

УДК 621.039.553.2

Влияние геометрии коллектора на распределение расхода теплоносителя в активной зоне модели реактора

Сатин А. А.^{1,*}, Солонин В. И.¹

* satin86@inbox.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Исследуется влияние пористости входных решеток, устанавливаемых в полусферическом коллекторе подвода теплоносителя к тепловыделяющим элементам перед активной зоной газоохлаждаемого реактора, на структуру потока, расход в трактах охлаждения и гидравлическое сопротивление коллектора. Приводятся результаты экспериментов, выполненных на газо динамической модели трактов теплоносителя, содержащей 55 стержневых имитаторов твэлов. Выполнено численное моделирование течения в модели с использованием двухпараметрической k-ε модели турбулентности и программного комплекса ANSYS CFX v14.0. Продемонстрировано соответствие экспериментальных и расчетных результатов. Показано, что использование входных решеток разной пористости позволяет выровнять статическое давление перед активной зоной, более равномерно распределять поток теплоносителя по сечению активной зоны, уменьшить величину пульсаций скорости, но приводит к росту потерь давления в коллекторе подвода теплоносителя.

Ключевые слова: напорный коллектор, аэродинамический эксперимент, вычислительная гидро динамика

Введение

Организация устойчивого течения теплоносителя в трактах ядерного реактора, снижение гидравлических потерь, обеспечение равномерного распределения расхода по сечению активной зоны является одной из важных научно-технических задач, решаемых в процессе создания реакторной установки для транспортно-энергетического модуля мегаваттного класса [1].

Варианты проектов данной установки [2] объединяет общее конструкторское решение тракта теплоносителя: после входных патрубков, теплоноситель движется в кольцевом периферийном канале, разворачивается на 180° в полуэллиптическом подводящем коллекторе, поступает в активную зону и после нее движется к выходным

патрубкам. Устойчивость течения и гидравлические потери при такой форме тракта зависят от характеристик кольцевого тракта и подводящего коллектора.

Течение в подводящем коллекторе определяет образующийся в нем торообразный вихрь. Поведение потока подобной геометрии было исследовано при разработке раздаточных коллекторов водоохлаждаемых реакторов [3]. Возникающее вихревое течение, при отсутствии соответствующих устройств, является причиной пульсаций расхода и вибраций тепловыделяющих сборок, а распределение скорости в торообразном вихре приводит к неравномерности скорости теплоносителя в сечении активной зоны: меньшим значениям скорости на периферии [4, 5]. Для управления перераспределением расхода по активной зоне в соответствии с уровнем энерговыделения используются распределительные устройства – дефлекторы, а также особенности конструкции входных решеток активных зон [6].

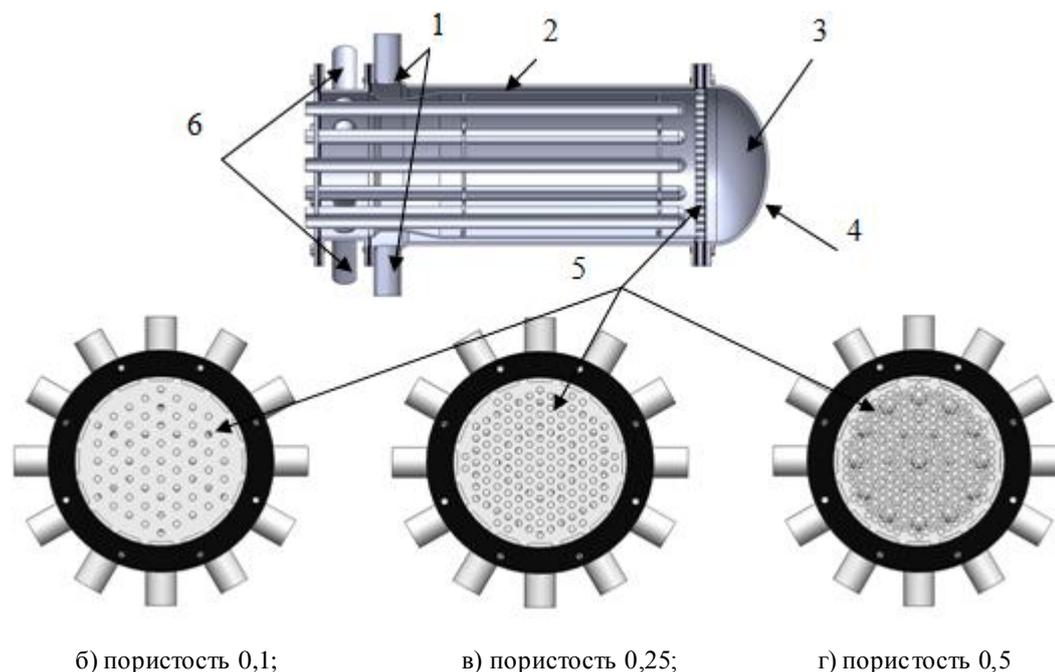
В работе впервые исследуется влияние геометрия входных решеток на осредненное и пульсационное течение в полусферическом коллекторе и на входе в активную зону в модели трактов теплоносителя газоохлаждаемого реактора и **даются** рекомендации по конструктивному исполнению коллекторных трактов течения теплоносителя.

1. Модель трактов теплоносителя газоохлаждаемого реактора и измерение характеристик потока

Тракты модельного теплоносителя – воздуха газодинамической модели №1 (рис. 1) включают подводящие патрубки (1), расположенные нормально к оси модели, кольцевой тракт переменного сечения (2), коллектор раздаточный (3), образованный полусферическим днищем (4) и плоским входным торцом входной решетки имитатора активной зоны (5). Имитатор активной зоны выполнен в виде двух решеток пористостью. Модель включает 13 стержней, имитирующих направляющие каналы органов регулирования системы управления и защиты реактора на течение теплоносителя в области от выхода из активной зоны до выходных патрубков модели (6). При анализе менялась пористость входной решетки (5) с 0,1 до 0,5. Диаметр входных отверстий был равен 10 мм.

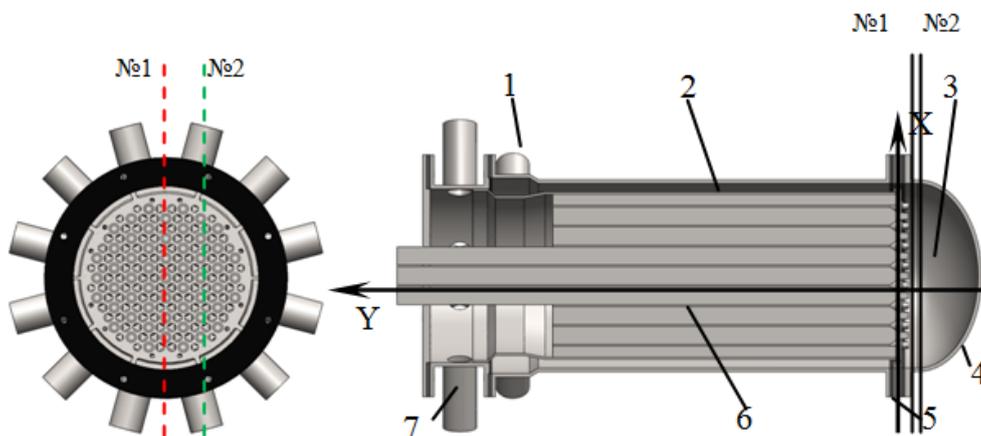
Для верификации расчетных исследований влияния пористости входных решеток на распределение скоростей перед активной зоной в ANSYS CFX [7] использовались экспериментальные результаты, полученные на газодинамической модели №2 (рисунок 2). В этой модели имитируется активная зона из 55 цилиндрических стержней диаметром 25 мм. Пористость входной решетки при этом составила 0,27. На стенде были

осуществлены замеры распределения скорости перед входной решеткой в двух направлениях (рисунок 2).



1 – подводящие патрубки; 2 – кольцевой тракт; 3 – коллектор раздаточный; 4 – днище; 5 – входная решетка; 6 – выходные патрубки

Рис. 1. – Схема модели трактов №1 теплоносителя



1 – подводящие патрубки; 2 – кольцевой тракт; 3 – коллектор раздаточный; 4 – днище; 5 – входная решетка; 6 – имитаторы твэл; 7 – выходные патрубки

Рис. 2. – Схема модели трактов №2 теплоносителя и направлений измерений распределений скорости

В экспериментах измерялись расход воздуха через модель, распределение статического давления и скорости в объеме коллектора раздаточного в двух направлениях. Для измерения средней скорости использовался цилиндрический поперечно обтекаемый

зонд давления диаметром 3 мм с одним радиально расположенным импульсным отверстием диаметром 0,4 мм. Тарировка зонда с использованием аэродинамической трубы термоанемометра DISA [8], показала, что давление в импульсном отверстии, ориентированном навстречу потоку, равно динамическому напору потока с погрешностью 6 %, а разность давлений при ориентации импульсного отверстия навстречу и по потоку составляет приблизительно 1,29 динамического напора потока с погрешностью 16 %.

Отличие результатов тарировки от других известных [9] связано с турбулентностью тарировочного потока, в котором динамический напор, измеряемый зондом, превышает динамический напор потока со средней скоростью \bar{w} на величину $(1 + \bar{w}'^2 / \bar{w}^2)$, где $\sqrt{\bar{w}'^2}$ - среднеквадратичное значение продольной скорости потока. Тарировка выполнена в диапазоне чисел Рейнольдса обтекания трубки зонда от 380 до 14000, что соответствует условиям измерений в модели.

Измерения зондом давления в направлениях 1 и 2 выполнялись при двух перемещениях зонда в каждом направлении автоматизированным механизмом, обеспечивающим одинаковость координат измерений давления с погрешностью не более 0,1 мм. В первом перемещении импульсное отверстие зонда было ориентировано навстречу потоку (в сторону отрицательных значений координаты Y, рис. 1), во втором – по потоку. Результаты измерений обрабатывались программно с учетом тарировки. При анализе результатов измерений учитывали, что в области входных отверстий хвостовиков имитатора активной зоны (рис. 1), где близкий к осевому поток поступает в дроссельные устройства, условия обтекания зонда аналогичны условиям тарировки. В тоже время при измерениях в областях между входными отверстиями дроссельных устройств показания зонда будут недостоверны вследствие близости зонда к непроницаемой поверхности входной решетки. Здесь течение подобно исследованному в [10], поток перестраивается, уменьшается его осевая скорость, увеличивается статическое давление в набегающем потоке

2. Численное моделирование течения в модели трактов теплоносителя

Для выявления особенностей течения на входе в имитатор активной зоны и в областях, не доступных для экспериментальных измерений, был выполнен численный анализ течения в модели. При численном моделировании использован конечно-элементный метод в программном комплексе ANSYS CFX v 14 [7], отличительной особенностью которого является возможность автоматического построения сеток, что важно ввиду сложной геометрии трактов рассматриваемых моделей реакторной установки. Расчеты выполнены с применением стандартной линейной k – ε модели турбулентности [11], хорошо зарекомендовавшей себя при анализах сложных неавтономных течений с изменяющимися характеристиками турбулентности.

Использованы следующие балансные уравнения несжимаемой жидкости:

- уравнение движения жидкости

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}; \quad (1)$$

- уравнение неразрывности

$$\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

где компоненты тензора напряжений и скоростей деформаций определяются как

$$\tau_{ij} = 2 \cdot \mu \cdot S_{ij} - \rho \cdot \overline{V_i' \cdot V_j'}, \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

Напряжения Рейнольдса определяются согласно гипотезе Буссинеска как произведения турбулентной вязкости на соответствующие компоненты тензора скоростей деформаций осредненного движения:

$$-\rho \cdot \overline{V_i' \cdot V_j'} = T_{ij} = 2 \cdot \mu \cdot S_{ij}. \quad (5)$$

Турбулентная вязкость, выражается через кинетическую энергию турбулентности k и скорость диссипации турбулентной энергии ε :

$$\mu_T = \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k^2}{\varepsilon}. \quad (6)$$

Уравнения для k – ε модели использованы в форме, принятой для полностью развитых турбулентных течений:

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T \cdot P - \rho \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} \cdot \mu_T \cdot P - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \varepsilon), \quad (8)$$

$$P = \frac{1}{\mu_T} \cdot \sum_i \sum_j T_{ij} \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j}. \quad (9)$$

В уравнениях (1)-(9) x_i – оси декартовой системы координат ($i=1, 2, 3$); V_i – проекция вектора скорости \vec{V} на ось x_i ; p – статическое давление; t – время; μ – динамическая вязкость, μ_T – турбулентная вязкость; ρ – плотность.

В расчетах использованы коэффициенты стандартной линейной k – ε модели, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты стандартной линейной k – ε модели

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε
0,09	1,44	1,92	1,0	1,3

В силу симметрии геометрии модели рассматривалось течение в секторе симметрии четвертой части модели (рис. 1). Граничными условиями при расчетах принималось равномерное распределение средней скорости в сечениях входных патрубков,

соответствующей расходу воздуха через модель, и постоянство статического давления, равного давлению окружающей среды на срезе выходных патрубков. Течение у поверхностей тракта теплоносителя описывалось с использованием пристеночных функций. Число конечных элементов в моделях составляло около $10 \cdot 10^6$.

3. Результаты экспериментов и численного моделирования

С помощью метода измерения цилиндрическим зондом получено распределение скорости на входе в активную зону в двух направлениях. Первое расположено по диаметру модели на расстоянии 20 мм от торца входной решетки, второе смещено на 42,6 мм и проходит между трубами дефлектора (от решетки на расстоянии 15 мм). Измеренное и рассчитанное распределение скоростей приведено на рисунке 3. Распределения соответствуют расходу воздуха на входе в модель $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ (температура потока $30 \text{ }^\circ\text{C}$).

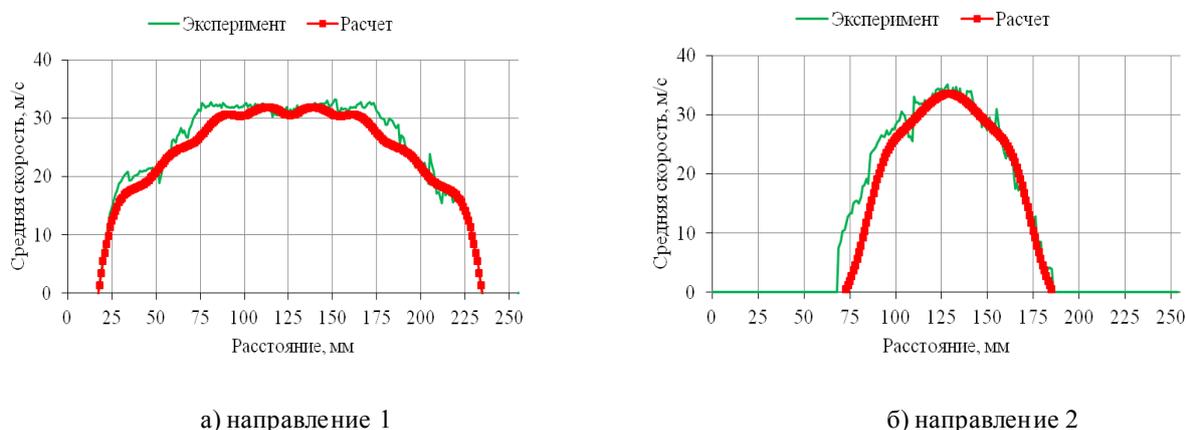


Рис. 3 – Распределение скорости на входе в активную зону

На рисунке 4 приведено измеренное распределение статического давления в кольцевом канале и в активной зоне.

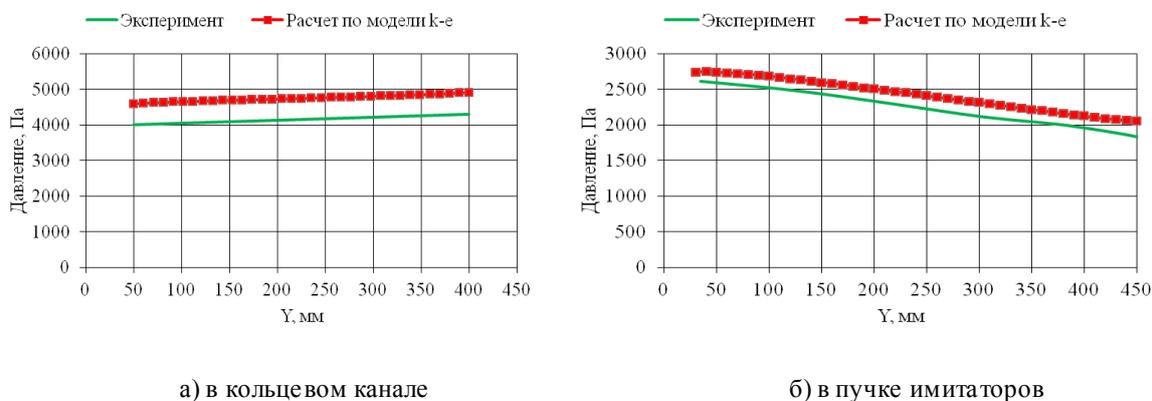


Рис. 4 – Распределение статического давления в модели №1

Экспериментальные и расчетные значения скоростей близки для участков на входе потока во входную решетку модели активной зоны. Расчетные и экспериментальные результаты совпадают в пределах 5-6 %.

На рис. 4 представлены экспериментальные и расчетные распределения статического давления в кольцевом канале и в имитаторе активной зоны. Их сравнение показывает, что расчетное статическое давление превышает экспериментальное не более, чем на 15 %.

Из результатов экспериментов и расчетов следует, что полуэллиптический раздаточный коллектор создает на входе в тракты имитатора активной зоны неравномерное распределение осевой скорости потока при пористости входной решетки порядка 0,27.

Полученные данные показывают, что использованная стандартная $k - \epsilon$ модель турбулентности позволяет количественно правильно (с погрешностью 5-10 %) описать особенности течения в трактах коллекторов модели. Отмеченное явилось основанием анализов структуры потока в трактах на основе результатов численного моделирования.

Выполнено численное исследование распределений средней скорости, пульсаций средней скорости и статического давления перед входом в активную зону для пористости 0,1, 0,25 и 0,5. Средняя скорость в подводящих патрубках была нормальна к сечению патрубка, равномерной и равнялась 68 м/с. Расчетная температура 35,5 °С.

На рисунке 5 представлены расчетные распределения векторов средней скорости потока в напорном коллекторе и на входе в тракты пучка стержней модели при разной пористости входной решетки.

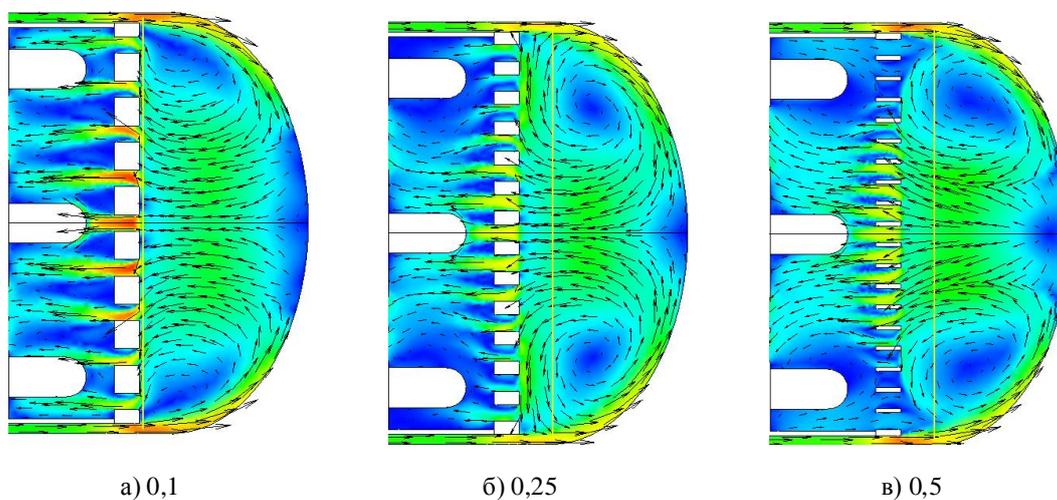
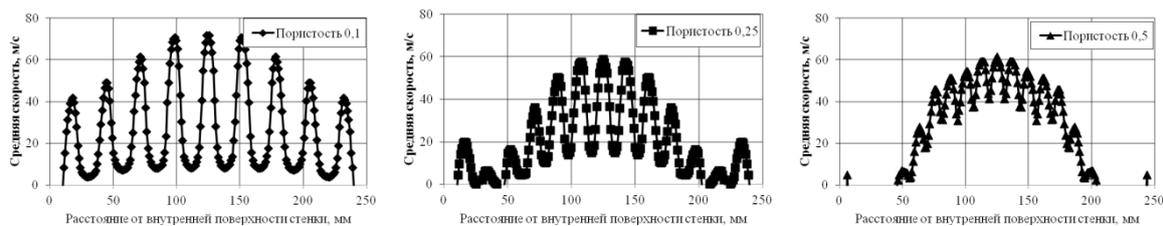


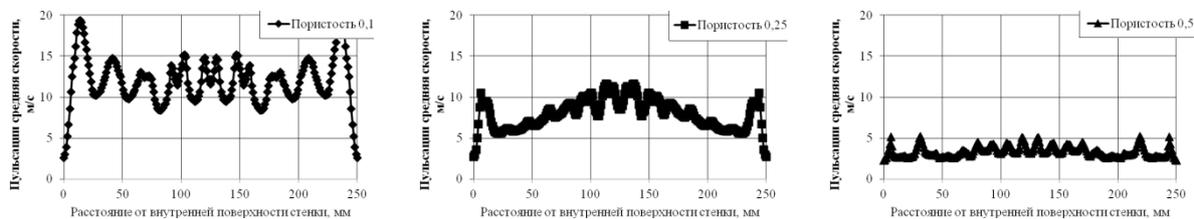
Рис. 5. Векторы скорости течения в напорных коллекторах

Поток из кольцевого тракта создает в свободном пространстве коллектора торообразный вихрь, скорости в котором зависят от расположения отверстий входной решетки. Вихревое течение на периферии коллектора приводит к снижению скорости потока в периферийных трактах модели активной зоны. При низкой пористости входной решетки происходит растекание потока перед входной решеткой, при высокой пористости основная масса потока идет в центральной части решетки.

Значения средней скорости потока и турбулентных пульсаций скорости, давления на входе в решетку макета активной зоны (рисунок 6) показывают, что пористость входной решетки изменяет распределение расхода потока по сечению имитатора активной зоны: скорости в центральной части оказываются большими, чем на периферии. Уровень пульсаций скорости, определенный как $\sqrt{\frac{2k}{3}}$, составляет от 4 до 30 % от средней скорости потока, что отражает особенности формирования течения в распределительных цилиндрических трактах дефлекторов.



а) распределение средней скорости на расстоянии 2 мм от входной решетки



б) распределение пульсаций скорости на расстоянии 2 мм от входной решетки

Рис.6. Значения средней скорости и турбулентных пульсаций скорости перед входной решеткой

Анализ характеристик течения в напорном коллекторе при входных решетках разной пористости позволяет заключить, что при низкой пористости удается приблизить расходы в центральной части потока и на периферии, однако при этом генерируются высокие пульсации скорости вплоть до 40 % от средней. Низкая пористость решетки ведет к тому, что подводимый поток течет в центральной части, но при этом пульсации скорости составляют низкие величины порядка 5 % от средней скорости. Решетка с пористостью 0,25 может оказаться наиболее приемлемой как по условию равномерности распределения расхода, так и по уровню пульсаций скорости.

Для распределения давления по тракту модели с разными входными решетками было получено, что коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) от входа в напорный коллектор до выхода и решеток для пористости 0,1, 0,25 и 0,5 составляет соответственно 4,55, 2,76 и 2,09, Перепады полного давления на моделях составили соответственно 23455, 18634 и 16842 Па.

Заключение

Полученные результаты показывают, что входные решетки с пористостью 0,25 позволяют обеспечить относительное выравнивание расхода теплоносителя

непосредственно на входе в активную зону, что при равномерном в сечении энерговыделении обеспечивает снижение уровня температур твэлов. Рассмотренные варианты конструктивного решения входной решетки позволяют выбрать конструкцию решетки, а заодно и активной зоны, по параметру пористости с целью решения задачи уменьшения гидравлических потерь в трактах теплоносителя, снижения уровня пульсационных составляющих потока в активной зоне и протяженности начального участка стабилизации течения.

Использование программного комплекса ANSYS CFX v 14.0 и стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности позволяет прогнозировать гидравлические характеристики трактов теплоносителя, распределения скорости соответствующие экспериментальным результатам с погрешностью 5...10 %.

Список литературы

1. Драгунов Ю.Г. Разработка реакторной установки для модуля мегаваттного класса // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 1. С. 4-6.
2. Пилотируемая экспедиция на Марс / под ред. А.С. Коротеева. М.: Российская академия космонавтики им. К.Э. Циолковского, 2006, 320 с.
3. Драгунов Ю.Г., Логинов С.А., Безруков Ю.А. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов с ВВЭР. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 255 с.
4. Крапивцев В.Г., Кудрявцев О.В., Солонин В.И. Моделирование течения на входе в активную зону реакторов ВВЭР // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 2. С. 70-79.
5. Марков П.В., Зенин В.В. Численное моделирование течения теплоносителя в подводящем тракте водо-водяного реактора // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 4. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/719764.html> (дата обращения 01.05.2015).
6. Резепов В.К., Денисов В.П., Кирилук Н.А., Драгунов Ю.Г., Рыжов С.Б. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 333 с.
7. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 14. ANSYS, Inc., 2012. 257 p.
8. Service Manual DISA Elektronik a/s DK-2740 Scovlunde. DISA Information Department, 1975. 66 p.
9. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
10. Ханжонков В.И. Аэродинамические характеристики кольцевых струй, натекающих на экран // Труды ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. Вып. № 27. Промышленная аэродинамика. М.: Машиностроение, 1966. С. 145-179.
11. Versteeg Н.К., Malalasekera W. An introduction to computational fluid Dynamics. The Finite Volume Method. England: Longman & Technical, 1995. 267 p.

A Collector Geometry Impact on the Coolant Flow Distribution in the Reactor Model Core

A.A. Satin^{1,*}, V.I. Solonin¹

* satin86@inbox.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: pressure collector, aerodynamic experiment, computational hydrodynamics

In creating the reactor facility for the transport and energy module of a megawatt class the important task is to optimize a coolant flow path, i.e. to provide a moderate flow resistance and uniform distribution of a coolant. A kind of the chosen collector design to supply coolant significantly contributes to hydraulic losses, in particular, the porosity of the inlet lattice which may lead to uneven coolant rate at the inlet, flow pulsations, and hydraulic losses.

For the first time in domestic practice the work **examines** an impact of the inlet lattices geometry on the averaged and pulsating flow both in a hemispherical collector and at the core inlet to the model paths of a reactor gas-cooled coolant, and gives advices on optimization of collector paths of the coolant flow.

The paper presents the results of experiments carried out on the gas dynamic model of the coolant paths containing the inlet lattices of different porosity. It offers a numerical simulation of the flow in the two-parameter model using k- ϵ turbulence model and ANSYS CFX v14.0 software package and demonstrates a compliance of experimental data with numerical results.

The obtained results show that the inlet lattice with a porosity of 0.25 allows relative leveling of the coolant flow directly at the core inlet, which for a uniform cross-sectional energy release reduces temperature of fuel elements. The considered options of design solutions allow you to select the inlet lattice structure, and the core, as well, according to the porosity parameter to solve the problem of reducing hydraulic losses in the coolant paths, reducing pulsating components of the flow in the core and length of the initial portion of flow stabilization.

References

1. Dragunov Yu.G. Reactor unit for megawatt propulsion-power module. *Atomnaya energiya*, 2012, vol. 113, no. 1, pp. 4-6 (English version of journal: *Atomic Energy*, 2012, vol. 113, iss. 1, pp. 1-3. DOI: [10.1007/s10512-012-9586-6](https://doi.org/10.1007/s10512-012-9586-6)).
2. Koroteev A.S., ed. *Pilotiruemaya ekspeditsiya na Mars* [Manned expedition to Mars]. Moscow, Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky Publ., 2006, 320 p. (in Russian).

3. Dragunov Yu.G., Loginov S.A., Bezrukov Yu.A. *Ekspertimental'noe obosnovanie teplogidravlicheskoj nadezhnosti reaktorov s VVER* [Experimental substantiation is thermal-hydraulic reliability of WWER reactors]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 255 p. (in Russian).
4. Krapivtsev V.G., Kudryavtsev O.V., Solonin V.I. Modeling of Flow at the Core Inlet of VVER-type Reactors. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineerin*, 2012, no. 2, pp. 70-79. (in Russian).
5. Markov P.V., Zenin V.V. Numerical simulation of coolant flow in inlet tract of water-water reactor. *Molodezhnyi nauchno-tehnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2014, no. 4. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/719764.html> , accessed 01.05.2015. (in Russian).
6. Rezepov V.K., Denisov V.P., Kiriluk N.A., Dragunov Yu. G., Rizhov S.B. *Reaktory VVER-1000 dlya atomnykh elektrostansiy* [Reactors Water-Water Energetic Reactor-1000 for nuclear energy plants]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 333 p. (in Russian).
7. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 14. ANSYS, Inc., 2012. 257 p.
8. Service Manual DISA Elektronik a/s DK-2740 Scovlunde. DISA Information Department, 1975. 66 p.
9. Zhukauskas A.A. *Konvektivnyy perenos v teploobmennikakh* [Convective mass transfer in heat exchangers]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 472 p. (in Russian).
10. Khanzhonkov V.I. Aerodynamic characteristics of ring jets accumulating on screen. *Trudy TsAGI im. prof. N.E. Zhukovskogo. Vyp. № 27. Promyshlennaya aerodinamika* [Proc. of Central Aerohydrodynamic Institute. Iss. 27. Industrial aerodynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966, pp. 145-179. (in Russian).
11. Versteeg H.K., Malalasekera W. *An introduction to computational fluid Dynamics. The Finite Volume Method*. England, Longman & Technical, 1995. 267 p.