

УДК 621.039.517

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ДИСТАНЦИОНИРОВАНИЯ НА ГИДРОДИНАМИКУ СЕМИСТЕРЖНЕВОГО ПУЧКА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

П.В. Марков, В.И. Солонин

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

Выполнено численное моделирование течения в семистержневых пучках, дистанционированных однозаходной витой проволокой и четырехзаходными спиральными ребрами. Получены данные о структуре потока теплоносителя, определяющей интенсивность межъячейкового обмена, гидравлические характеристики пучков. Показано соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: реакторы на быстрых нейтронах, дистанционирование стержневых тепловыделяющих элементов, тепловыделяющие элементы, вычислительная гидродинамика, межъячейковый обмен.

INFLUENCE OF SPACER TYPE ON FLUID DYNAMICS OF 7-ROD FUEL ASSEMBLY

P.V. Markov, V.I. Solonin

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

The numerical simulation of fluid flow in 7-rod fuel assemblies is performed. The fuel rods are spaced by twisted wire wrap or four-rib wrap. Data on the coolant flow structure that determines the subchannel transfer intensity and hydraulic characteristics of the assemblies are obtained. The agreement of results of physical and numerical simulations is shown.

Keywords: fast fission reactors, spacing of fuel rods, fuel rods, computational fluid dynamics, subchannel transfer.

Плотно упакованные стержневые тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) реакторов на быстрых нейтронах дистанционируются проволоочной навивкой или ребрами, выполняемыми совместно с оболочкой ТВЭЛА, спирально огибающими оболочку [1]. Расположенные в правильной треугольной решетке ТВЭЛы образуют продольные каналы для теплоносителя, форма которых изменяется вдоль потока теплоносителя вследствие периодического (зависящего от продольного шага и числа ребер) нахождения дистанционаторов в определенной ячейке каналов охлаждения.

Поток теплоносителя в каналах решетки ТВЭЛов со спиральным оребрением приобретает наряду с продольной тангенциальную компоненту скорости, их направление определяется геометрией оребрения

или проволочной навивки. В области регулярной решетки твэлов, где геометрия каналов для теплоносителя идентична, формируется квазистационарное течение с повышенными характеристиками поперечного переноса (межъячеечного обмена количеством движения, теплотой, массой). На границах регулярной решетки твэлов с чехлом теплоделяющей сборки или поверхностью направляющего канала органа регулирования реактора характер течения теплоносителя изменяется. В этой области дистанционирующая навивка твэлов инициирует поперечное (вдоль чехла) поверхности направляющего канала циркуляционное течение, тангенциальные компоненты скорости в котором определяются направлением навивки. На возникновение подобных циркуляционных течений впервые обратил внимание А. Таунсенд [2].

Сложный характер трехмерного течения в ограниченных поверхностями пучках стержневых твэлов, дистанционированных проволочной навивкой или ребрами, определяет зависимость интенсивности межъячеечного обмена, используемого в теплогидравлических расчетах каналов охлаждения активных зон [3], от положения ячейки по отношению к ограничивающей поверхности, от направления обмена.

В связи с отмеченным актуально использование усредненных трехмерных уравнений Навье–Стокса (уравнений Рейнольдса) и нелокальных моделей турбулентности для расчета гидродинамики и тепло- и массообмена в пучках твэлов реакторов на быстрых нейтронах. Такой подход позволяет прогнозировать все практически важные характеристики течения и теплообмена, включая учет влияния геометрических и иных особенностей трактов охлаждения на характеристики прогноза.

В настоящей работе анализируется гидродинамика потока в модельных пучках, состоящих из семи стержней диаметром $d = 15$ мм, расположенных в узлах правильной треугольной решетки с шагом $s = 17$ мм (относительный шаг 1,133, рис. 1). Дистанционирование стержней выполнено однонаправленной однозаходной витой проволокой и четырехзаходными спиральными ребрами. При этом дистанционирующие элементы одинаково загромождают проходное сечение теплоносителя. Пучки заключены в шестигранные чехлы с внутренним размером “под ключ” 49 мм. По периферии пучков размещаются шесть прутков-вытеснителей диаметром $d_b = 3$ мм, выравнивающих скорости в причехловой области. Шаг навивки проволоки $T = 300$ мм, длины пучков $L = 600$ мм (два шага).

Рассчитывается течение потока воздуха, используемого в качестве моделирующей среды в аэродинамических экспериментах, при $Re = 2 \cdot 10^4$. Поскольку скорости воздуха в пучке невелики ($M = 0,17$),

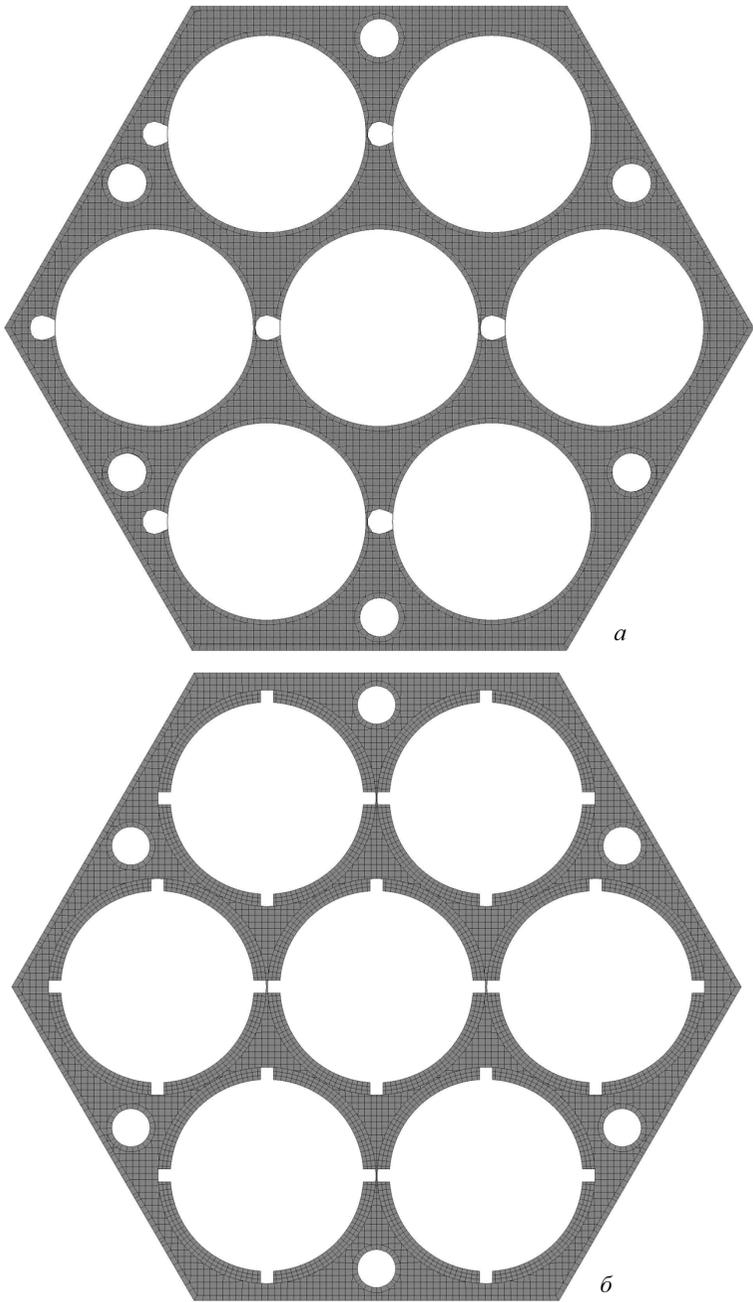


Рис. 1. Сеточные модели семистержевых витых пучков:

a – дистанционирование однозаходной проволокой; *б* – дистанционирование четырехзаходными ребрами

выбрана модель газа постоянной плотности. Используются осредненные уравнения Навье–Стокса в стационарной постановке (RANS) [4]:

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

– уравнение сохранения количества движения,

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

– уравнение неразрывности, где компоненты тензоров напряжений и скоростей деформации определяются как

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \rho \overline{V'_i V'_j}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right). \quad (3)$$

Для замыкания системы уравнений (1) рассматривались модель сохранения турбулентных напряжений (RSM) и модель вихревой вязкости (EVM). В последней использовались как линейное соотношение между напряжениями Рейнольдса и скоростью деформации усредненного движения $-\rho \overline{V'_i V'_j} = 2\mu_T S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}$ (гипотеза Буссинеска), так и нелинейная, квадратичная зависимость

$$\begin{aligned} -\rho \overline{V'_i V'_j} = & \\ = 2\mu_T S_{ij} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} - 4C_1 \mu_T \frac{k}{\varepsilon} & \left[\sum_k S_{ik} S_{kj} - \frac{1}{3} \sum_k \sum_l S_{kl} S_{lk} \delta_{ij} \right] - \\ - 4C_2 \mu_T \frac{k}{\varepsilon} & \left[\sum_k \omega_{ik} S_{kj} + \sum_k \omega_{jk} S_{ki} \right] - \\ - 4C_3 \mu_T \frac{k}{\varepsilon} & \left[\sum_k \omega_{ik} \omega_{kj} - \frac{1}{3} \sum_k \sum_l \omega_{kl} \omega_{kl} \delta_{ij} \right], \quad (4) \end{aligned}$$

где δ_{ij} – оператор Кронекера; k – кинетическая энергия турбулентности; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, $\omega_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$ – тензор завихренности осредненного движения.

Турбулентная вязкость μ_T определяется квадратичной k - ε -моделью и k - ω SST-моделью.

Характеристики потока в турбулентном пограничном слое рассчитываются с использованием “пристеночных функций”.

На входе в расчетную область задавались постоянный профиль осевой скорости, интенсивность турбулентности 5 % и масштаб турбулентности 0,5 мм ($\sim 0,1 \cdot d_r$), на выходе – постоянство давления, дополненное интегральным условием баланса массы. На твердых поверхностях использовалось условие прилипания.

Численное решение полученной системы дифференциальных уравнений в частных производных выполняется методом контрольного объема при использовании итерационной процедуры расчета

SIMPLE [5]. Дискретизация конвективных членов в уравнениях сохранения происходит при помощи противопоточной схемы второго порядка точности.

Математическая модель реализована в программном комплексе STAR-CCM+ [6].

Сеточные модели (см. рис. 1) состоят из призматических контрольных объемов (ячеек) с характерным поперечным размером 0,5 мм. Соотношение размеров ячеек в продольном и поперечном направлениях ~ 4 . Общее число контрольных объемов в моделях составляет ~ 1 млн. Контакт по линии между стержнем и навиваемой на него проволокой осуществлялся по площадке шириной 1 мм; назначен зазор 0,5 мм между дистанционирующими и соседними поверхностями или элементами. Эти изменения расчетной геометрии трактов (отличие от реальной — в зазоре) позволяют обеспечить процесс автоматической генерации сеток надлежащего качества, что непосредственно влияет на точность численного решения задачи. Ширина зазора связана с поперечным размером контрольных объемов и может быть уменьшена при увеличении плотности расчетной сетки. Указанные изменения мало влияют на геометрию трактов модели.

Валидация результатов численного моделирования и сравнение различных моделей турбулентности выполнены с использованием экспериментальных корреляций для гидравлического сопротивления, приведенных в работе [7] (таблица).

Значения коэффициентов гидравлического сопротивления пучков в области стабилизированного течения

Метод исследования	Дистанционирование	
	“ребро по оболочке”	“ребро по ребру”
Расчет (квадратичная k - ε -модель турбулентности)	0,031	0,029
Расчет (k - ω SST-модель турбулентности)	0,030	0,029
Расчет (RSM-GL-модель турбулентности)	0,030	0,031
Эксперимент [7]	$0,034 \pm 0,004$	$0,033 \pm 0,003$

Как следует из таблицы, значения коэффициентов трения согласуются между собой. Для дальнейшего анализа выбрана квадратичная k - ε -модель.

Течение в стержневых пучках с дистанционированием “ребро по оболочке”. Результаты моделирования течения в части поперечных компонент скорости представлены на рис. 2, на котором области $z = 0$, $z = T/12$, $z = T/6$ соответствуют характеристикам стабилизированного течения в последовательных вдоль продольной оси z поперечных сечениях.

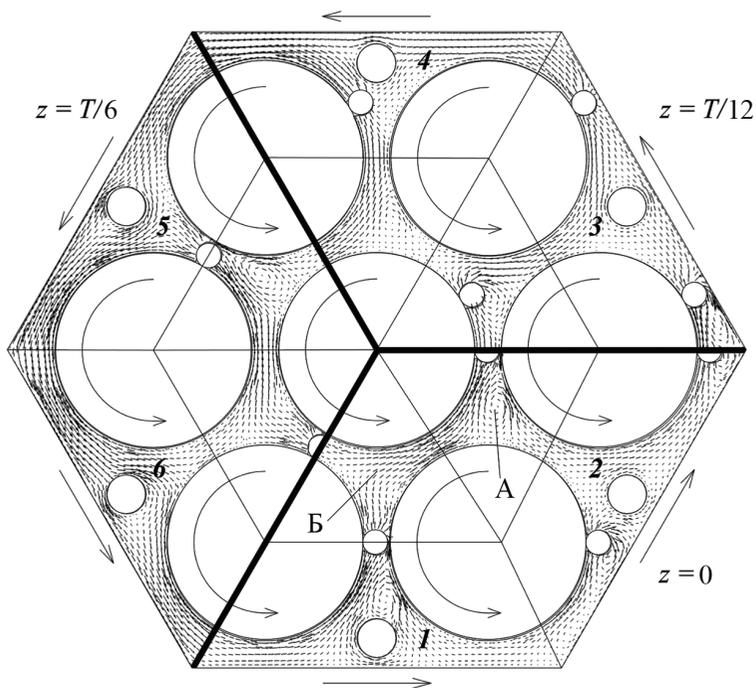


Рис. 2. Поперечные компоненты скорости в пучке, дистанционированном однозаходной проволокой

Однозаходная проволочная навивка по-разному влияет на гидродинамику потока в регулярных и причехловых ячейках. Часть проходного сечения центральных “треугольных” субканалов (ячеек), образованных поверхностями трех соседних стержней и линиями, соединяющими их центры, периодически перекрывается навитой проволокой. Для положения проволок, соответствующего рис. 1, в каждой регулярной ячейке находятся по половине поперечного сечения проволоки. Ниже по потоку возникает чередование содержащих и не содержащих проволоку ячеек с периодичностью, соответствующей $1/6$ шага навивки (см. рис. 2). Такое чередование должно интенсифицировать поперечный массообмен. У поверхности стержня поперечные скорости, составляющие при рассматриваемой геометрии навивки до $\sim 15\%$ среднерасходной, определяются направлением навивки проволоки. При этом в областях потока “за проволокой” (зона А), характеризующихся диффузорностью трактов для потока за счет увеличения площади проходного сечения вдоль оси канала, индуцируются вихри с направлением циркуляции, противоположным направлению проволочной навивки (по ходу часовой стрелки на рис. 2). Из зоны Б поток вытесняется проволокой и через зазор между стержнями переносится в вихревую область А. Вихревые образования (как следует из рис. 2) возникают за проволочной навивкой при ее прохождении через ячейки. Вихри инициируют поперечные скорости в зазорах между разными

стержнями, что осложняет реализацию технологии расчета течения в пучке с использованием ячеистых моделей.

Области между чехлом и периферийными стержнями (периферийные трапециевидные ячейки) периодически через $z = T/3$ загромождены дистанционирующей проволокой. Так, в ячейке 2 (см. рис. 2) находится одна дистанционирующая проволока, в ячейке 3 — две, в ячейках 5, 6, 1 проволоки нет. Различное гидравлическое сопротивление периферийных ячеек приводит к различным продольным и поперечным скоростям в них, что является причиной формирования в причехловой области своеобразного спирального потока, ориентированного согласно направлению навивки. Скорость в области ячеек 5, 6, 1 превышает скорость потока в регулярных ячейках на $\sim 15\%$. Эта особенность течения показана на рис. 3. Увеличенные скорости наблюдаются как в периферийных, так и в прилегающих к ним ячейках. Спиральный поток приводит к неравномерности статического давления в сечении. С уменьшением скорости в периферийной области возникает увеличение продольного градиента давления (уменьшение его модуля). Как следствие, в поперечном сечении пучка образуются зоны разрежения и избыточного статического давления по сравнению со средним статическим давлением в сечении, демонстрирующие развитие причехловой струи. Описанное явление приводит к немонотонности распределения статического давления как по периметру, так и вдоль стенок чехла макета (например, вдоль линий I и II, на рис. 4), что необходимо учитывать при измерениях в физических экспериментах. Коэффициент давления C_p (см. рис. 4) определен как разность локального значения статического давления на чехле и его значения, усредненного по сечению, в долях скоростного напора потока в пучке, вычисленного по среднерасходной скорости течения.

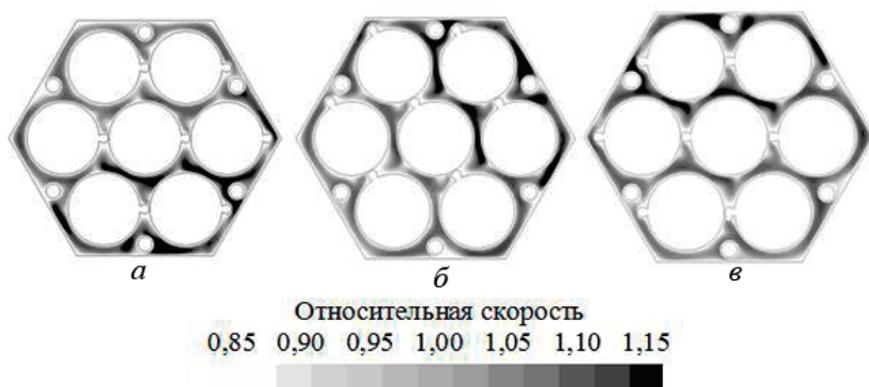


Рис. 3. Распределения относительной скорости в пучке с однозаходной навивкой:

$a - z = 0$; $b - z = T/3$; $v - z = T/2$

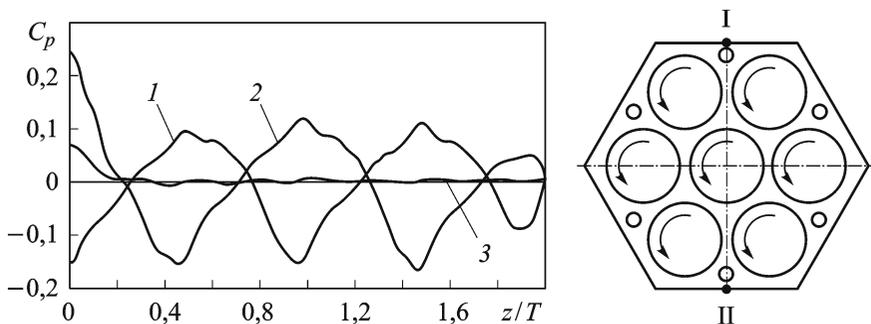


Рис. 4. Распределения коэффициента давления вдоль чехла пучка:
 1 — линия I, пучок с однозаходной навивкой; 2 — линия II, пучок с однозаходной навивкой; 3 — линии I и II, пучок с четырехзаходными ребрами

Течение в стержневых пучках с дистанционированием “ребро по ребру”. Результаты моделирования течения в части поперечных компонент скорости представлены на рис. 5, на котором в области $z = 0$, $z = T/24$, $z = T/12$ показаны характеристики стабилизированного потока в разных областях пучка.

Четырехзаходные дистанционирующие ребра определяют периодичность геометрии ячеек, равную $T/4$. Площадь поперечного сечения в периферийных ячейках, перекрываемая дистанционирующими ребрами, изменяется мало, составляя 2–3 сечения ребра; в центральных ячейках находится по два ребра. Спиральное оребрение приводит к созданию поперечной конвекции в пучке, для которой характерно тангенциальное движение потока вдоль каждого стержня в соответствии с направлением ребер. Встречное направление потоков у стержней снижает интенсивность межячеистого обмена по сравнению с дистанционированием “ребро по оболочке”. Поперечные скорости на границах ячеек составляют $\sim 8\%$ среднерасходной скорости. Этот результат соответствует экспериментальным данным, приведенным в работе [3].

Ребра оказывают определяющее влияние на распределение поперечных скоростей как в центральной области ячеек, так и в зазорах между стержнями. По мере сближения дистанционирующих ребер и перекрытия зазора между соседними стержнями (область Б, см. рис. 5) продольная скорость потока уменьшается, что приводит к возрастанию статического давления, препятствующего генерируемому навивкой конвективному переносу в данную область. При расхождении ребер (область А, см. рис. 5) возникает поперечная циркуляция теплоносителя, не связанная со следом за проволоочной навивкой (см. рис. 2). Амплитуда изменения статического давления по сечению пучка существенно меньше, чем при дистанционировании “проволока по оболочке”, и составляет $C_p \sim 0,05$ в центральных ячейках и $C_p \sim 0,005$ на

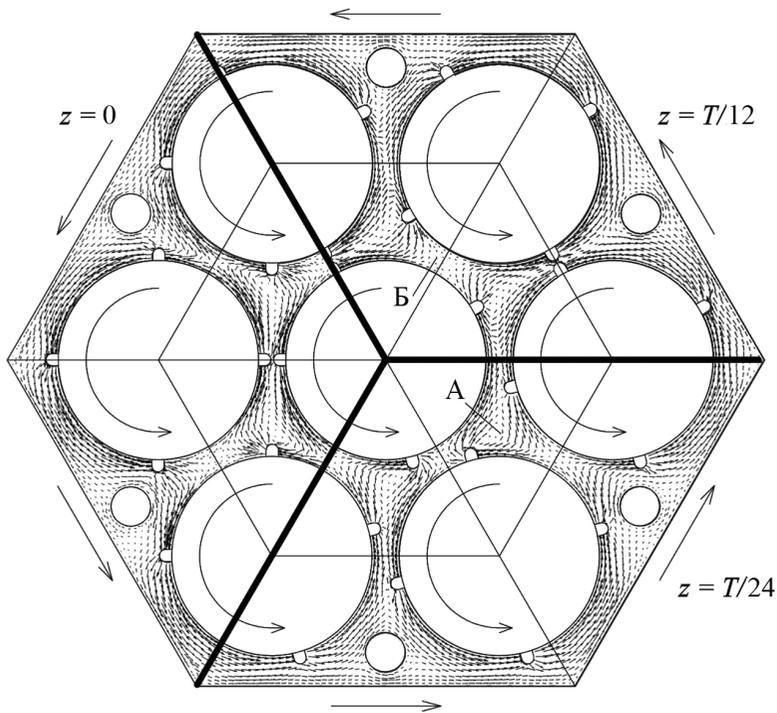


Рис. 5. Схема течения в пучке, дистанционированном четырехзаходными ребрами

чехле (см. рис. 4). Приведенные на рис. 6 распределения безразмерной скорости в пучке с четырехзаходной навивкой демонстрируют отсутствие “макроскопических” скоростных неравномерностей, зависящих от взаимной ориентации ребер. Зоны с наименьшими продольными скоростями наблюдаются в регулярных ячейках, в периферийных ячейках доля таких зон относительно меньше. Распределение продольной скорости во всех ячейках характеризуется хорошей симметрией.

В целом, анализ поперечных компонент скорости в рассматриваемых семи стержнях пучка, дистанционированного четырехзаходными

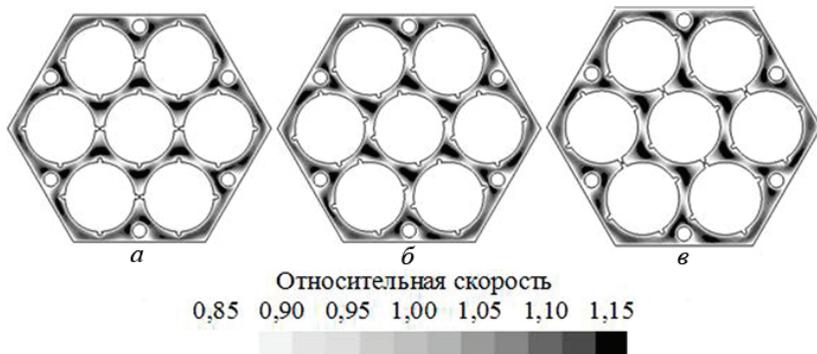


Рис. 6. Распределения относительной скорости в пучке с четырехзаходным оребрением

ребрами, показывает разнообразие наблюдаемых картин поперечного обмена через зазоры между ячейками сборки, зависящего от положения и изменения положения ребер. Аппроксимировать столь сложное течение в рамках модели межъячейкового обмена возможно лишь по результатам численного или гораздо более трудоемкого физического моделирования.

Выводы. 1. Численное моделирование трехмерной гидродинамики семистержневых пучков, дистанционированных однозаходной проволокой и четырехзаходными спиральными ребрами, расположенными в чехлах, показало, что при идентичных шаге навивки и доле проходного сечения, занимаемой дистанционирующими элементами, коэффициенты гидравлического сопротивления пучков практически не зависят от типа дистанционирования.

2. Показано, что для дистанционирования стержней однозаходной проволочной навивкой в объеме пучка формируется скоростная спиралевидная струя, осевая скорость в которой превышает среднюю на $\sim 15\%$, а изменение статического давления составляет до $\sim 10\%$ скоростного напора в пучке. Статическое давление вдоль чехла изменяется с периодом, равным шагу навивки проволоки. Для четырехзаходного оребрения стержней распределение осевой скорости в пучке симметрично в регулярных и в периферийных ячейках, статическое давление в сечении близко к постоянному.

3. Поперечные скорости потока в сборке составляют до 15 и 8% осевой скорости для дистанционирования однозаходной проволочной навивкой и четырехзаходными ребрами, соответственно. Проволочная навивка инициирует вихревые течения в следе за проволокой, оребрение обеспечивает тангенциальные течения вокруг стержней, встречное направление которых способствует уменьшению поперечной скорости.

4. Скорость конвективного переноса через границы ячеек уменьшается в зависимости от положения дистанционирующих элементов относительно границы, от направления их относительного движения. Как следствие, интенсивность межъячейкового обмена оказывается функцией продольной координаты, различной для границ отдельной ячейки. Последнюю особенность необходимо учитывать в расчетных методиках, базирующихся на моделях межъячейкового обмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солонин В. И. Ядерные реакторы и установки: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 87 с.
2. Таунсенд А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом / А. Таунсенд. М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. 399 с.

3. Жуков А. В., Сорокин А. П., Матюхин Н. М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 184 с.
4. Белов И. А. Моделирование турбулентных течений: Учеб. пособ. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 104 с.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
6. STAR-CCM+, version 7.02. UserGuide (руководство пользователя), CD-adapco Group, 2012.
7. Справочник по теплогидравлическим расчетам: (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П.Л. Кириллов и др. М.: Энергоатомиздат, 1984. 296 с.

REFERENCES

1. Solonin V.I. Yadernye reaktory i ustanovki [Nuclear reactors and plants]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010, 87 p.
2. Townsend A. A. The structure of turbulent shear flow. Cambridge University Press, 1956, 315 p. (Russ. ed.: Taunsend A. Struktura turbulentsnogo potoka s poperechnym sdivgom. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1959, 399 p.)
3. Zhukov A. V., Sorokin A. P., Matyukhin N. M. Mezskanal'nyy obmen v TVS bystrykh reaktorov [Cross-channel exchange in fast reactor fuel assemblies]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 184 p.
4. Belov I. A. Modelirovanie turbulentsnykh techeniy [Modeling of turbulent flows]. St. Petersburg, Baltic STU Publ., 2001, 104 p.
5. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 112 p. (Russ. ed.: Patankar S. Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 152 p.)
6. STAR-CCM+, version 7.02. UserGuide, CD-adapco Group, 2012.
7. Kirillov P. L., ed. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (Yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory) [Handbook on thermohydraulic design: nuclear reactors, heat exchangers, steam generators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 296 p.

Статья поступила в редакцию 29.10.2011

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.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

P.V. Markov (b. 1984) — Cand. Sci. (Eng.), assistant lecture 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, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

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.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

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, stroenie 1. Moscow, 105005 Russia.