УДК 532.542:004.942

Расчётные исследования растекания теплоносителя в кольцевой камере реактора ВВЭР при радиальном вводе через патрубок

Ю.В. Юдов, С.Н. Румянцев, С.С. Чепилко

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

На основе расчёта простых тестов с помощью кода КОРСАР/CFD продемонстрировано анизотропное растекание теплоносителя в кольцевой камере реактора ВВЭР при радиальном вводе через патрубок. Поток распространяется по окружности кольцевой камеры в азимутальных направлениях. В осевом направлении камеры происходит запирание потока. В статье предлагается объяснение причины анизотропного растекания жидкости, формирующего трёхмерную картину течения в кольцевой камере реактора ВВЭР, которая, в свою очередь, определяет пространственное распределение температуры теплоносителя и концентрации борной кислоты на входе в тепловыделяющие сборки активной зоны.

Ключевые слова: реакторная установка, кольцевая камера, патрубок, расчётный код, расчётная сетка, вычислительная гидродинамика, растекание теплоносителя.

UDC 532.542:004.942

A numerical investigation in the behavior of coolant flow radially injected into the VVER reactor annulus via a pipe

Yu.V. Yudov, S.N. Rumyantsev, S.S. Chepilko

FSUE “Alexandrov NITI”, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

The KORSAR/CFD calculation of simple tests shows anisotropic behavior of coolant flow in the annulus space of the VVER reactor where it is radially introduced via an injection pipe. The flow spreads around the annulus circumference in azimuthal directions. In the longitudinal direction flow choking occurs. The reason for anisotropic spreading behavior is explained. A three-dimensional flow pattern in the VVER reactor annulus determines spatial distributions of the coolant temperature and boron concentration at the inlet of fuel assemblies.

Key words: reactor, annulus, injection pipe, computer code, computational mesh, computational fluid dynamics, coolant spreading

Введение

Результаты верификационных расчётов по коду КОРСАР/CFD режимов реакторных установок с ВВЭР при несимметричной работе петель теплообмена, когда напорная камера моделировалась в трёхмерном CFD приближении, демонстрируют анизотропное растекание теплоносителя в кольцевой области камеры [1–3]. Поступающие из патрубков потоки теплоносителя движутся по окружности (в азимутальных направлениях) в обе стороны, приобретая направление в нижнюю камеру при слиянии азимутальных потоков. В этом случае под патрубками ра-

ботающих петель образуются области стагнации потока. Данная картина течения подтверждается расчётами по коммерческому коду ANSYS CFX эксперимента с перемешиванием пробки конденсата при пуске циркуляционного насоса, проведенного на стенде ОКБ «ГИДРОПРЕСС» с моделью реактора ВВЭР-1000 [4, 5].

Анизотропное растекание оказывает заметное влияние на распространение возмущений температуры теплоносителя или концентрации борной кислоты через напорную камеру из холодных ниток петель в активную зону и, в конечном итоге, на распределение энерговыделения по тепловыделяющим сборкам активной зоны.

В настоящей работе с использованием упрощенных расчётных моделей кода КОРСАР/CFD проводится численный анализ картины течения теплоносителя в кольцевой камере при радиальном вводе через один патрубок. На основе анализа предлагается объяснение причин анизотропного растекания жидкости, которые определяются трёхмерными пространственными эффектами и не наблюдаются при двумерном моделировании.

Геометрические размеры в расчётных моделях и входная скорость жидкости в патрубок выбирались из соображений максимального соответствия условиям экспериментов на модели реактора ВВЭР-1000 в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» [3]. В расчётах использовалась алгебраическая модель турбулентности.

Двумерная постановка задачи

Расчётная область для двумерной постановки задачи приведена на рис. 1. Теплоноситель поступает через щелевой патрубок и растекается по изогнутому и прямому каналам, моделирующим горизонтальное и вертикальное сечения кольцевой камеры, соответственно. На входе в патрубок задавался расход (граница 1 на рисунке), а на выходе из каналов – атмосферное давление (границы 2, 3). Значение расхода соответствует средней скорости жидкости 2.1 м/с. В нормальном к плоскости растекания направлении использовались периодические граничные условия. Остальные границы представляли стенки каналов и патрубка.

Ось x декартовой системы координат направлена из кольцевой камеры в щелевой патрубок, ось y – вдоль прямого канала, ось z – перпендикулярно плоскости растекания жидкости. Ширина патрубка равна 0.17 м, ширина каналов камеры 0.038 м, длина 0.5 м, радиус закругления изогнутого канала 0.38 м. Декартовы расчётные ячейки в плоскости x, y имеют квадратную форму с длиной сторон $1.23 \cdot 10^{-3}$ м.

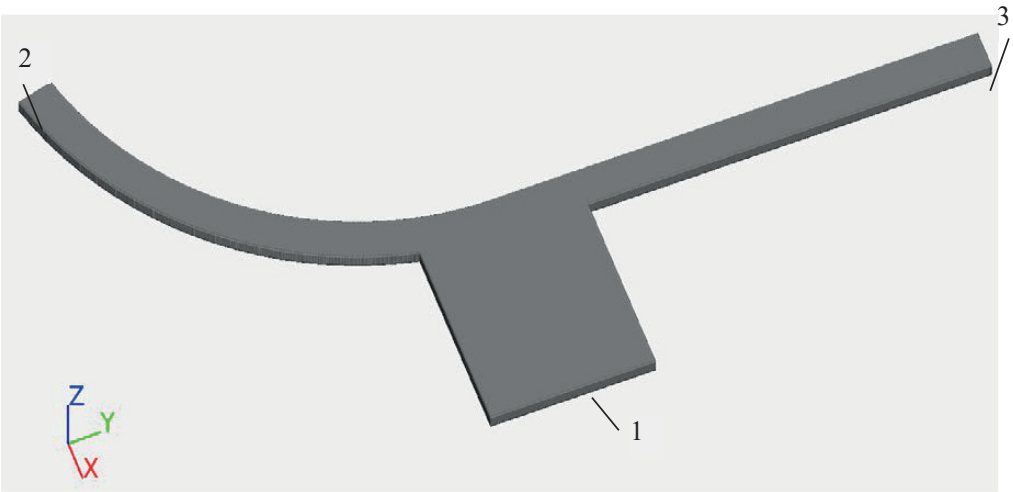

Рис. 1 – Область моделирования двумерной задачи

В результате расчёта для данной задачи было получено, что значение расхода через изогнутый канал на 9.3 % больше расхода через прямой канал. Разница расходов обусловлена отличием величин гидравлических сопротивлений в прямом и изогнутом каналах.

На рис. 2 и рис. 3 приведены расчётные линии тока и поля давления в каналах камеры, соответственно.

Из рис. 2 и рис. 3 отчетливо видно, что в прямом канале происходит отрыв потока и образование вихревой зоны на внешней стенке камеры вследствие положительного градиента давления при торможении потока по закону Бернулли [6]. В изогнутом канале зона отрыва по алгебраической модели турбулентности отсутствует.

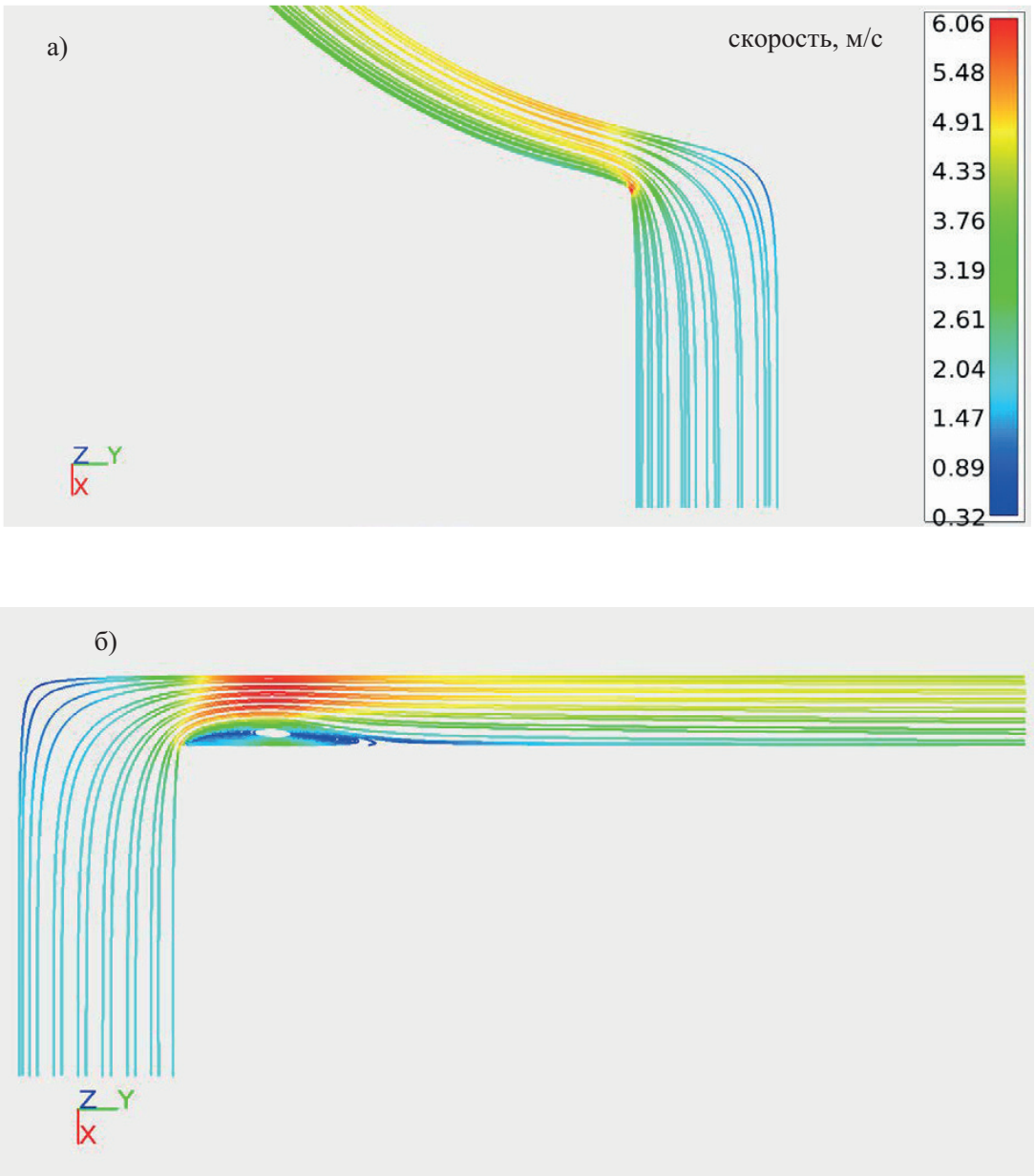

Рис. 2 – Поля скорости (линии тока):

а) изогнутый канал; б) прямой канал.

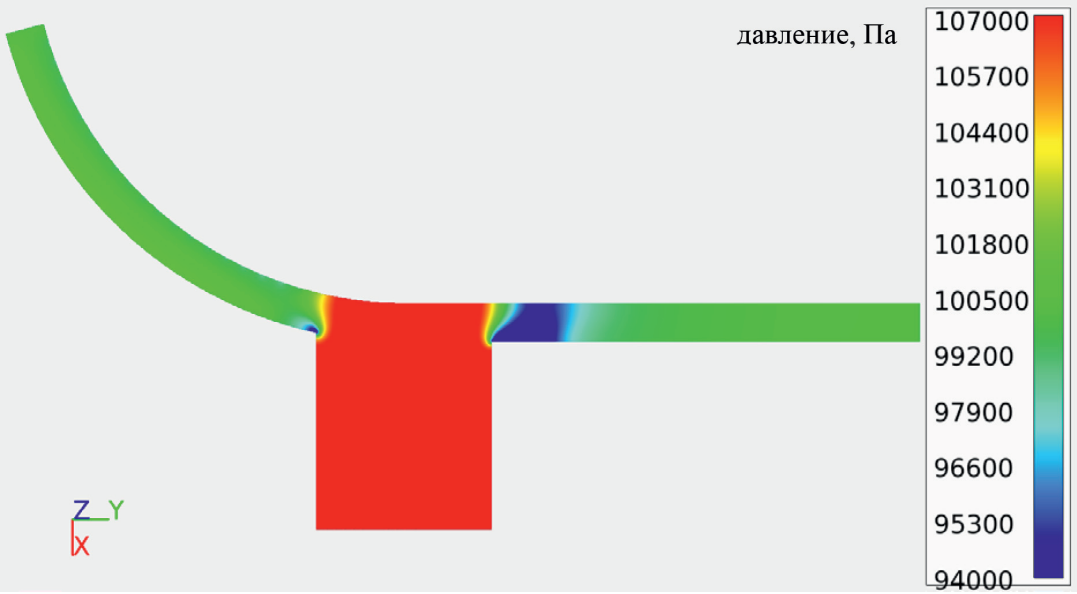

Рис. 3 – Поле давления

Трёхмерная постановка задачи

Расчётная область для трёхмерной постановки показана на рис. 4. В расчётной области представлен фрагмент кольцевой камеры в виде сектора. Радиус кольцевой камеры принят равным 0.38 м. Размеры сектора по окружности и по длине составляют 1 м. Ширина зазора между внутренней и внешней стенками равна 0.038 м.

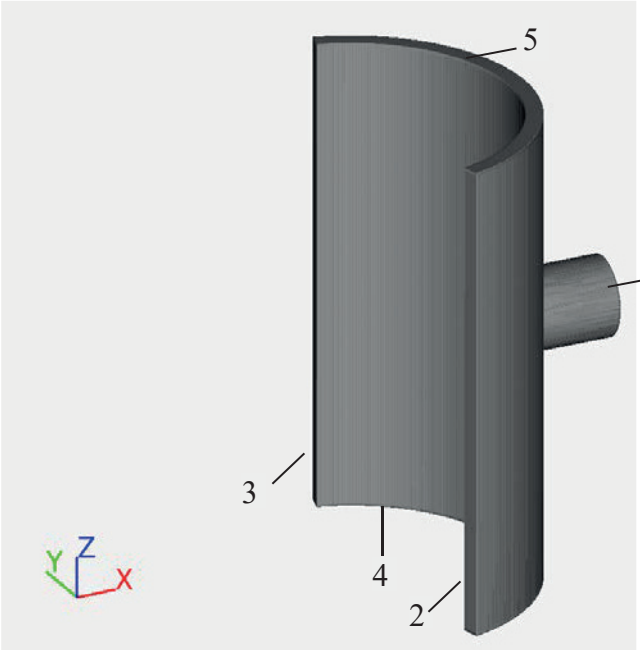

Рис. 4 – Область моделирования трёхмерной задачи

Теплоноситель поступает в камеру с расходом 47.5 кг/с (средней скоростью 2.1 м/с) через цилиндрический патрубок диаметром 0.17 м, расположенный в центре сектора на внешней стенке. На входе в патрубок задавался расход жидкости (граница 1). На выходных границах 2–5 фрагмента кольцевой камеры фиксировалось атмосферное давление.

Для учёта потерь давления при втекании жидкости через граничную грань из неподвижной среды в область моделирования давление корректировалось согласно закону Бернулли:

$$P_f = P_a - \rho \cdot \left(U_f^2\right)/2,$$

где: P_a – заданное атмосферное давление; P_f – давление среды на граничной грани; U_f – скорость среды на граничной грани; ρ – плотность среды.

Ось x декартовой системы координат направлена в патрубок, ось z – вдоль камеры (в продольном направлении). Начало системы координат расположено в точке пересечения оси патрубка и оси цилиндра кольцевой камеры. Расчётная сетка содержит 1.6 миллиона одинаковых расчётных ячеек. Декартовы ячейки имеют практически форму куба с длиной рёбер около $3 \cdot 10^{-3}$ м.

Результаты расчётов для изображенной на рис. 4 трёхмерной задачи демонстрируют качественно отличную от двумерной постановки картину растекания теплоносителя по кольцевой камере. На выходе из патрубка поток поступает в кольцевую камеру практически равномерно в радиальных направлениях (относительно оси патрубка). Однако далее растекание жидкости вдоль оси кольцевой камеры запирается, а в азимутальных направлениях по окружности усиливается. Через границы 2, 3 фрагмента камеры жидкость вытекает с расходом 51.5 кг/с. Через границы 4, 5 вдоль камеры теплоноситель затекает с расходом 4 кг/с. Данный факт проиллюстрирован на рис. 5 и рис. 6, где представлены поля скорости вблизи внутренней и внешней стенок и изменение площади проходного сечения кольцевой камеры вдоль линий тока.

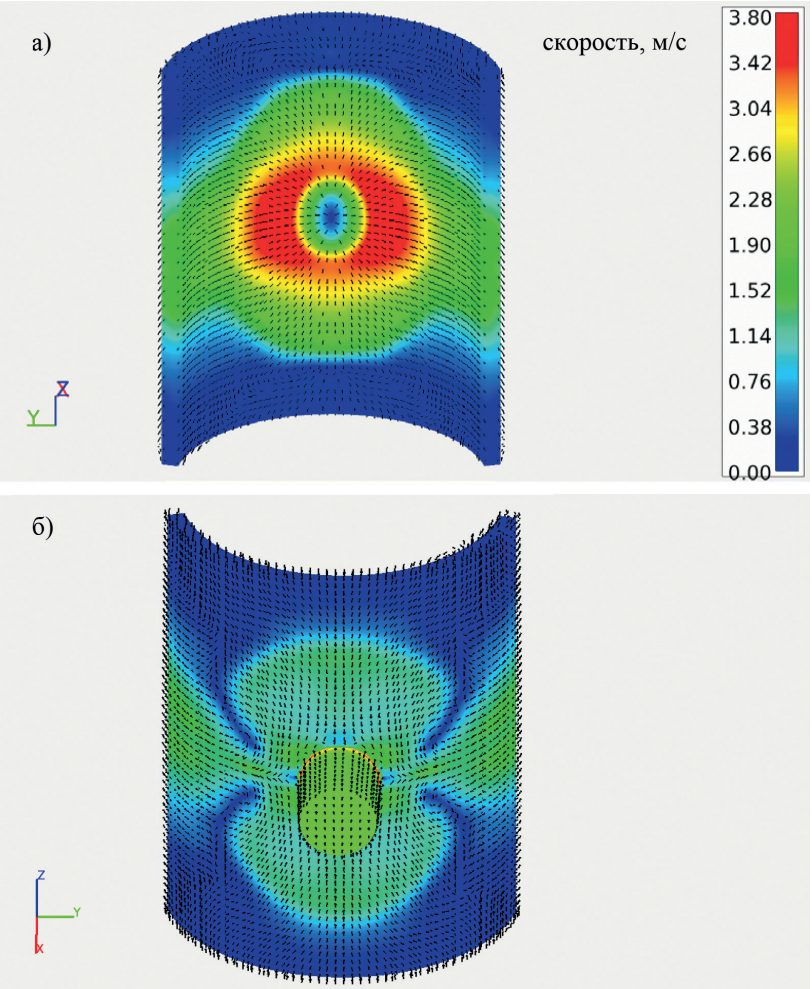

Рис. 5 – Поля скорости вблизи стенок кольцевой камеры радиусом 0.38 м: а) внутренняя; б) внешняя.

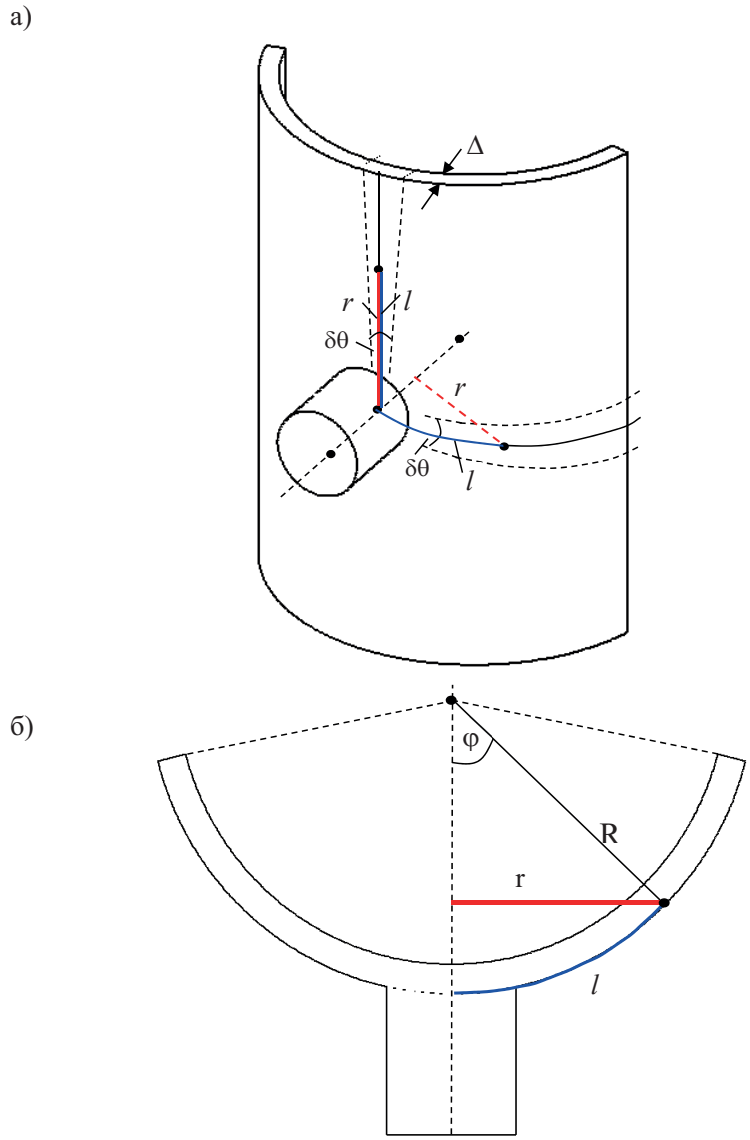

Рис. 6 – Изменение площади проходного сечения кольцевой камеры вдоль линий тока:

а) секторы растекания; б) сечение z = 0.

При удалении от патрубка скорость теплоносителя вдоль линий тока уменьшается вследствие увеличения площади проходного сечения. При этом градиент увеличения площади проходного сечения в близких к осевому направлениях камеры больше. Отношение градиентов вдоль оси z и вдоль кольца камеры составляет

$$\frac{1}{\cos(l / R)}, \qquad (1)$$

где

R – радиус кольцевой камеры;

l – длина по линии тока от оси патрубка.

Это отношение получено из следующих соображений. На рис. 6 а) выделены два сектора растекания жидкости с малым углом $\delta\theta$ вдоль камеры (сектор 1) и вдоль кольца (сектор 2). Обозначим через Δ ширину зазора камеры. Тогда возрастание площади проходного сечения S с увеличением радиуса r (от оси патрубка) можно записать в виде соотношения:

$$S = r \cdot \delta\theta \cdot \Delta . \qquad (2)$$

Для сектора 1:

$$r = l. \qquad (3)$$

Для сектора 2 (см. рис. 6 б))

$$r = \sin\varphi = R \sin(l/R). \qquad (4)$$

В предельном случае при $R \to \infty$ для сектора 2 значение $r \to l$.

Продифференцировав зависимости (3) и (4) по l получим искомый результат (1).

Гидравлическое сопротивление повышается при изменении радиального направления относительно оси патрубка от азимутального к продольному (осевому), что подтверждается результатами, приведенными в работе [6] и расчётами задачи в двумерной постановке.

Благодаря указанным выше двум факторам расход жидкости вдоль оси камеры к границам 4, 5 уменьшается, а вдоль кольца камеры к границам 2, 3 растет. В результате согласно закону Бернулли (с учётом потерь на трение) возникает градиент давления, который провоцирует перетечку теплоносителя от осевого направления к азимутальному. Данный процесс имеет положительную обратную связь, что вызывает стагнацию поступающего из патрубка потока вдоль оси камеры.

Следствием торможения потока в осевом направлении является положительный градиент давления, который создает условие для затекания жидкости через границы 4, 5 (рис. 4). На рис. 5 показано, что вдоль кольцевой камеры реализуется противоточное течение: поток около внутренней стенки, поступающий из патрубка, и поток через границы 4, 5 вблизи внешней стенки. Противоположные потоки от патрубка и через границы 4, 5 отклоняются в азимутальном направлении, увеличивая расход вытекания через границы 2, 3. Причем первый поток отклоняется на расстоянии порядка двух диаметров от патрубка, а второй – вблизи патрубка. Это хорошо видно из иллюстраций линий тока, проведенных из патрубка и из границы вдоль камеры, которые показаны на рис. 7.

При увеличении радиуса кольцевой камеры расходы жидкости через границы фрагмента камеры выравниваются. На рис. 8 представлена расчётная зависимость расхода через границу вдоль оси камеры от радиуса её кольца. Расход на рисунке приведен к половине расхода, поступающего в патрубок, а радиус нормирован на величину 0.38 м. Когда радиус становится больше 0.76 м, начинается вытекание жидкости через границы 4, 5.

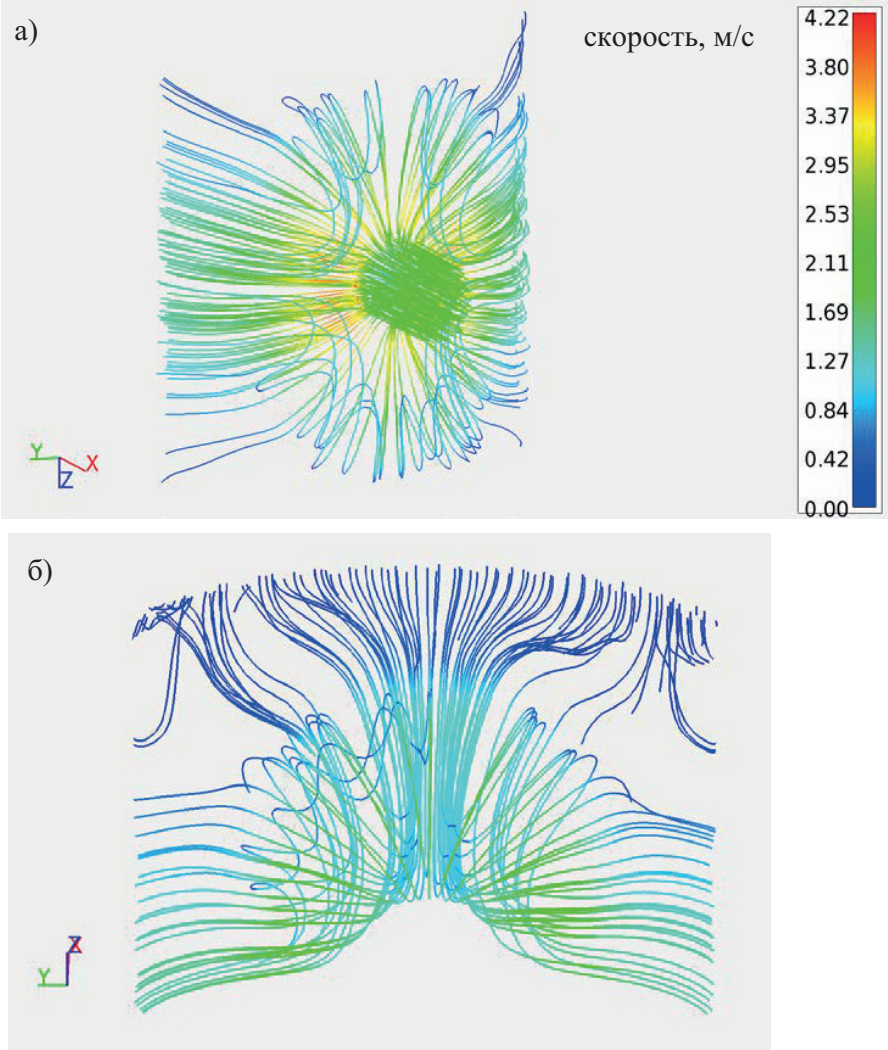

Рис. 7 – Расчётные линии тока жидкости:

а) из патрубка; б) из границы вдоль оси кольцевой камеры.

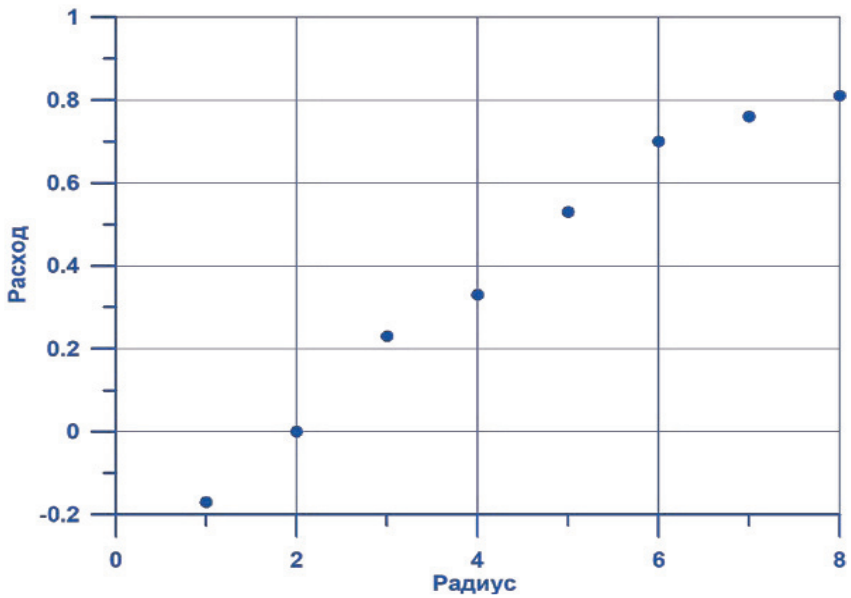

Рис. 8 – Зависимость расхода жидкости через границы вдоль камеры от радиуса её кольца

На рис. 9 показано поле скорости вблизи стенок кольцевой камеры радиуса 3.04 м. При этом радиусе растекание теплоносителя по внутренней стенке практически изотропно. Вдоль внешней стенки наблюдается втекание теплоносителя, вызванное расширением потока из патрубка и, соответственно, положительным градиентом давления вдоль линий тока. То есть выход теплоносителя из камеры осуществляется около внутренней стенки. Входящий в камеру поток жидкости движется к патрубку вблизи внешней стенки и добавляется к потоку от патрубка.

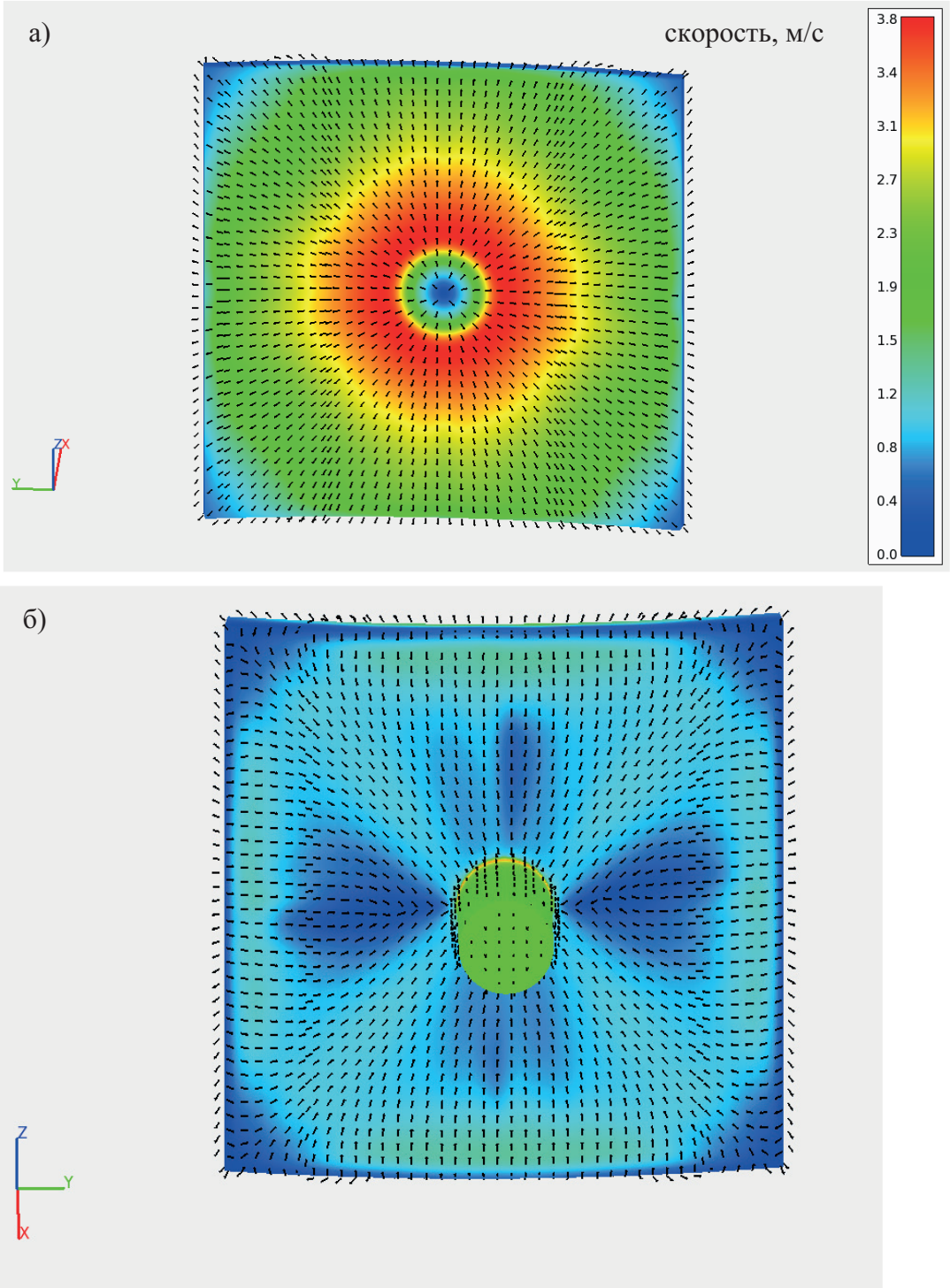

Рис. 9 – Поля скорости среды вблизи стенок кольцевой камеры радиусом 3.04 м: а) внутренняя; б) внешняя

Заключение

1. На основе расчётов тестовых задач по коду КОРСАР/CFD проведено исследование растекания теплоносителя в кольцевой камере при радиальном вводе через патрубок.
2. Результаты расчётов демонстрируют анизотропное растекание жидкости в кольцевой камере. Поступающий из патрубка поток теплоносителя движется в азимутальном направлении в обе стороны от патрубка. В осевом направлении камеры от патрубка образуется область стагнации потока.
3. Выявлено, что причиной такой картины течения в кольцевой камере являются различия градиента увеличения площади проходного сечения и гидравлического сопротивления в радиальных направлениях относительно оси патрубка. Градиент увеличения площади проходного сечения и гидравлическое сопротивление повышаются при изменении радиального направления от азимутального до осевого вдоль камеры. Происходит перетекание теплоносителя, вызывающее запирание потока вдоль оси камеры и развитие течения вдоль азимутального направления.
4. Показано, что при увеличении радиуса кольцевой камеры растекание приобретает изотропный характер.
5. Результаты работы важны для понимания сложных гидравлических процессов в напорной камере реакторов типа ВВЭР, влияющих на перемешивание теплоносителя.

Литература

1. Трёхмерное моделирование напорной камеры реактора ВВЭР-1000 в режиме с несимметричной работой петель с помощью расчётного кода КОРСАР/CFD / Ю.В. Юдов, И.Г. Петкевич, В.Г. Артемов, Д.С. Кастерин, С.Н. Румянцев // Теплоэнергетика. – 2019. – № 11. – С. 91–101.
2. *Юдов Ю.В.* Кроссверификация 1D – и 3D моделей напорной камеры реактора ВВЭР-1000 расчётного кода КОРСАР/CFD по режимам с несимметричной работой петель / Ю.В. Юдов, И.Г. Петкевич, В.Г. Артемов // Теплоэнергетика. – 2019. – № 12. – С. 97–104.
3. Расчёты по коду КОРСАР/CFD процессов перемешивания пробки конденсата при пуске циркуляционного насоса в модели реактора ВВЭР-1000 на стенде ОКБ «ГИДРОПРЕСС» / Ю.В. Юдов, С.Н. Румянцев, С.С. Чепилко, Д.С. Кастерин // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2020. – Вып. № 1 (19). – С. 40–53.
4. CFD analysis of a slug mixing experiment conducted on a VVER-1000 model / F. Moretti, D. Melideo, A. Del Nevo, F. D'Auria, T. Höhne, E. Lisenkov // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2009. – V. 2009. – 12 p. – Article ID 436218.
5. Experimental investigation of in-vessel mixing phenomena in a VVER-1000 scaled test facility during unsteady asymmetric transients / A. Bucalossi, F. Moretti, D. Melideo, A. Del Nevo, F. D'Auria, T. Höhne, E. Lisenkov, D. Gallory // Nuclear Engineering and Design. – 2001. – V. 241. – P. 3068–3075.
6. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям (коэффициенты местных сопротивлений и сопротивления трения). – М.: Госэнергоиздат. – 1960. – 464 с.