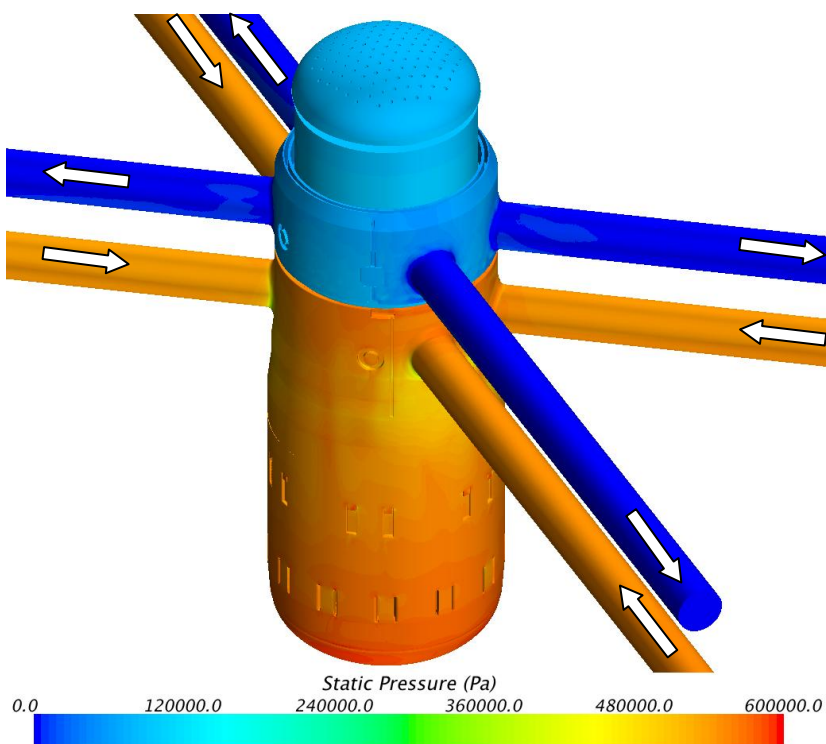
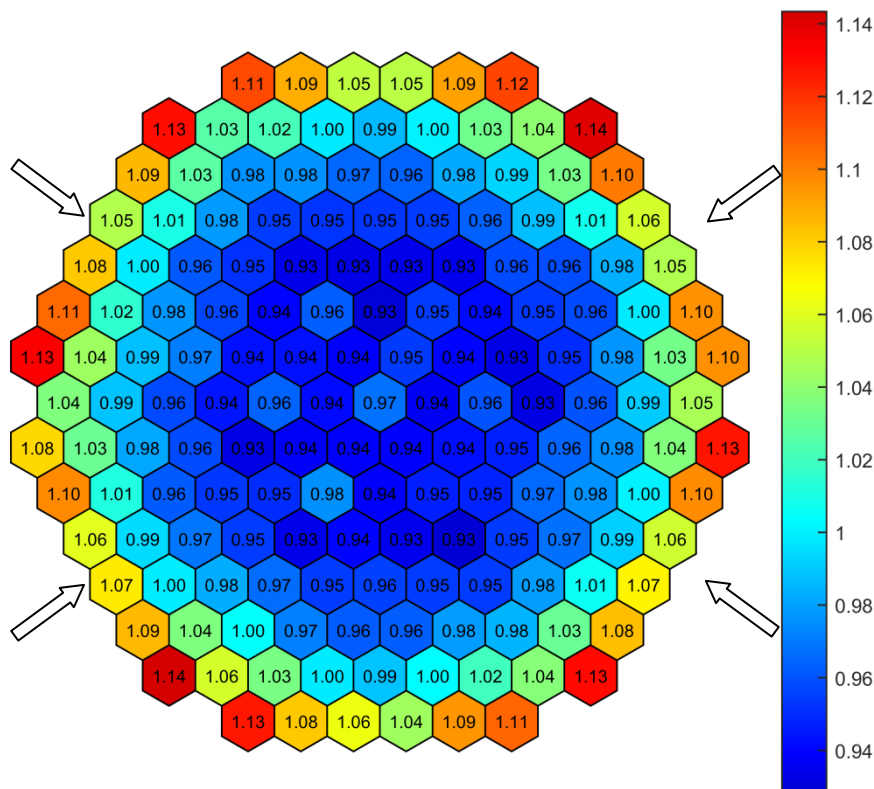


Рис. 6. Распределение статического давления

В качестве демонстрации на **Рис. 7** приведено распределение расходов через тепловыделяющие сборки на входе в активную зону, отнесенные к среднему расходу. Отклонение расчетных расходов от экспериментальных данных, не превышает 8 % [1, 2].





**Рис. 7.** Относительное осредненное по опорам ТВС распределение массового расхода на входе в активную зону

## 4.2 Моделирование процессов смешения в РУ

В качестве примера расчетного моделирования процессов смешения приведено исследование гидродинамики и перемешивания потоков теплоносителя с различной температурой или концентрацией борной кислоты при работе реактора на различном количестве петель. В данном случае на вход в патрубок с работающим ГЦНА подается пассивный скаляр (безразмерная температура или концентрация жидкого поглотителя).

Распределения скаляра во входных патрубках и опускном участке представлено на **Рис. 8** (активная зона и сборная камера реактора не показаны). Важно отметить, что перемешиванию способствуют вихревые структуры, которые образуются в области соединения потоков.

На **Рис. 9** представлены распределения скаляра на входе в активную зону. Из **Рис. 9а** видно, что из-за сложной геометрии проточного тракта происходит разворот потока практически на 180 градусов относительно патрубка, в который подается скаляр. Подобное распределение безразмерной температуры было отмечено и в аналогичном эксперименте, результаты которого приведены на **Рис. 9б**.

Важно отметить, что в рассмотренном режиме работе реактора часть горячего (борированного) теплоносителя уходит в отключенный патрубок и существует вероятность того, что часть бора будет уходить в патрубок с отключенным ГЦНА.

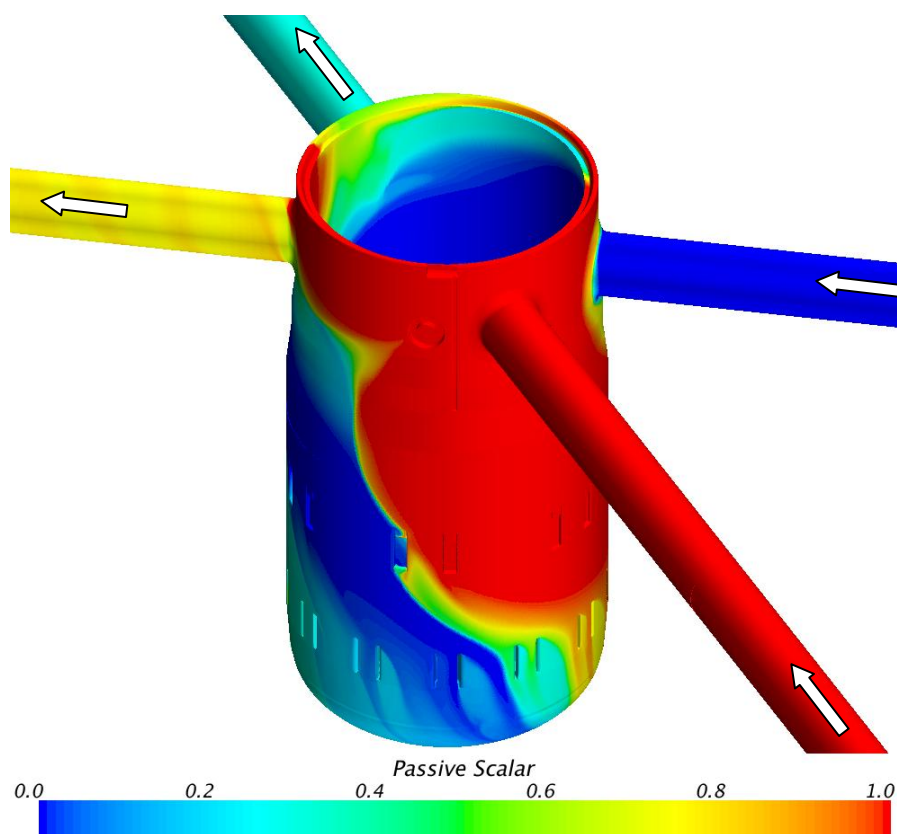


Рис. 8. Распределение пассивного скаляра в опускном участке реактора

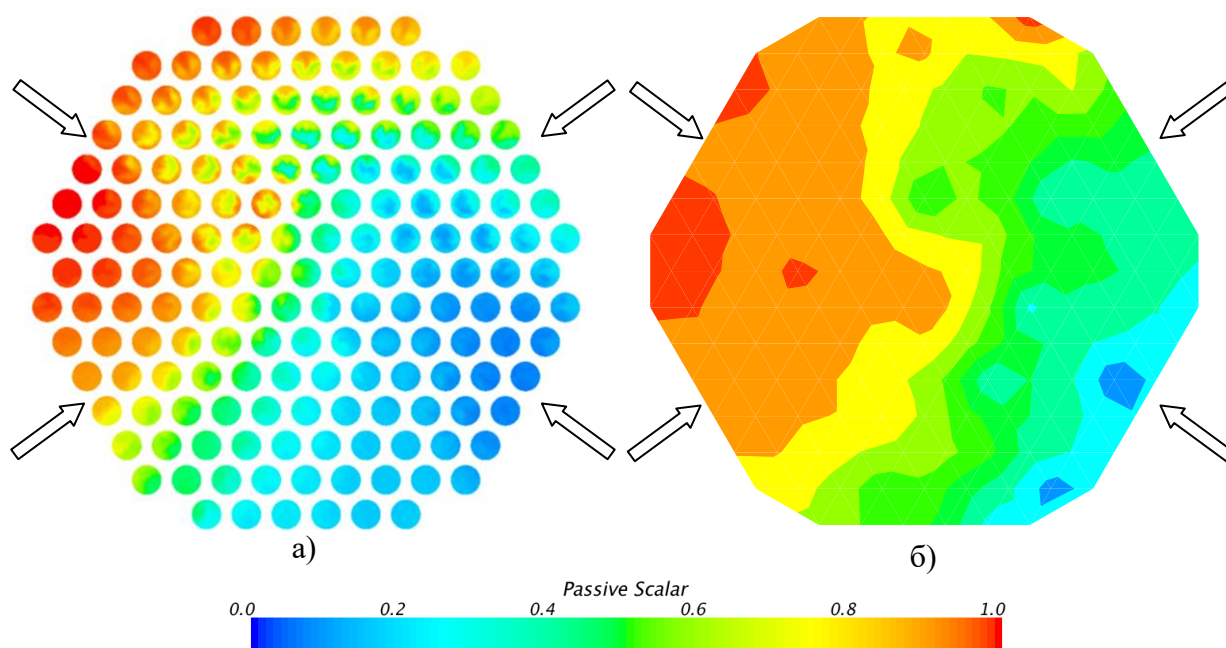


Рис. 9. Распределение пассивного скаляра на входе в активную зону:

а) – расчет; б) – эксперимент

## 5. Заключение

В результате работы создана CFD модель проточной части реактора ВВЭР-1200, позволяющая определять трехмерные распределения параметров теплоносителя при стационарных режимах работы реакторной установки. Проведено моделирование стационарных теплогидрав-



лических процессов и сравнение с экспериментальными данными. Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 5 – 8 %.

## **Литература**

1. Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. М.:ИКЦ «Академкнига», 2004. 255 с.
2. Денисов В.П., Драгунов Ю.Г. История создания реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИздАТ, 2004. 368 с.
3. CD-adapco Inc. USER GUIDE STAR-CCM+ Version 8.02, 2013. – 12360 p.
4. Methodology STAR-CD version 4.16– CD-adapco. CD – adapco Group, 2009.
5. Menter, F,R, 1993, ‘Zonal two equation k-turbulence models for aerodynamic flows’, Proc, 24th Fluid Dynamics Conf,, Orlando, Florida, USA, 6-9 July, Paper No, AIAA 93-2906.

## Development of CFD model of NPP-2006 reactor

A.P. Skibin, V.Yu. Volkov, L.A. Golibrodo, A.A. Krutikov, O.V. Kudryavtsev, Yu. N. Nadinskiy

OKB «GIDROPRESS»

In this article stepwise development of CFD model of NPP-2006 reactor is presented. The calculation of heat mass exchange process in the core was performed using method based on the “isobar section” hypothesis. The core was created using pin-by-pin resolution. Mesh size of CFD model consists of 700 mln. control volumes. Temperature, velocity and pressure distributions in the reactor can be calculated using the CFD model. The set of averaged parameters which characterize the NPP work can be obtained using computational data handling.

*Keywords:* NPP -2006, VVER, CFD, model, reactor, thermal-hydraulic simulation, demand distribution.

### References

1. Logvinov S.A., Bezrukov Yu.A., Dragunov Yu.G. Thermal-hydraulic experimental reliability study of VVER reactors. M.: IKC «Akademkniga», 2004. 255 p.
2. Denisov V.P., Dragunov Yu.G. The history of VVER creation for nuclear power plants. M.:IzdAT, 2004. 368 p.
3. CD-adapco Inc. USER GUIDE STAR-CCM+ Version 8.02, 2013. – 12360 p.
4. Methodology STAR-CD version 4.16– CD-adapco. CD – adapco Group, 2009.
5. Menter, F,R, 1993, ‘Zonal two equation k-turbulence models for aerodynamic flows’, Proc, 24th Fluid Dynamics Conf., Orlando, Florida, USA, 6-9 July, Paper No, AIAA 93-2906.