

УДК 532.542.4

М.И. Ершова<sup>1</sup>, А.В. Шилов<sup>2</sup>, Д.Н. Солнцев<sup>1</sup>**РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ  
В РАЗДАЮЩЕМ КОЛЛЕКТОРЕ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова<sup>2</sup>

Исследованы варианты конструктивного исполнения раздающего коллектора энергетических установок. Проведен анализ результатов расчетных исследований, методика которых базируется на использовании CFD-кода ANSYS-CFX и расчетной программы Piping Systems Fluid Flow 3. Выполнено численное моделирование процесса течения теплоносителя в разных конструкциях раздающего коллектора, исследовано распределение расхода теплоносителя и его влияние на температурные режимы работы элементов теплообменного оборудования. Получены гидравлические характеристики разных вариантов конструктивного исполнения раздающего коллектора, выполнено их сопоставление. Сделана оценка возможности использования нового варианта компоновки раздающего коллектора.

*Ключевые слова:* раздающий коллектор, энергетическая установка, гидравлические характеристики, CFD-код, численное моделирование.

В условиях тенденции к уменьшению размеров энергетических установок, связанных с расширением области использования атомной энергии, становится актуальным рассмотрение вопросов компактности элементов реакторных установок, в том числе – коллекторов. В настоящей работе представлено исследование нового варианта конструктивного исполнения раздающих коллекторов.

Существующие теоретические исследования и экспериментальные данные об особенностях течения жидкости в раздающих коллекторах носят разрозненный характер и учитывают только отдельные факторы, влияющие на гидравлические характеристики. В технической литературе отсутствует анализ распределения расхода теплоносителя (полей скоростей) в разных коллекторах. Следует обратить внимание, что анализ гидродинамики потока теплоносителя необходим для определения температурных режимов работы элементов теплообменного оборудования, которые непосредственно влияют на надежность и энергетическую эффективность работы ядерных энергетических установок – реакторов и тепловых электрических станций.

Оптимальный режим работы теплообменных устройств предполагает, что теплопередача от каждого теплопередающего элемента к теплоносителю должна быть наибольшей при исключении возможности превышения максимально допустимой температуры поверхности. Надежный теплосъем возможно осуществить при условии наличия данных о гидравлических характеристиках элементов трактов теплоносителя и, в частности, раздаточных коллекторов.

В настоящее время существуют классические и хорошо изученные конструкции коллекторов: раздающие и собирающие коллекторы переменного и постоянного сечения с геометрически линейно расположенными ответвлениями, цилиндрические коллекторы, напорные камеры теплообменников. Гидравлические характеристики первых были рассмотрены и подробно описаны И.Е. Идельчик [1]. Исследованием цилиндрических коллекторов, напорных камер теплообменников занимались российские ученые Г.А. Филиппов, А.Ю. Дубоносов, Б.Н. Габрианович [2-4]. Вместе с тем, анализу гидравлических характеристик других конструктивных исполнений коллекторов в специальной литературе уделяется недостаточное внимание.

В связи со стремлением к экономии пространства, компактности и, соответственно, снижению металлоемкости, необходимо рассмотреть новое конструктивное исполнение раздающего коллектора. Его классический вариант имеет постоянное значение проходного сечения в направлении от опускной трубы к дальнему от нее соплу и предполагает последовательную раздачу теплоносителя в сопла [1]. Конструктивными отличиями нового исполнения являются переменное значение проходного сечения в направлении от опускной трубы к дальнему от нее соплу, а также уменьшенный за счет этого горизонтальный габаритный размер коллектора. В новом варианте проходное сечение коллектора у основания опускной трубы соответствует проходному сечению классического варианта, а в наиболее широком месте в 2 раза превышает проходное сечение классического варианта. В результате раздача воды на дальние сопла происходит не последовательно, а параллельно.

Цель исследования – проведение расчетного анализа влияния конструктивного исполнения коллектора на теплофизические параметры теплообменных устройств, на которые подается расход теплоносителя с данного коллектора при последовательном подключении.

В соответствии с указанной целью было проведено сравнение гидравлических характеристик трех вариантов исполнения коллектора: первого варианта «симметричный новый», представленного на рис. 1, второго варианта «симметричный классический» (рис. 2) и третьего варианта исполнения коллектора «несимметричный» (рис. 3), совмещающего в себе «симметричный новый» и «симметричный классический» варианты с разных сторон от опускной трубы.

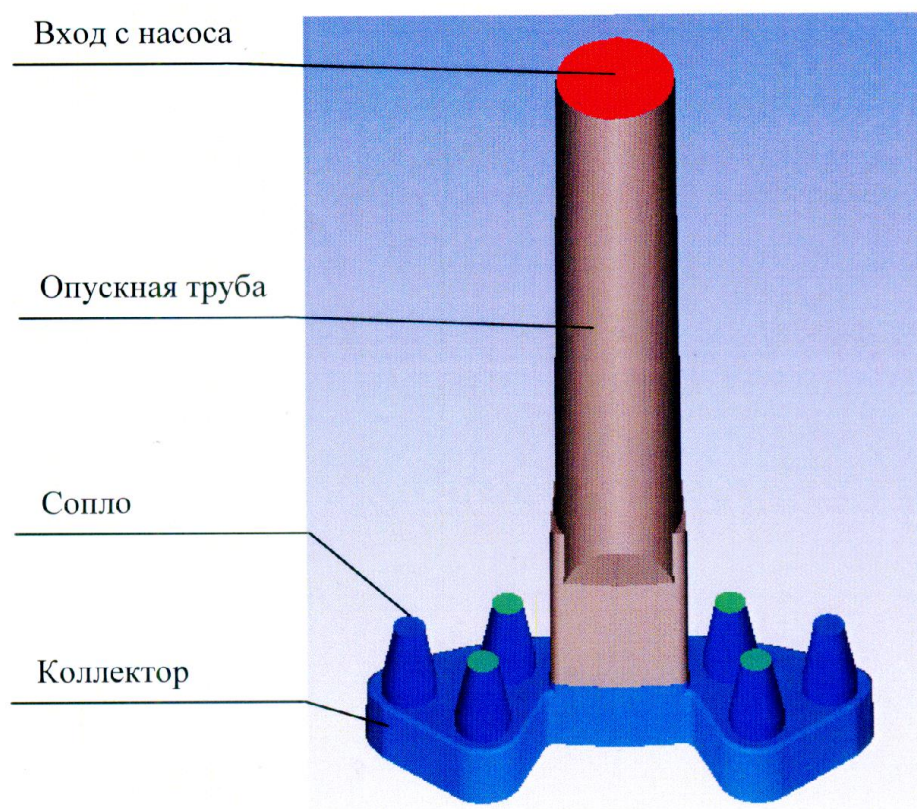


Рис. 1. «Симметричный новый» вариант исполнения раздающего коллектора

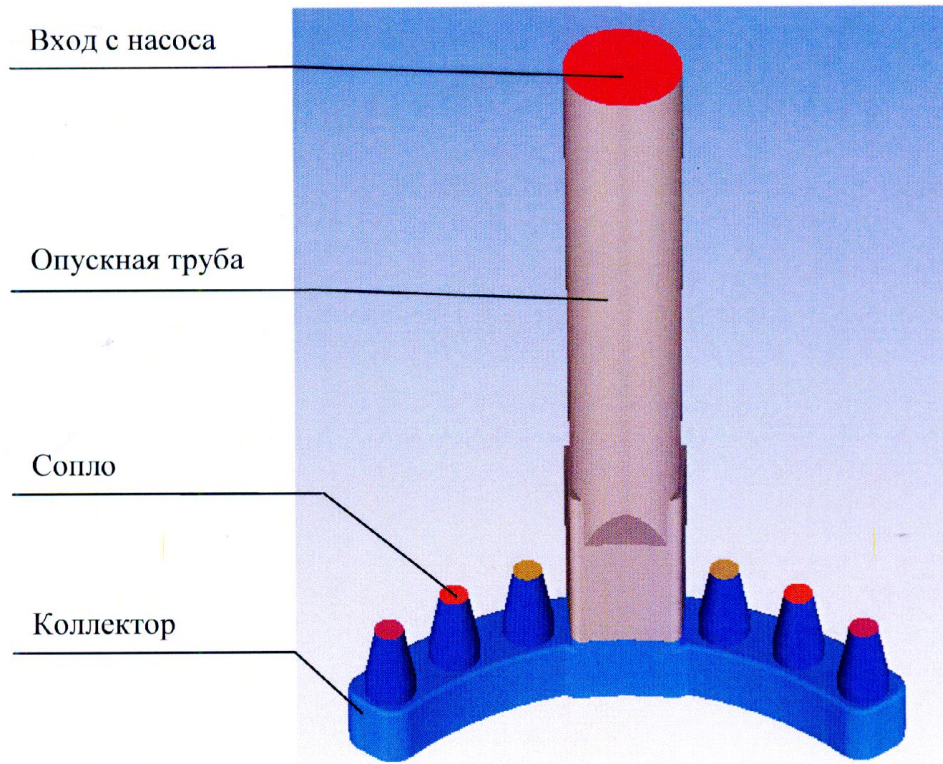


Рис. 2. «Симметричный классический» вариант исполнения раздающего коллектора

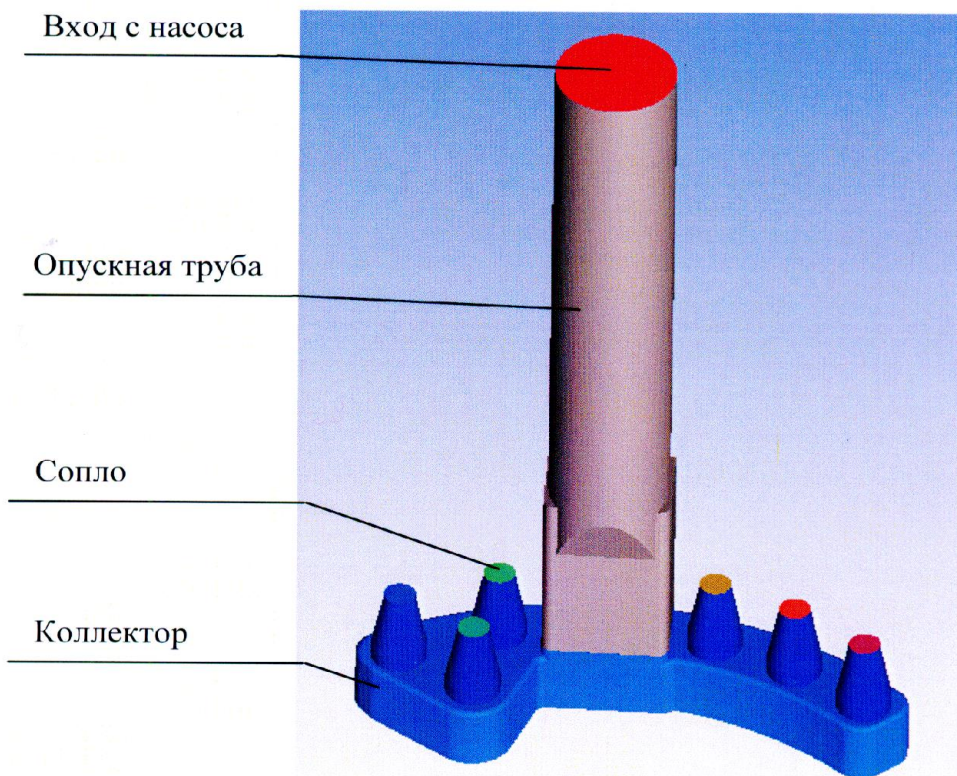


Рис. 3. «Несимметричный» вариант исполнения раздающего коллектора

Гидравлический расчет коллектора был произведен с использованием программ Piping Systems Fluid Flow 3 и CFD-кода ANSYS-CFX.

Программное средство Piping Systems Fluid Flow 3 предназначено для проведения изотермических и неизотермических гидравлических расчетов. Для осуществления расчета была разработана расчетная схема, представленная на рис. 4.

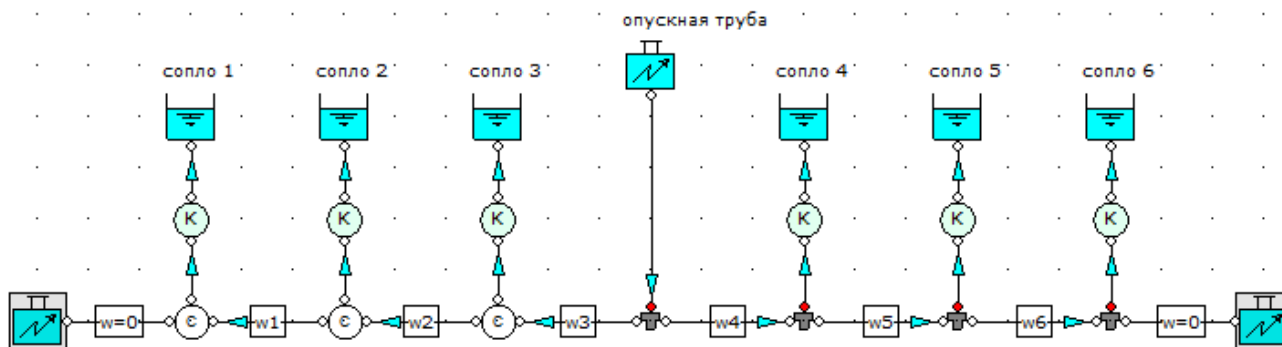


Рис. 4. Расчетная модель в Piping Systems Fluid Flow 3

Согласно алгоритму программы Piping Systems Fluid Flow 3, расходы и гидравлическое сопротивление участков (веток) гидравлической сети произвольной структуры при заданной температуре теплоносителя и заданных гидравлических характеристиках данных участков, определяются из уравнений, составленных на основании первого и второго законов Кирхгофа:

$m - 1$  уравнений баланса расходов в узлах (в сети всего  $m$  узлов) (1):

$$\sum_i G_{i,j} + q_j = 0 \quad (1)$$

$n$  уравнений перепада давления на ветках (в сети всего  $n$  веток) (2):

$$\sum_i \Delta p_{i,k} = 0 \quad (2)$$

где  $G_{i,j}$  – расход теплоносителя через  $i$ -ю ветку, втекающего или вытекающего из  $j$ -го узла, кг/с;  $q_j$  – источник или сток теплоносителя в  $j$ -м узле, кг/с;  $\Delta p_{i,k}$  – перепад давления на  $i$ -й ветке  $k$ -го контура, Па.

Гидравлическое сопротивление расчетного участка определяется по зависимости (3):

$$\Delta P = k_{зудр} \cdot \left( \sum \xi_m + \lambda_{mp} \cdot \frac{L}{d_2} \right) \cdot \frac{W^2}{2 \cdot \nu} \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

где  $k_{зудр}$  – коэффициент запаса на неучтенные потери ( $k_{зудр} = 1$ );  $\xi_m$  – коэффициенты местных сопротивлений, определяемые по рекомендациям;  $\lambda_{mp}$  – линейный коэффициент сопротивления трения;  $L$  – длина участка, м;  $d_2$  – гидравлический диаметр, м;  $W$  – скорость теплоносителя на участке, м/с;  $\nu$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг.

Исходные данные для гидравлического расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Исходные данные для гидравлического расчета

Наименование параметра	Значение
Рабочая среда	вода
Температура, °С	158
Давление, МПа	18,5
Расход на коллектор, кг/с	150

Полученные результаты для «симметричного нового» варианта конструкции коллектора представлены в табл. 2. Обозначения участков приведены в соответствии с рис. 4.

Таблица 2

## Результаты гидравлического расчета для «симметричного нового» варианта конструкции коллектора

Наименование параметра	Значение					
	Сопло 1	Сопло 2	Сопло 3	Сопло 4	Сопло 5	Сопло 6
Участок						
Расход, кг/с	25,99	24,89	24,12	24,12	24,89	25,99
Скорость на выходе, м/с	4,5	4,3	4,2	4,2	4,3	4,5
Участок	w1	w2	w3	w4	w5	w6
Скорость, м/с	1,8	3,5	5,5	5,5	3,5	1,8

Полученные результаты для «симметричного классического» варианта конструкции коллектора представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Результаты гидравлического расчета для «симметричного классического» варианта конструкции коллектора

Наименование параметра	Значение					
	Сопло 1	Сопло 2	Сопло 3	Сопло 4	Сопло 5	Сопло 6
Участок						
Расход, кг/с	25,37	25,36	24,27	24,27	25,36	25,37
Скорость на выходе, м/с	4,4	4,4	4,2	4,2	4,4	4,4
Участок	w1	w2	w3	w4	w5	w6
Скорость, м/с	1,8	3,6	5,4	5,4	3,6	1,8

Полученные результаты для «несимметричного» варианта конструкции коллектора представлены в табл. 4.

Таблица 4

## Результаты гидравлического расчета для «несимметричного» варианта конструкции коллектора

Наименование параметра	Значение					
	Сопло 1	Сопло 2	Сопло 3	Сопло 4	Сопло 5	Сопло 6
Участок						
Расход, кг/с	25,79	24,93	24,09	24,31	25,43	25,45
Скорость на выходе, м/с	4,5	4,3	4,2	4,2	4,4	4,4
Участок	w1	w2	w3	w4	w5	w6
Скорость, м/с	1,8	3,6	5,3	5,5	3,6	1,8

В соответствии с проведенным анализом полученных результатов расчета, проведенного в программе Piping Systems Fluid Flow 3, неравномерность распределения расходов в соплах раздающего коллектора составляет: для «симметричного нового» варианта  $\sim 7,2\%$ , для «симметричного классического» варианта  $\sim 4,3\%$ , для «несимметричного» варианта  $\sim 6,6\%$ .

На следующем этапе исследования был выполнен гидравлический расчет трех вариантов конструктивного исполнения коллекторов с использованием CFD-кода ANSYS – CFX. Данная программа предназначена для моделирования течения жидкостей, процессов тепло- и массообмена, в настоящее время активно используется в международной практике [5]. Для проведения гидравлического расчета раздающего коллектора в 3D постановке были созданы с помощью сеточного генератора ANSYS ICEM конечно-элементные модели, состоящие из опускной трубы, коллектора и выходных сопел. Конечно-элементная модель содержит  $\sim 500$  тыс. сеточных элементов. Общий вид модели, выполненный на примере «симметричного классического» варианта коллектора, представлен на рис. 5.

Для «несимметричного» варианта коллектора была определена оптимальная автоматическая разбивка конечно-элементной модели со структурой Hexa-Core, которая используется также для симметричных вариантов. При расчете применялась модель турбулентности  $k-\varepsilon$ .

Для симметричных вариантов конструкции была смоделирована  $\frac{1}{2}$  часть коллектора.

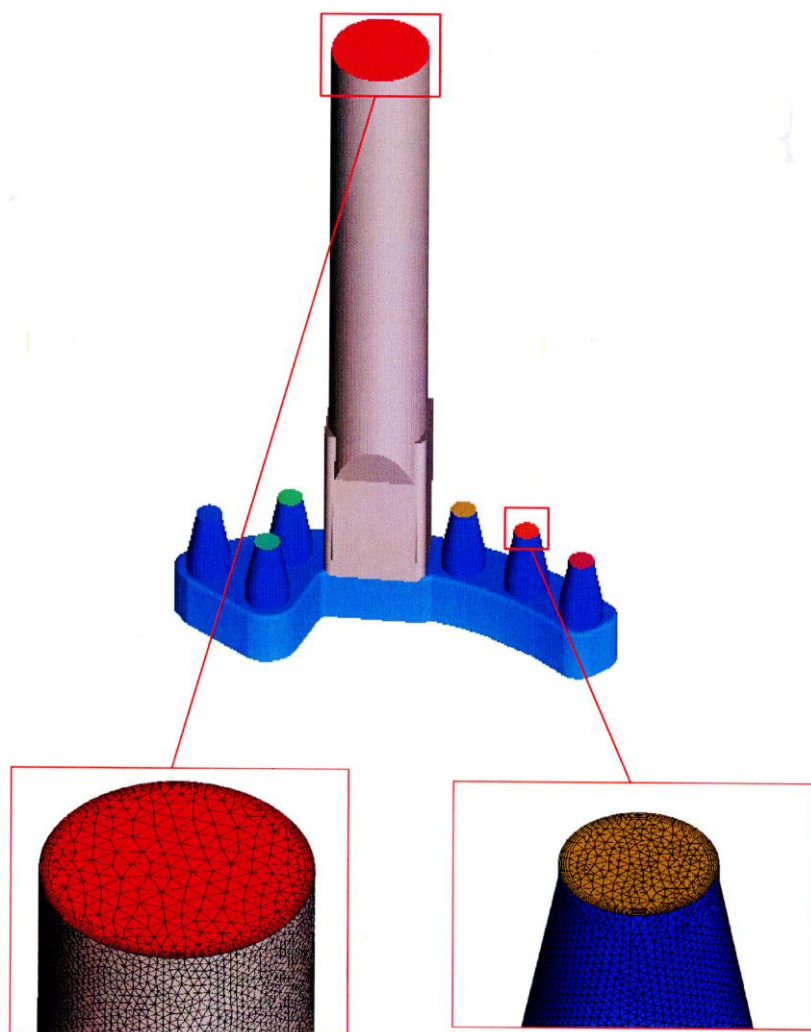


Рис. 5. Расчетная модель для «симметричного классического» варианта коллектора

Результаты расчета в 3D постановке представлены в табл. 5. Номера сопел соответствуют схеме, представленной на рис. 4.

$\Delta G_{\max}$  – максимальная неравномерность распределения расходов в соплах.

Таблица 5

## Результаты расчета в 3D постановке

Число элементов	Расход, кг/с						$\Delta G_{\max}$ , %
	Сопло 1	Сопло 2	Сопло 3	Сопло 4	Сопло 5	Сопло 6	
Симметричный новый коллектор							
515166	28,33	23,23	24,45	24,45	23,23	28,33	18
Симметричный классический коллектор							
506150	25,32	25,64	24,04	24,04	25,64	25,32	6,3
Несимметричный коллектор							
621984	27,36	22,71	24,7	24,15	26,53	25,59	17

В соответствии с проведенным анализом полученных результатов расчета, с использованием CFD-кода ANSYS – CFX, неравномерность распределения расходов в соплах раздающего коллектора составляет: для «симметричного нового» варианта ~18 %, для «симметричного классического» варианта ~6,3 %, для «несимметричного» варианта ~17 %.

Более подробно результаты расчетов показаны для «несимметричного» варианта коллектора, поскольку на примере данного варианта можно наглядно продемонстрировать характер распределения скоростей и давления, как при классическом расположении сопел (рис. 6 – правая сторона коллектора), так и при новом варианте расположения (рис. 6 – левая сторона коллектора). В симметричных вариантах характер распределения потоков аналогичен соответствующей половине несимметричного коллектора.

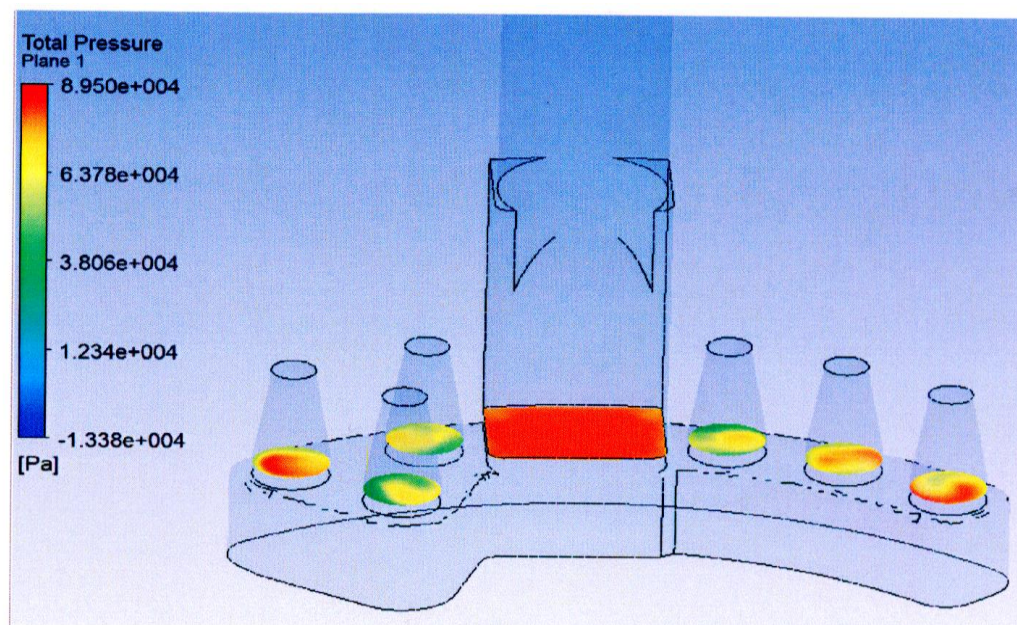


Рис. 6. Распределение давления на участках входа потока в сопла в «несимметричном» варианте коллектора

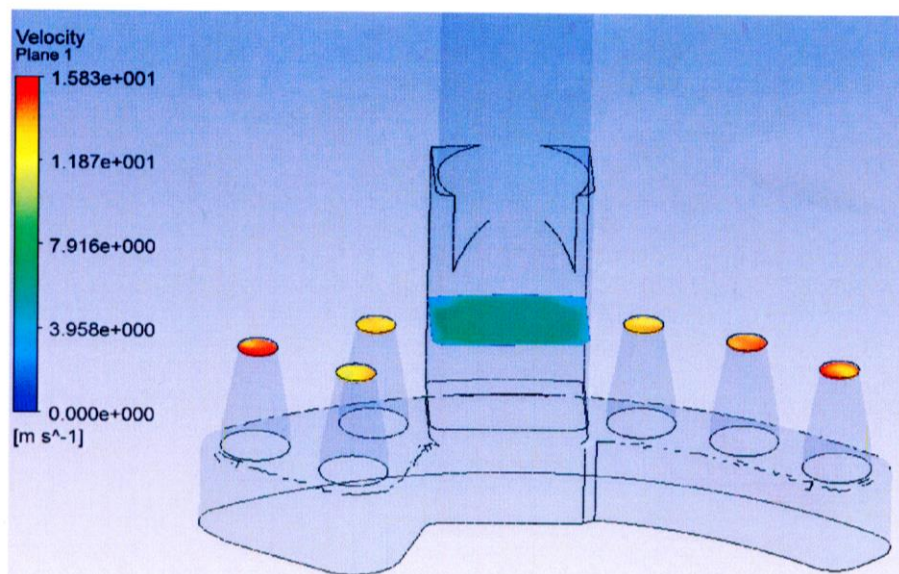


Рис. 7. Распределение скоростей на участке выхода потока из сопел в «несимметричном» варианте коллектора

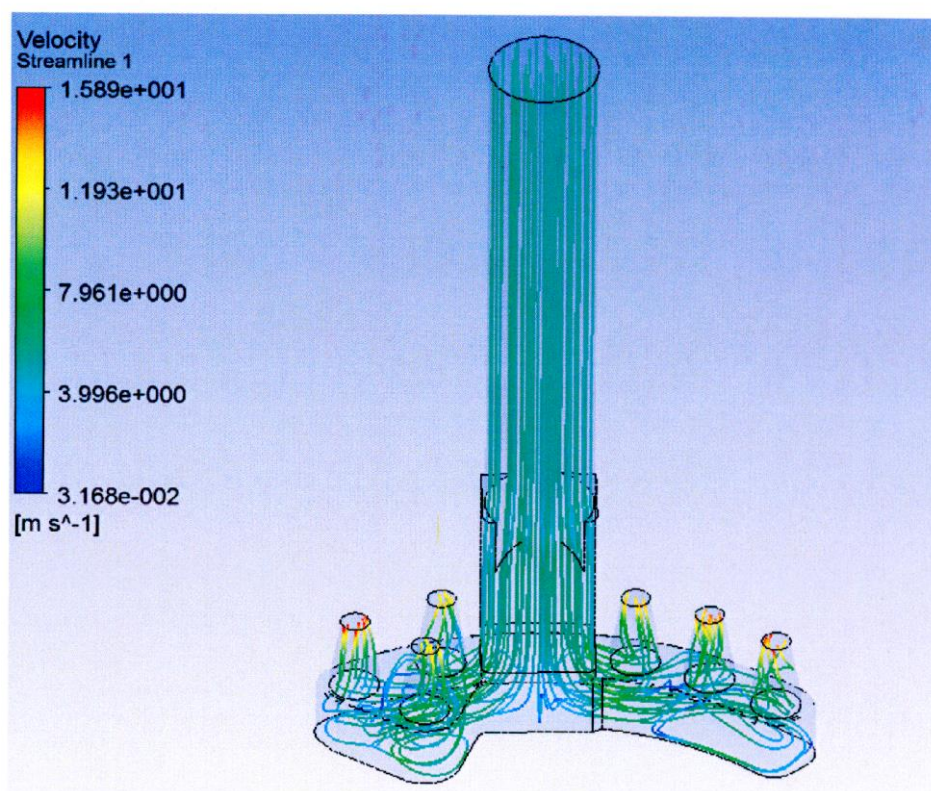


Рис. 8. Распределение скоростей в «несимметричном» варианте коллектора

Для оценки влияния неравномерности распределения расхода в соплах был выполнен тепловой расчет подогревателя высокого давления поверхностного типа. Целью теплового расчета является определение влияния неравномерности распределения расходов в соплах на выходные параметры питательной воды.

В результате проведенного теплового расчета были получены следующие данные:



- повышение расхода питательной воды с 25 до 28,33 кг/с (худший случай согласно 3D расчету «симметричного нового» варианта коллектора) приведет к снижению температуры питательной воды на выходе из подогревателей на 6,5 °С;
- повышение расхода питательной воды с 25 до 25,64 кг/с (худший случай согласно 3D расчету «симметричного классического» варианта коллектора) приведет к снижению температуры питательной воды на выходе из подогревателей на 0,6 °С;
- повышение расхода питательной воды с 25 до 27,36 кг/с (худший случай согласно 3D расчету «несимметричного» варианта коллектора) приведет к снижению температуры питательной воды на выходе из подогревателей на 5,7 °С.

Таким образом, по итогам проведенного анализа данных полученных из расчетов, проводимых в Piping Systems Fluid Flow 3 и в CFD-коде ANSYS-CFX, сделаны следующие выводы.

1. Представленный вариант коллектора «симметричный новый» является более компактным, что дает возможность уменьшения размеров реакторной установки. Численное моделирование процесса течения теплоносителя с использованием CFD-кода ANSYS – CFX в «симметричном новом» варианте исполнения раздающего коллектора показало возможность использовать данный коллектор в перспективных установках с учетом увеличения неравномерности расхода по сравнению с «симметричным классическим» на 11,7 %.

2. В соответствии с результатами теплового расчета повышение расхода питательной воды с 25 до 28,33 кг/с приведет к снижению температуры питательной воды на выходе из подогревателей на 6,5 °С.

3. В программе Piping Systems Fluid Flow 3, широко используемой для проведения гидравлических расчетов реальных систем трубопроводов, расчетную схему «симметричного нового» варианта коллектора возможно привести только к линейной схеме расположения сопел. Допущение в программе последовательного подключения сопел в коллекторе приводит к занижению значений неравномерности расхода теплоносителя. Соответственно, для проведения расчетов необходимо добавление в программу элемента – «коллектор» и верификация на реальных гидравлических сетях.

### Библиографический список

1. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
2. **Дубоносов, А.Ю.** Гидродинамика входных цилиндрических коллекторов теплообменных аппаратов теплоэнергетических установок / А.Ю. Дубоносов, А.М. Гапоненко. – Краснодар: Изд. Дом – Юг, 2013. – 124 с.
3. **Филиппов, Г.А.** Методика математического моделирования и анализ гидродинамики систем, содержащих засыпки и перфорированные перегородки, на основе вычислительного комплекса ANSYS / Г.А. Филиппов, Л.Э. Меламед, А.И. Тропкина // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2005. – № 11-12. – С. 64-79.
4. **Габрианович, Б.Н.** Исследование перемешивания теплоносителя в раздающих коллекторных системах быстрых реакторов и ВВЭР / Б.Н. Габрианович, В.Н. Дельнов // Атомная энергия. – 1994. – Т. 77. – Вып. 5. – С. 340-344.
5. **Gyimesi, M.** Application of the General Potential Formulation in the ANSYS Program / M. Gyimesi, D. Lavers, T. Pawlak, D. Ostergaard // IEEE Transactions on Magnetics. – 1993. – Vol.29. – P. 1345-1347.
6. **Imgrund, M.C.** ANSYS Verification Manual // Swanson Analysis Systems. Inc, 1992.

*Дата поступления  
в редакцию: 17.01.2020*

M.I. Ershova<sup>1</sup>, A.V. Shilov<sup>2</sup>, D.N. Solntsev<sup>1</sup>

## CALCULATED STUDY OF HYDRODYNAMICS OF THE HEAT FLOW IN THE DISTRIBUTING COLLECTOR

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>1</sup>  
Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering<sup>2</sup>

**Purpose:** the article explores the options for the design of the distributing collector of power plants.

**Methodology:** a numerical simulation of the process of flow of the coolant in different designs of the distributing collector was carried out, the distribution of the flow rate of the coolant and its effect on the temperature conditions of the elements of the heat exchange equipment were studied. The calculation method is based on the use of the ANSYS – CFX CFD-code and the Piping Systems Fluid Flow 3 calculation program.

**Results and their application:** as a result, the hydraulic characteristics of various options for the design of the distributing manifold were obtained, their comparison was performed. The possibility of using the new layout of the distribution manifold is estimated.

**Conclusions:** The presented version of the collector is more compact, which allows to reduce the dimensions of the reactor plant and makes it possible to use this collector in promising installations, taking into account the increase in the unevenness of the flow rate by 11.7 %. In the Piping Systems Fluid Flow 3 program, widely used for hydraulic calculations of real Piping Systems, the design scheme of the «symmetric new» version of the manifold can be reduced only to a linear nozzle layout. The assumption in the program of serial connection of nozzles in a collector leads to underestimation of values of unevenness of the expense of the heat carrier. Accordingly, for calculations it is necessary to add an element to the program – «collector» and verification on real hydraulic networks.

*Key words:* distributing collector, power plant, hydraulic characteristics, CFD-code, numerical simulation.