

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ В ПУЧКАХ ОРЕБРЕННЫХ ТВЭЛОВ С УВЕЛИЧЕННЫМ ШАГОМ ДИСТАНЦИОНИРОВАНИЯ

П.В. Марков, В.И. Солонин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: marrkov@list.ru

Проведено численное исследование течения в 7 и 37 продольно омываемых стержневых пучках. Пучки дистанционируются двухзаходными спиральными ребрами при различных шагах навивки и высоте ребер. Подобные стержневые конструкции рассматриваются в качестве пучков тепловыделяющих элементов быстрых реакторов со свинцовым охлаждением. Получены и обобщены данные о структуре потока в пучках, характеристиках массообмена. Показано, что массоперенос в пучках определяется числом Фруда, а коэффициент сопротивления трения пучков зависит от чисел Рейнольдса и Фруда. Установлено, что периодическое изменение площади проходного сечения приводит к неравномерности распределения статического давления по поверхности стержней. Эта неравномерность увеличивается с уменьшением шага навивки.

Ключевые слова: реакторы на быстрых нейтронах, дистанционирование стержневых тепловыделяющих элементов, коэффициент трения, массообмен, вычислительная гидродинамика.

HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF COOLANT FLOW IN BUNDLES OF RIBBED FUEL RODS LOCATED WITH INCREASED PITCH OF SPACING

P.V. Markov, V.I. Solonin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: marrkov@list.ru

The numerical simulation of fluid flow in 7- and 37-rod fuel assemblies is carried out. Fuel rods are spaced by two-rib wrap with different fin steps and distance between rods. The rod constructions of this type are offered to use in cores of fast fission reactors with lead coolant. Information about the flow structure in bundles, mass transfer characteristics is obtained and generalized. It is shown, that the mass transfer in bundles is determined by the Froude number while a pressure drop coefficient of the bundles depends on the Reynolds number and Froude number. It is found that a periodic change in the passage area of fuel assemblies results in uneven distributions of the static pressure over the surfaces of rods. This pressure unevenness increases as the fin step decreases.

Keywords: fast fission reactors, spacing of fuel rods, pressure drop coefficient, mass transfer, computational fluid dynamics.

Разработка установок с реакторами на быстрых нейтронах и свинцовым теплоносителем [1] инициировала проведение комплекса расчетно-экспериментальных исследований, в том числе связанных с обоснованием теплогидравлических характеристик активных зон. Ядерно-физические и другие свойства свинцового теплоносителя привели к увеличению шага пучков тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ)

в решетке активной зоны по сравнению с таковым для работающих в энергетике натрийохлаждаемых реакторов. В активной зоне реакторов со свинцовым теплоносителем предложено использовать твэлы разного диаметра d , что обеспечивает выравнивание подогревов свинца и температур оболочек твэлов [2].

Для дистанционирования пучков твэлов с увеличенным шагом их расположения $s/d > 1,2$ возможно использование дистанционирующих решеток или навиваемых на оболочку твэлов ребер выбранного (конструктором твэла) поперечного сечения. При высоте оболочки твэла около 3 м [2] и диаметре твэла порядка 10 мм (максимальная энергонапряженность в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300 составляет 225 МВт/м³, а максимальная линейная мощность — 43 кВт/м [2]) шаг дистанционирующих решеток и шаг навивки ребер будут иметь порядок от 200 до 300 мм, т.е. относительное значение отношения шага дистанционирования к диаметру твэла составит 20–30. Этими параметрами определяются геометрические характеристики области течения теплоносителя в активной зоне реактора БРЕСТ-ОД-300.

Рассмотрим задачу численного, предваряющего эксперимент, исследования течения в пучках оребренных твэлов, расположенных в узлах правильной треугольной решетки в шестигранном чехле. Геометрические характеристики стержней-имитаторов твэлов (таблица) выбраны увеличенными по сравнению с натурными, чтобы получить значения чисел Рейнольдса при продувке воздухом в пределах от 10^4 до 10^5 . Рассмотрим два значения относительного шага: $x = 1,325$ и $x = 1,224$. Шаг решетки s у второго и последующих пучков был одинаковым. Шаг оребрения T , отнесенный к диаметру стержня d , в расчетах изменялся от 18,6 до 40,4.

Рассмотрим стержни с дистанционирующими ребрами, высота которых равна половине зазора ($s - d$) между стержнями (дистанционирование — “ребро по ребру”). Два ребра, расположенные во входном сечении подобно варианту, показанному на рис. 1, обеспечивают дистанционирование стержней в шести поперечных сечениях на длине

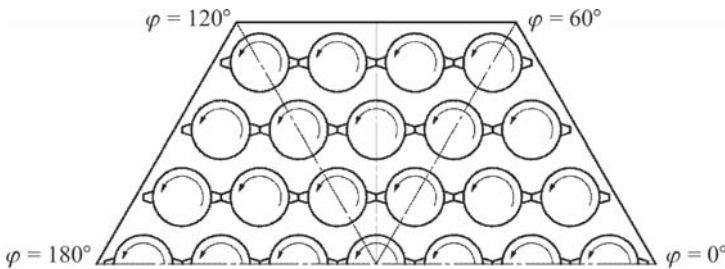


Рис. 1. Ориентация ребер на входе в пучок из 37 стержней с двухзаходным трапецидальным оребрением

Геометрические характеристики пучков и режимы течения

Число стержней	Диаметр стержня d , мм	Относительный шаг, $x = s/d$	Шаг оребрения T , мм	Fr	Re
7	10,41	1,325	210,0	409	$1,6 \cdot 10^4$
7	20,81	1,325	420,0	409	$3,9 \cdot 10^4$
7	20,81	1,325	420,0	409	$5,9 \cdot 10^4$
7	20,81	1,325	420,0	409	$7,8 \cdot 10^4$
7	20,81	1,325	420,0	409	$1,3 \cdot 10^5$
7	20,81	1,325	210,0	102	$5,9 \cdot 10^4$
7	20,81	1,325	840,0	1634	$5,9 \cdot 10^4$
37	20,81	1,325	420,0	409	$5,9 \cdot 10^4$
37	20,81	1,325	438,6	446	$6,0 \cdot 10^4$
37	20,81	1,325	438,6	446	$5,4 \cdot 10^4$
37	22,53	1,224	420,0	514	$4,7 \cdot 10^4$
37	22,53	1,224	840,0	2056	$4,7 \cdot 10^4$

шага навивки T . Дистанционирование при номинальном шаге навивки ребер наступает после изменения положения ребер на 60° , что соответствует продольному расстоянию $1/6$ шага навивки ребер. Во входном сечении пучков стержней ребра ориентированы в направлении $\varphi = 0^\circ$ (см. рис. 1), на расстояниях $T/6$ и $T/3$ от входа — в направлениях $\varphi = 60^\circ$ и $\varphi = 120^\circ$ соответственно, а на расстоянии $T/2$ — в направлении $\varphi = 180^\circ$. Таким образом, геометрия области течения потока в сборке повторяется с шагом, равным $1/2$ шага навивки ребер: на этом расстоянии идентичными оказываются геометрии ячеек как внутри пучка, так и на границе пучка с чехлом. На расстояниях $T/6$ и $T/3$ от входа различными являются и геометрии ячеек внутри чехла (за счет другого положения ребер), и геометрии периферийных ячеек (за счет другой ориентации ребер к граням чехла). В то же время осевая линия (вдоль диагонали чехла) симметрии геометрической области течения потока на расстояниях 0 , $T/6$, $T/3$, $T/2$ от входа занимает положения $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 60^\circ$, $\varphi = 120^\circ$, $\varphi = 180^\circ$, что должно иметь следствием наложенные на основное течение (через пучок оребренных стержней в чехле) вторичные поперечные течения как на периферии, так и в объеме пучка.

Выбор для расчетов пучков, содержащих 7 или 37 стержней, сделан с целью исследовать влияние причехловых областей на характеристики течения. Если интерпретировать гидродинамику потока как совокупность течений в ячейках (субканалах) [3], то чехловой пучок из 7 стержней имеет 12 ячеек: 6 внутри пучка и 6 у поверхности чехла, а чехловой пучок из 37 стержней — 72 ячейки: 54 внутри чехла

и 18 у поверхности чехла. Можно ожидать, что 9-кратное увеличение числа внутренних ячеек при только 2-кратном росте числа периферийных ячеек будет усиливать влияние характеристик течения во внутренних ячейках при формировании гидродинамики течения в сборке. Отметим, что вдоль сборок как во внутренних, так и в периферийных ячейках находится по одному дистанционирующему ребру, что делает почти постоянным вдоль потока вклад ребер в значение гидравлического диаметра ячеек (исключая участки, где ребра, контактируя друг с другом, перекрывают часть “смоченного периметра”).

Таким образом, рассматриваемое течение в сборках с дистанционирующими навитыми ребрами можно классифицировать как периодически повторяющееся на продольных расстояниях, равных половине шага дистанционирования, (квазистабильное) в области, где на течение слабо влияют условия входа или выхода потока из пучка.

Сложная геометрия пучков определяет выбор метода исследования: численное решение трехмерных осредненных уравнений сохранения массы

$$\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

и количества движения

$$\rho \sum_j V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu + \mu_T) \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

турбулентного течения [4].

Влияние предыстории формирования потока на входе в пучки не анализировалось. На входе в расчетную область задавалось равномерное распределение осевой скорости, обеспечивающее необходимое число Рейнольдса, интенсивность турбулентности принималась равной 5 %, а масштаб турбулентности — 10 % гидравлического диаметра сборки. На выходе из расчетной области принималось постоянным статическое давление, дополненное интегральным условием баланса массы. На твердых поверхностях использовалось условие прилипания. Характеристики потока в турбулентном пограничном слое рассчитывались с использованием “пристеночных функций” [4].

Для замыкания системы уравнений (2) апробированы двухпараметрические (стандартная линейная и квадратичная $k-\varepsilon$, realizable $k-\varepsilon$, SST $k-\omega$) и трехпараметрическая ($v^2 f k-\varepsilon$) модели вихревой вязкости [5]. Отличие результатов расчета коэффициентов гидравлического сопротивления пучков, полученных с использованием приведенных моделей, не превышало 7 %. Для анализа выбрана квадратичная $k-\varepsilon$ -модель турбулентности, хорошо зарекомендовавшая себя в расчетах

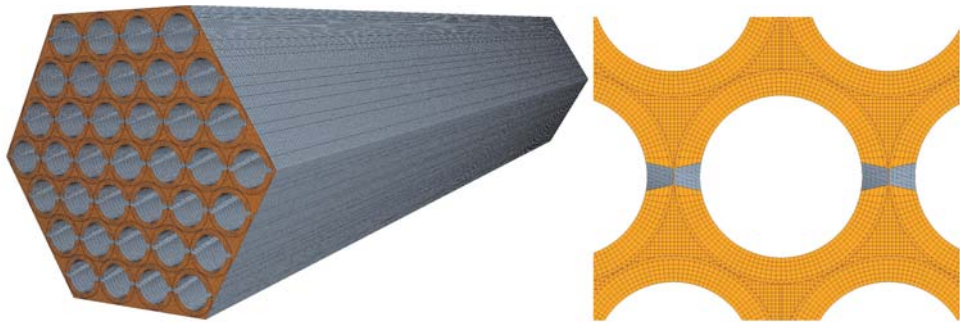


Рис. 2. Расчетная область 37-стержневого пучка с двухзаходным спиральным оребрением

гидродинамики и массообмена во фрагментах ТВС ВВЭР-1000 с со-
товыми дистанционирующими перемешивающими решетками [6], те-
чение за которыми подобно рассматриваемому течению в оребренных
пучках.

Численное решение реализовано методом контрольного объема [7]
в программном комплексе STAR-CCM+ [5].

Характерные размеры призматических контрольных объемов в по-
перечном и продольном направлениях составляли приблизительно 5
и 25 % гидравлического диаметра пучков. Установлено слабое влия-
ние плотности расчетной сетки на результаты расчета: при последова-
тельном увеличении числа контрольных объемов в расчетной области
 $n_1 : n_2 : n_3 = 1 : 5 : 38$ коэффициент гидравлического сопротивления
пучка монотонно увеличивался менее чем на 1 %. Расчетная область
37-стержневого пучка приведена на рис. 2.

Результаты расчетов показали, что статическое давление в попереч-
ном сечении оказывается неравномерным из-за изменяющейся геоме-
трии области течения. За характеристику неравномерности статиче-
ского давления принят коэффициент давления C_p , равный разности
локального статического давления в рассматриваемой области попе-
речного сечения и среднего по сечению статического давления, отне-
сенной к скоростному напору потока, рассчитанному по среднерас-
ходной скорости в сечении.

Отличие коэффициента давления C_p от нуля связано со степенью
влияния навивки ребер на течение. Следуя рекомендациям работы [8],
мерой влияния оребрения на свойства потока принято число Фру-
да $Fr = T^2/sd_r$ (T — шаг оребрения, d_r — гидравлический диаметр),
характеризующее отношение сил инерции потока к центробежным си-
лам, генерируемым оребрением.

Используя градиент среднего в поперечных сечениях статического
давления dp/dz , полученный из результатов численных решений для

течений в пучках (см. таблицу), определены значения коэффициента гидравлического сопротивления трения сборок

$$\lambda = \frac{2d_r}{\rho v_z} \left| \frac{dP}{dz} \right|, \quad (3)$$

где d_r — гидравлический диаметр чехловой сборки, содержащей 7 или 37 оребренных стержней; v_z — средняя в сеченияхборок скорость потока.

Для коэффициентов гидравлического сопротивления тренияборок получена аппроксимация в виде

$$\lambda = 0,316 \text{Re}^{-0,25} (1 + 41,8 \text{Fr}^{-0,8}), \quad (4)$$

обобщающая с предельным отклонением 4% данные для пучков из 7 и 37 стержней с T/d от 10,1 до 40,4 и относительными шагами стержней 1,325 и 1,224, что соответствует значениям Fr от 102 до 2056, в диапазоне чисел Рейнольдса от $1,6 \cdot 10^4$ до $12,5 \cdot 10^4$. Числа Рейнольдса и Фруда определены по гидравлическому диаметру бесконечной решетки оребренных стержней. Такой выбор гидравлического диаметра обеспечивает меньшее отклонение локальных значений λ от зависимости (4).

Данные о распределении поперечных компонент скорости во внутренних ячейках пучка иллюстрируются схемой на рис. 3. В ячейках I, II, III и II, III, IV в пределах продольного расстояния от входа в пучок до сечения, расположенного на расстоянии $T/6$ от входа, находится правое и левое ребра стержней I и IV. Они инициируют тангенциальное отклонение осевого потока, движущегося вдоль поверхностей этих стержней в направлении навивки ребер (против хода часовой стрелки, см. рис. 3). В этом же направлении тангенциальные компоненты скорости наблюдаются у поверхностей стержней II и III. Воздействие ребер, стесняющих проходное сечение ячеек, приводит к смещению максимума скорости в ячейках к области границы между ячейками (заштрихованные трапецевидные зоны на рис. 3). Тангенциальные поперечные скорости в области границ ячеек со стержнями инициируют образование двух расположенных вблизи центра ячеек вторичных вихрей с компонентами скорости, направленными

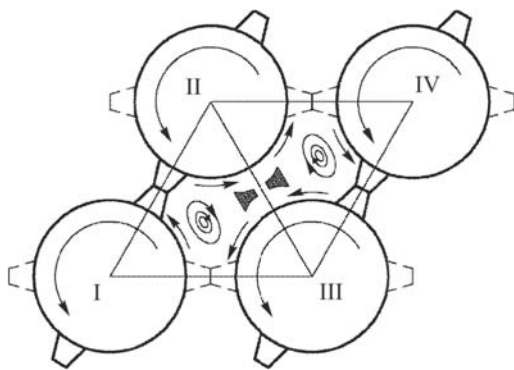


Рис. 3. Схема течения во внутренних ячейках на длине $1/6$ шага оребрения

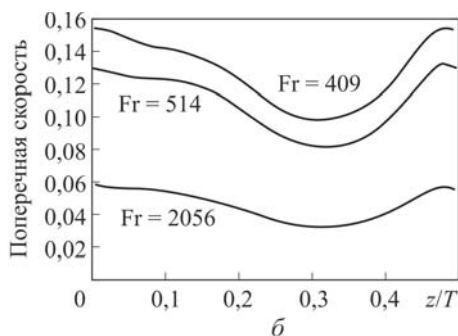
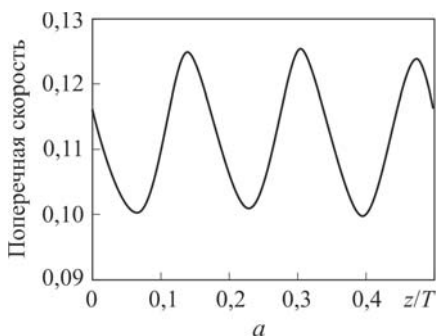


Рис. 4. Поперечная скорость в долях среднерасходной скорости, осредненная по площади кольцевого слоя внутренней ячейки ($Fr = 446$) (*a*) и периферийной ячейки (*b*)

по ходу часовой стрелки, что можно интерпретировать как возникновение вихревого течения в диффузорном канале, создаваемом ребрением.

Определенные по результатам численного эксперимента (средние по площади кольцевого слоя толщиной, равной высоте ребер навивки) значения тангенциальной скорости для $Fr = 446$ приведены на рис. 4, *a*. Отношение средней тангенциальной скорости (v_φ) к среднерасходной в пучке (v_z) периодически изменяется с шагом, равным $T/6$, в пределах от $1,0 \cdot 10^{-1}$ до $1,25 \cdot 10^{-1}$. Средняя по объему кольцевого слоя толщиной, равной высоте ребер навивки, относительная окружная скорость для всех стержней моделей практически не зависит от числа Рейнольдса и обобщена выражением

$$v_\varphi/v_z = 4,046 Fr^{-0,59} \pm 15\%. \quad (5)$$

Влияние числа Фруда на относительную амплитуду средней тангенциальной скорости для внутренних ячеек пучка описывается аппроксимационной формулой

$$\Delta v_\varphi/v_z = 0,173 Fr^{-0,45} \pm 11\%. \quad (6)$$

Течение в периферийных ячейках в зазоре между периферийным рядом стержней и внутренней поверхностью чехла отличается от течения во внутренних ячейках. Вторичные течения, индуцированные спиральными ребрами периферийных стержней, направлены против хода часовой стрелки вдоль всех граней чехла, что приводит к формированию на периферии пучка кольцевого течения в направлении навивки ребер стержней.

Распределение относительной окружной скорости вдоль стержней периферийных ячеек, представленное на рис. 4, *b*, показывает амплитуду изменения поперечной скорости, составляющую $\sim 0,055$ для $Fr = 409$ и $\sim 0,025$ для $Fr = 2056$. Периферийное кольцевое течение повторяется вдоль пучка с периодом, равным $T/2$.

Шаг оребрения определяет значение градиента осевой скорости в зазорах между стержнями и, как следствие, неравномерность статического давления по периметру стержней. Распределение статического давления при движении потока от входного сечения к сечению на расстоянии от входа, равном $T/6$, описывается выражениями

$$C_{p_{i-II}} = C_{p_{III-IV}} > C_{p_{II-III}} > 0, \quad C_{p_{I-II}} = C_{p_{II-III}} < 0, \quad (7)$$

где $C_{p_{i-j}}$ — коэффициент давления в зазоре между стержнями i и j .

При сближении ребер осевая скорость в зазорах между стержнями (например, стержнями I и II, III и IV, см. рис. 3) уменьшается и возрастает статическое давление. Расхождение ребер вызывает восстановление скорости и, как следствие, образование зон разрежения (зазор между стержнями I и III). Предельные значения коэффициента давления по периметру стержня $C_{p_{max}}$ и $C_{p_{min}}$ определяются согласно аппроксимации результатов расчетов выражениями

$$C_{p_{max}} = 41,8 Fr^{-1}, \quad C_{p_{min}} = -4,6 Fr^{-0,75}. \quad (8)$$

Предельная погрешность выражений (8) составляет 18%.

Течение в периферийных ячейках вызывает неравномерность статического давления по периметру чехла. На рис. 5 приведены коэффициенты давления для сечения, расположенного на расстоянии $T/6$ от входа в 37-стержневой пучок для $Fr = 409$ и $Fr = 2056$. Вдоль правой и верхней граней чехла (см. рис. 1) коэффициент давления возрастает, на левой грани — уменьшается. Локальные максимумы коэффициентов давления соответствуют расположению зазоров между стержнями периферийного ряда, что свидетельствует о поперечном обмене периферийных и внутренних ячеек. Положение ребер относительно граней

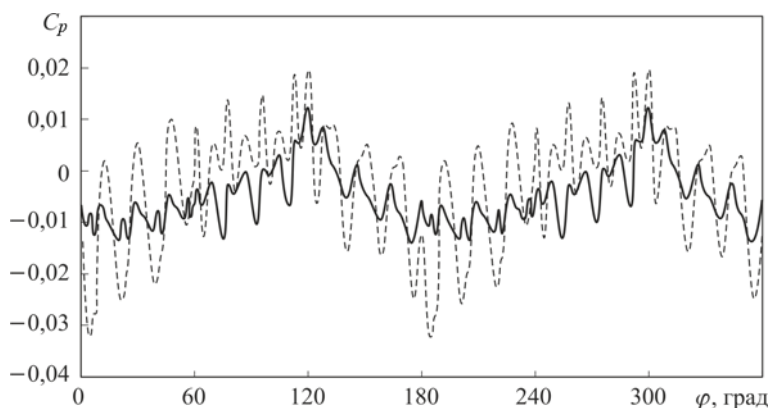


Рис. 5. Распределения коэффициента давления по периметру чехла пучка из 37 стержней ($z/T = 1/6$, угол отсчитывается от горизонтальной линии симметрии, параллельной направлению ребер при $z = 0$): штриховая линия — $Fr = 409$, сплошная линия — $Fr = 2056$

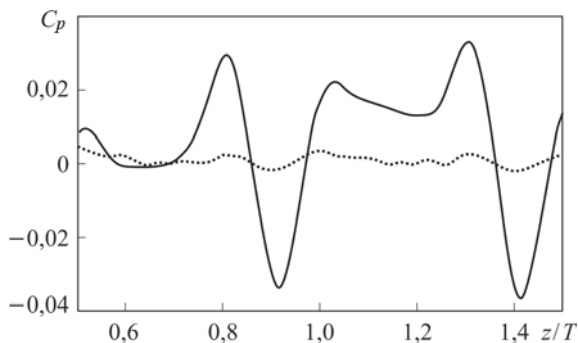


Рис. 6. Осовое распределение коэффициента давления вдоль средней линии грани 7-стержневого пучка:

сплошная линия — $Fr = 102$, точки — $Fr = 1634$

чехла определяет макроизменения коэффициента давления, проходящие с периодом 180° . При числе $Fr = 409$ амплитуда изменения коэффициента давления вдоль периметра чехла достигает 0,05; увеличение числа Fr до 2056 уменьшает амплитуду до 0,025.

Изменение коэффициента давления вдоль средней линии грани пучка из 7 стержней иллюстрируют графики на рис. 6. Для малых чисел Фруда ($Fr = 102$) коэффициент давления квазистабилзируется на расстоянии, близком шагу навивки ребер, когда его изменение составляет 0,065.

Заключение. 1. Выполнено численное исследование трехмерного турбулентного течения в пучках из 7 и 37 стержней, дистанционированных трапецевидными спиральными ребрами (“ребро по ребру”). Обосновано использование замыкающих соотношений модели турбулентности и параметров компьютерной модели, дающих погрешность вычислений, не превышающую 7%, при расчете коэффициентов гидравлических сопротивлений.

2. Обобщение результатов численного исследования показало, что при больших значениях шагов навивки ребер ($T/d = 18,6 \dots 40,4$) и расстояниях между твэлами ($s/d = 1,325$ и $1,224$) коэффициенты гидравлического сопротивления трения обобщаются зависимостью от числа Фруда потока в регулярной решетке стержней с предельным отклонением 4% ($Fr = 402 \dots 2056$; $Re = 1,6 \cdot 10^4 \dots 12,5 \cdot 10^4$).

3. Анализ геометрической формы трактов номинальных размеров для течения теплоносителя в чехловых сборках оребренных пучков стержней и обобщение результатов численного моделирования потока в этих трактах позволили установить особенности формирования поперечных скоростей в области внутренних и периферийных ячеек сборок, получить зависимости характерных окружных скоростей, амплитуд их изменения от числа Фруда.

4. Показано, что изменение геометрии трактов, приводящее к изменениям локальной продольной скорости в сечении сборки, формирование поперечных скоростей в потоке приводят к неравномерности статического давления в сечении и на поверхности чехла, достигающей при низких значениях чисел Фруда 5...6% скоростного напора, что необходимо учитывать при экспериментальном определении характеристик течения в сборках стержней, дистанционированных навитыми ребрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Смирнов В.С., Чернецов Н.Г. Технические решения и этапы разработки реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // *Атомная энергия*. 2012. Т. 113. № 1. С. 58–64.
2. *Машиностроение*. Энциклопедия. Том 4. / Е.О. Адамов, Ю.Г. Драгунов, В.В. Орлов и др. Кн. 1: Машиностроение ядерной техники. М.: Машиностроение, 2005. С. 667–672.
3. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1984. 296 с.
4. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2001. 108 с.
5. STAR-CCM+, version 7.04. User Guide (руководство пользователя), CD-adapco Group, 2012.
6. *Моделирование* температурных неоднородностей в пучке твэлов ТВС ВВЭР-1000 / С.И. Гетья, В.Г. Крапивцев, П.В. Марков и др. // *Атомная энергия*. 2013. Т. 114. № 1. С. 55–57.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
8. *Теплообмен* и гидродинамика в каналах сложной формы / Ю.И. Давыдов, Б.В. Дзюбенко, Г.А. Дрейцер, Л.А. Ашмантас М.: Машиностроение, 1986. 200 с.

REFERENCES

- [1] Dragunov Yu. G., Lemekhov V. V., Smirnov V. S., Chernetsov N. G. Technical solutions and development stages for the BREST-OD-300 reactor unit. *At. Energy*, 2012, vol. 113, no. 1, pp. 70–77. doi: 10.1007/s10512-012-9597-3
- [2] Adamov E.O., Dragunov Y.G., Orlov V.V. Mechanical engineering for nuclear technology, Book 1. In: *Mashinostroenie. Entsiklopediya. Tom 4* [Mechanical engineering. Encyclopedia. Vol. 4]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, pp. 667–672 (in Russ.).
- [3] Kirillov P.L., Yur'ev Yu.S., Bobkov V.P. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (Yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory) [Handbook on thermal-hydraulic calculations (Nuclear reactors, heat exchangers, steam generators)]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 296 p.
- [4] Belov I.A., Isaev S.A. Modelirovanie turbulentykh techeniy [Simulation of turbulent flows]. St. Petersburg, Balt. Gos. Tekh. Univ. Publ., 2001. 108 p.
- [5] STAR-CCM+, version 7.04. User Guide, CD-adapco Group, 2012.
- [6] Getya S.I., Krapivtse V.G., Markov P.V., Solonin V.I., Tsirin S.I. Modeling temperature nonuniformities in a fuel-element bundle of a VVER-1000 fuel-assembly. *At. Energy*, 2013, vol. 114, no. 1, pp. 69–72. doi: 10.1007/s10512-013-9673-3

- [7] Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publ., 1980. 197 p. (Russ. ed.: Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 152 p.).
- [8] Davydov Yu.I., Dzyubenko B.V., Dreytser G.A. Teploobmen i gidrodinamika v kanalakh slozhnoy formy [Heat transfer and hydrodynamics in channels of complex shape]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 200 p.

Статья поступила в редакцию 17.04.2013

Павел Владимирович Марков — канд. техн. наук, ассистент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 11 научных работ в области ядерной технологии и вычислительной гидродинамики.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

P.V. Markov — Cand. Sci. (Eng.), assistant lecturer of “Nuclear Reactors and Plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 11 publications in the field of nuclear technology and computational fluid dynamics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Владимир Иванович Солонин — д-р техн. наук, профессор кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области ядерных технологий.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.I. Solonin — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Nuclear Reactors and Plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of nuclear technologies.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russian Federation.