

АТОМНОЕ РЕАКТОРОСТРОЕНИЕ, МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.039.517

СТРУКТУРА ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В ПУЧКАХ СТЕРЖНЕЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ БРЕСТ-ОД-300

Д.В. Фомичев¹, В.И. Солонин²

¹АО “НИКИЭТ”, Москва, Российская Федерация
e-mail: fomichev@nikiet.ru

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: en7.power@bmstu.ru

Приведены результаты численного моделирования течения в 37-стержневых макетах тепловыделяющих сборок реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, дистанционированные двухзаходной трапецевидной навивкой по типу “ребро по ребру”. Показаны распределения избыточного статического давления, составляющих скорости и турбулентных характеристик потока в объеме пучков стержней макетов тепловыделяющих сборок. Проведен анализ структуры турбулентного течения в объеме пучков стержней.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, структура течения, вычислительная гидродинамика.

STRUCTURE OF TURBULENT FLOW IN THE PIN BUNDLES OF THE BREST-OD-300

D.V. Fomichev¹, V.I. Solonin²

¹JSC “NIKIET”, Moscow, Russian Federation,
e-mail: fomichev@nikiet.ru

²Bauman State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: en7.power@bmstu.ru

The paper presents the results of the numerical simulation of 37-pins prototyping fuel assemblies of the reactor plant BREST-OD-300, which are spaced by a bifilar-helix wire wrapper of the “wire to wire” type. It shows the differential static pressure distributions as well as velocity components and the turbulent flow structure in a volume of pin bundles of the prototyping fuel assemblies. The turbulent flow structure in a volume of pin bundles is analyzed.

Keywords: wire-spaces fuel assembly, turbulent flow structure, computational fluid dynamics.

Структура турбулентного потока в пучках стержней, дистанционированных навитыми на стержни ребрами, определяется формируемой оребрением геометрией трактов течения теплоносителя. Тракты течения повторяют форму с периодом, равным доле продольного шага

навивки ребер, обратно пропорционально числу ребер на стержне. В области квазистационарного течения (после диссипации турбулентности, сформированной на входе в пучок стержней) турбулентное течение характеризуется периодическим изменением продольной и поперечной компонент скорости, так же как и турбулентных характеристик потока. Последние по сравнению с периодичностью средних компонент скорости в силу конвективного переноса могут иметь периодичность вдоль продольной координаты со сдвигом.

В настоящей работе с использованием современного CFD-кода выполнен анализ структуры течения в пучке стержней с двухзаходной трапециевидной формой оребрения, что может представлять интерес для создания тепловыделяющих сборок (ТВС) перспективных реакторов на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Анализ выполнен для одного значения шага навивки ребер и двух значений высот ребер применительно к исследованию макетов ТВС центральной и периферийной подзон (ЦЗ и ПЗ) активной зоны реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 [1, 2] при продувке макетов воздухом при числах Рейнольдса $5,02 \cdot 10^4$ и $5,82 \cdot 10^4$, соответствующих ранее полученным экспериментальным данным [3].

Объекты исследования. Математическая модель. Объектами исследования являются 37-стержневые макеты ТВС ЦЗ и ПЗ. Стержни расположены в правильной треугольной решетке с шагом 27,57 мм и размещены в шестигранном чехле с внутренним размером “под ключ” 173 мм. Основные геометрические характеристики стержней макетов приведены в таблице.

Расчетные сетки моделей макетов включают в себя проточную часть пучков, а также подводящий тракт конфузорной формы, формирующий поток на входе в макет ТВС. Подводящий тракт состоит из центрального конфузора с диаметром на входе в пучок стержней, равным 56 мм, и кольцевого периферийного конфузора с аналогичным диаметром 176 мм. В центральном и периферийном конфузорах установлены выравнивающие решетки, в том числе и общая для конфузоров решетка на входе в макет ТВС. Общая решетка выполнена с отверстиями диаметром 12 мм, центры которых соответствуют расположениям центров гидравлических ячеек пучков стержней ТВС ЦЗ и ПЗ.

Численное моделирование выполнено как для моделей ТВС с подводящим конфузорным трактом, так и без него.

Расчетная сетка моделей — полиэдральная, построенная с использованием пакета ANSYS Meshing [4] и последующей адаптацией в пакете ANSYS Fluent 15.0 [5]. Общее число элементов расчетной сетки равно $\sim 10^8$.

Геометрические характеристики макетов ТВС

Параметр	Обозначение	Значение	
		Макет ТВС ЦЗ	Макет ТВС ПЗ
Наружный диаметр стержня-имитатора твэла, мм	d	20,81	22,53
Нижнее основание трапецевидной навивки, мм	h_1	4,29	3,65
Верхнее основание трапецевидной навивки, мм	h_2	2,15	
Высота трапецевидной навивки, мм	h_0	3,38	2,52
Описанный диаметр стержня-имитатора твэла, мм	D	27,47	
Шаг расположения стержней-имитаторов твэлов, мм	S	27,57	
Шаг дистанционирующей навивки, мм	T	429	
Наибольший зазор между двумя смежными навивками дистанционирующей проволоки, мм	δ_1	0,1	
Наибольший зазор между чехлом и навивкой дистанционирующей проволоки, мм	δ_2	1,0	
Длина стержня-имитатора твэла, мм	L	1040	
Относительный шаг расположения стержней-имитаторов твэлов	S/d	1,33	1,23
Относительный шаг трапецевидной навивки	T/d	20,6	19,0
Гидравлический диаметр (проходного сечения пучка стержней без учета чехла), мм	d_r	17,37	13,84
Гидравлический диаметр модели (проходного сечения пучка стержней с учетом чехла), мм	$d_{г.м}$	14,34	12,28

Для анализа влияния истечения потока воздуха из моделей ТВС на уровень давления в моделях расчетная сетка была продолжена за выходные торцы стержней на расстояние 80 мм (дополнительно анализировалось 180 мм).

Граничные условия на входе для моделей, учитывающих подводный участок экспериментального стенда, состояли в задании расходов центрального и периферийного потоков воздуха при соответствующих

температурах, а для моделей без подводящего участка — в задании равномерного распределения расхода воздушного потока по сечению макетов. На выходе из моделей задано равномерное распределение статического давления. Твердые поверхности расчетных моделей предполагаются адиабатическими с выполнением условия прилипания.

Численное моделирование проводилось с помощью программного комплекса ANSYS Fluent 15.0 [5] с использованием стандартной $(k-\varepsilon)$ -модели турбулентности [6].

Уравнения переноса без учета влияния плавучести и дополнительных источников генерации и порождения диссипации турбулентности записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - Y_k;$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где $G_k = \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ — генерация турбулентной кинетической энергии; $Y_k = 2\rho \varepsilon M_t^2$ — фактор, учитывающий условия сжимаемости течения потока воздуха как идеального газа; $M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$ — турбулентное число Маха; $a = \sqrt{\gamma RT}$ — скорость звука в потоке воздуха.

Турбулентная динамическая вязкость определяется по следующему соотношению:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Для данной модели использован стандартный набор констант: $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Свойства воздуха описывались законом идеального газа.

Сходимость полученного численного решения проверялась по равенству расходов на входе и выходе из пучка стержней. Из условия сходимости вычислений для достижения погрешности определения расходов не более 0,1 % требовалось проведение не менее 2000 итераций.

Полученные при численном моделировании результаты приведены для двух характерных областей течения: области регулярного расположения стержней (центральный стержень) и причехловой области (соседний к угловому стержень). Для каждого из стержней на радиусе, соответствующем полувысоте дистанционирующего ребра, выбрано 5 точек диагностики, размещенных относительно друг друга с шагом 30°.

Рассматриваемые характерные области течения и точки диагностики показаны на рис. 1.

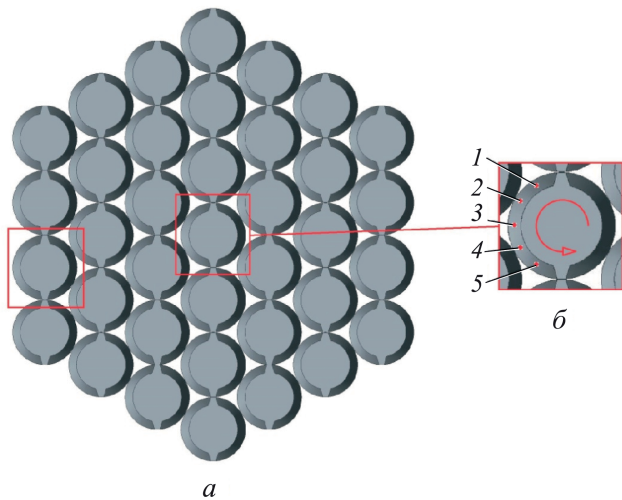


Рис. 1. Пучок стержней и расположение точек диагностики характеристик потока:

a — пучок стержней (чехол не показан); *б* — расположение точек диагностики

Точка *1* расположена со стороны ребра, отклоняющего осевой поток в тангенциальном направлении (наветренная сторона), точка *5* — со стороны ребра, освобождающего сечение для потока (подветренная сторона).

Положение точек фиксировано по отношению к дистанционирующим ребрам и изменяется в пространстве при движении потока от входа в пучок стержней к выходу. Отметим, что на расстоянии вдоль оси моделей, равном $1/6$ шага навивки ребер, геометрия регулярных ячеек, в которых располагаются контрольные точки, повторяется. В связи с этим можно ожидать периодичности характеристик потока воздушного теплоносителя через $1/6$ шага навивки ребер.

Распределение продольной компоненты скорости (близкой по значению к модулю вектора скорости) вдоль потока приведено на рис. 2. При деформировании потока подводящим устройством (рис. 2, *a*) после входного участка протяженностью ~ 550 мм ($\sim 1,3$ шага навивки) значения средних скоростей в точках *1...5* становятся квазистационарными. Наименьшее значение скорости потока соответствует точке *5*, расположенной на подветренной стороне ребра, наибольшее значение скорости — точке *2*. Скорости в точках *1* и *3* близки к скорости в точке *2*. Скорость в точке *4* занимает промежуточное значение. Таким образом, в области стабилизированного течения осевой поток движется вдоль поверхности стержня между ребрами с продольной скоростью, которая с наветренной стороны на $\sim 25\%$ больше, чем с подветренной. Значения скорости периодически (через $1/6$ шага дистанционирующей навивки) изменяются по близкой к гармонической

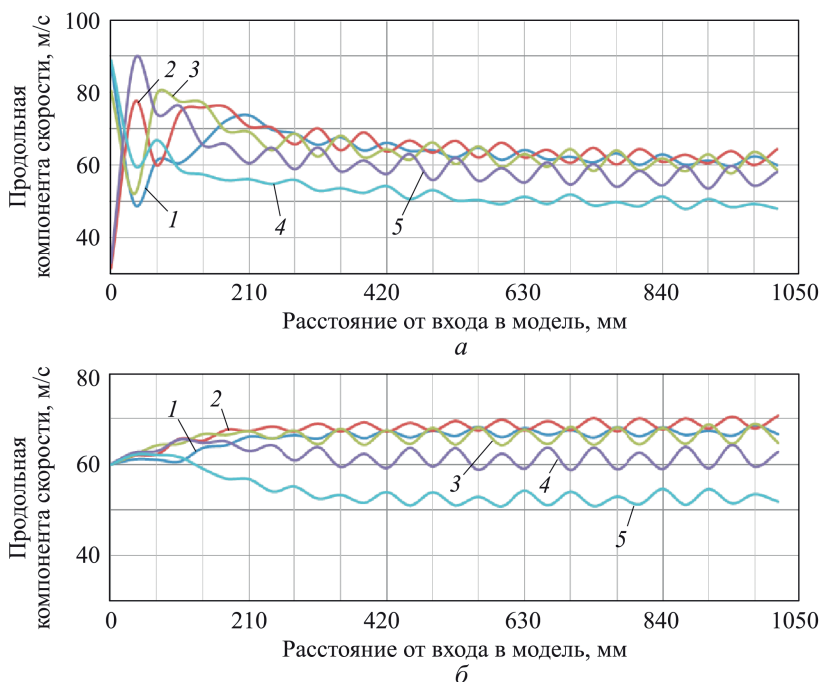


Рис. 2. Распределение продольной компоненты скорости в макете ТВС ЦЗ для входа потока в макет из подводящего участка (а) и для равномерного распределения скорости на входе в макет (б)

зависимости с амплитудой 1...4,5% среднего значения максимальной для подветренной области потока.

В пределах начального участка значения продольной скорости в выделенных точках зависят от их расположения по отношению к отверстиям входной решетки, перестройки струй из отверстий решетки в потоки в трактах пучка стержней. Периодическая компонента в изменении скорости появляется на расстоянии $\sim 0,7$ шага навивки. Значения скорости потока на начальном участке в среднем больше, чем в области квазистабильного течения.

Для равномерного распределения скорости на входе в макет (см. рис. 3) протяженность входного участка меньше, чем для варианта с подводящим устройством и составляет ~ 380 мм ($\sim 0,9$ шага навивки). Скорость в области квазистационарного течения максимальна в точках 1, 2, 3 и минимальна в точках 4 и 5.

Амплитуда гармонической составляющей пульсации средней скорости составляет 1...5%. Скорость потока с наветренной стороны на $\sim 25\%$ больше, чем с подветренной. Изменение скорости в пределах входного участка протекает более плавно, чем в варианте течения за входной решеткой (см. рис. 2, а).

В области стабилизированного течения для двух рассмотренных условий входа потока в макет ТВС наблюдается сдвиг на полпериода

(1/12 шага дистанционирующей навивки) максимумов скорости потока: для тех продольных координат, в которых скорость в точках 1, 3, 5 имеет максимум, скорость в точках 2 и 4 имеет минимум (и наоборот). Таким образом, изменение продольной скорости потока является периодической функцией не только продольной, но и поперечной координаты.

На рис. 3 и 4 приведены характеристики турбулентности (кинетическая энергия и скорость диссипации) в точках 1...5 в зависимости от продольной координаты. В пределах длины макета ТВС не наблюдается полной стабилизации характеристик турбулентности (в области ядра турбулентного течения $y^+ \approx 30$ для точек 1...5). Протяженность участка с интенсивным снижением уровня турбулентных пульсаций скорости и уменьшением масштаба турбулентности составляет около 1...1,5 шага дистанционирующей навивки.

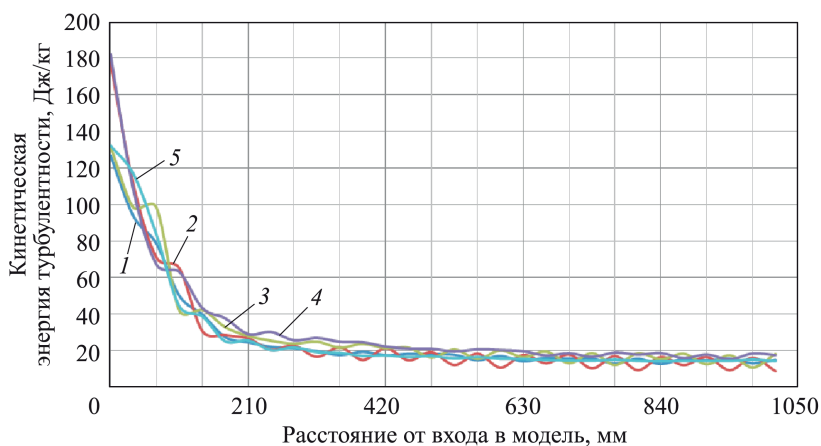


Рис. 3. Кинетическая энергия турбулентности в области регулярных ячеек макета ТВС ЦЗ для входа потока в макет из подводящего участка

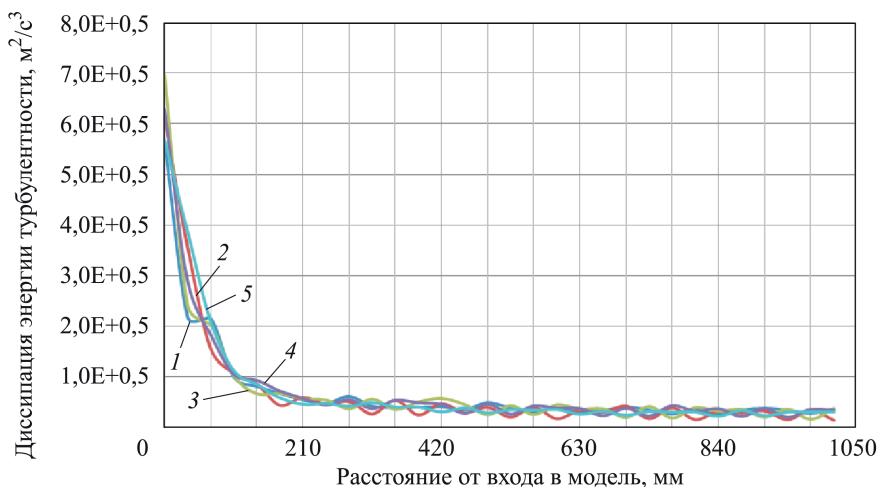


Рис. 4. Диссипация энергии турбулентности в области регулярных ячеек макета ТВС ЦЗ для входа потока в макет из подводящего участка

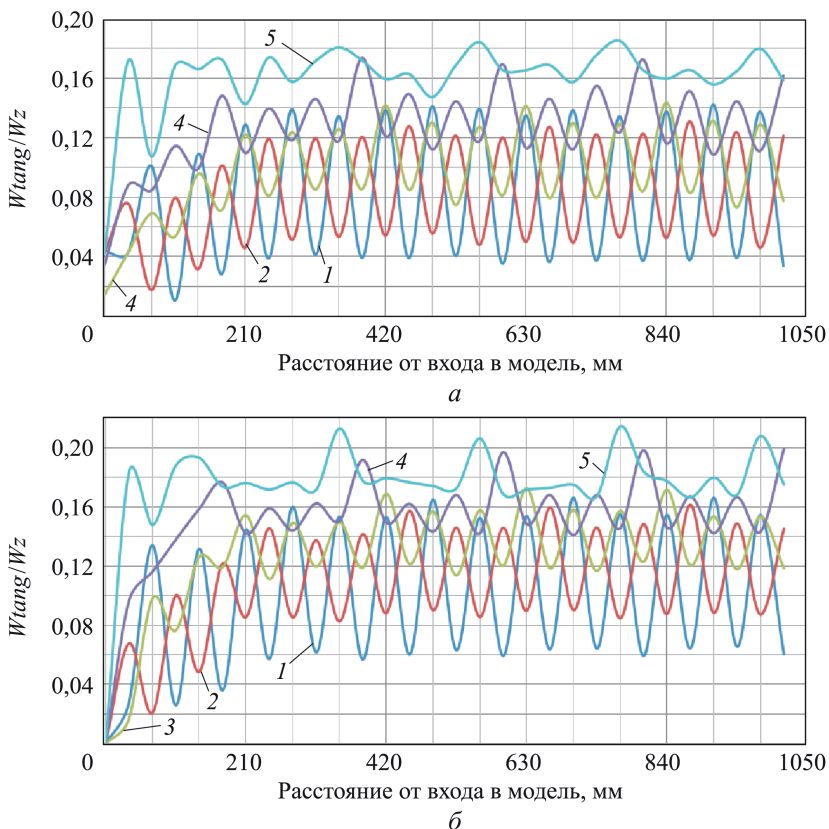


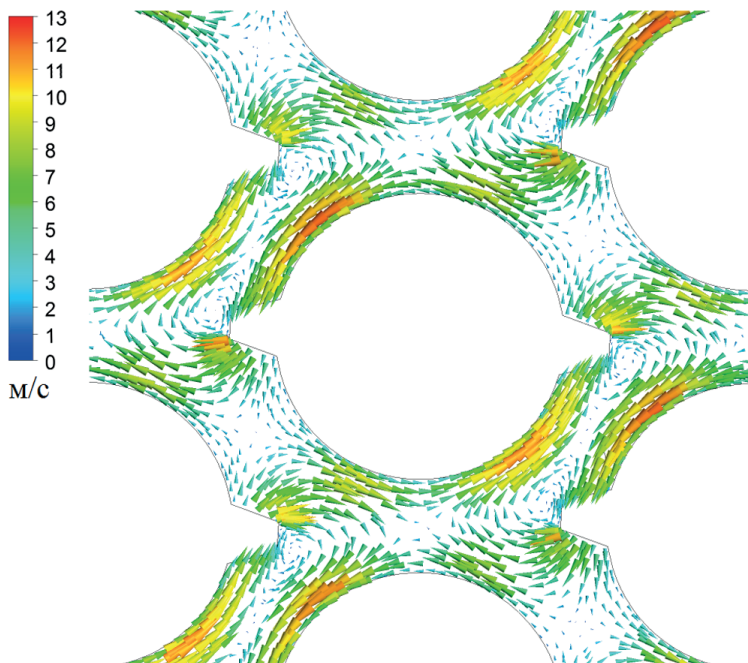
Рис. 5. Отношение тангенциальной и продольной компонент скорости потока в макете ТВС ЦЗ для входа потока в макет из подводящего участка (а) и для равномерного распределения скорости на входе в макет (б)

На рис. 5 показаны значения отношения тангенциальной и продольной компонент скорости потока в макете ТВС ЦЗ как для входа потока в макет из подводящего участка, так и при равномерном распределении скорости потока на входе в макет.

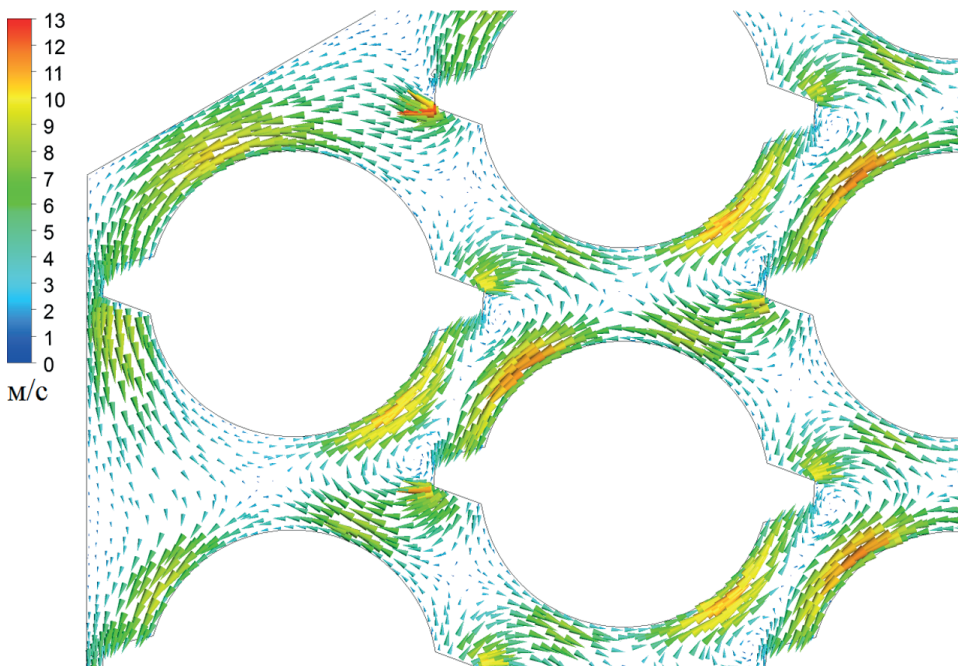
Векторные поля поперечных компонент скорости в области регулярной решетки стержней и в причехловой области показаны на рис. 6.

Влияние ребер навивки на поток проявляется в генерации вторичного течения, имеющего общее направление вдоль ребер, что обеспечивает переток теплоносителя из одного канала в соседний.

В областях, ограниченных смежными ребрами и поверхностью соседних стержней, имеет место вторичное вихревое течение, которое перемещается вслед за положением дистанционирующих ребер. В областях, где смежные ребра перекрывают переток теплоносителя между соседними ячейками, тангенциальная скорость обращается в ноль. Основной обмен потоков в соседних ячейках осуществляется в областях между поверхностями стержней при максимальном удалении дистанционирующих ребер относительно друг друга.



a



б

Рис. 6. Векторное поле поперечных скоростей потока в области регулярных (*a*) и причехловых (*б*) ячеек (521 мм)

В окрестностях контакта ребер соседних стержней происходит локальное ускорение потока, при этом образуется зона пониженного давления.

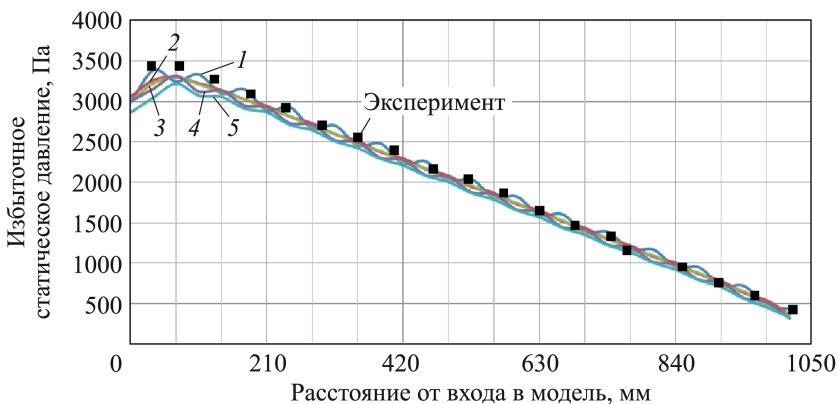


Рис. 7. Распределение статического давления в макете ТВС ЦЗ для входа потока в макет из подводящего участка

В периферийных ячейках пучков стержней поле скорости полностью определяется закруткой потока дистанционирующими ребрами, а также трением теплоносителя о стенку чехла. Кроме того, в периферийной области пучка стержней образуются “открытые” сечения, когда ребра расположены перпендикулярно стенке чехла. На этих участках продольный расход модельного теплоносителя в 1,4 раза превышает расход в ячейках регулярной области. При этом тангенциальная составляющая скорости в указанных зонах стремится к нулю.

Распределение избыточного статического давления в диагностируемых точках 1... 5 для центрального стержня приведено на рис. 7.

Видно, что падение статического давления в пучке стержней содержит периодическую составляющую с шагом 1/6 шага навивки ребер с амплитудой изменения ~ 100 Па. По представленной картине изменения статического давления начальный участок стабилизации течения может быть определен как $\sim 0,25$ шага навивки.

Особенностью распределения статического давления по высоте пучка стержней является наличие на начальном участке зоны пониженного давления в окрестности соприкосновения дистанционирующих ребер соседних стержней или ребра и чехла макета ТВС. Зона пониженного давления перестает наблюдаться через 1... 1,5 шага навивки, что может быть связано со стабилизацией течения в объеме пучка стержней. Отмеченная особенность характерна как для моделей с подводящим участком, так и без него.

Заключение. 1. Осредненные по Рейнольдсу значения продольной и поперечных (тангенциальных) компонент скорости достигают квазистационарного значения на расстоянии от входа в макет ТВС порядка 1,3... 0,9 шага навивки ребер в зависимости от степени возмущения потока на входе в макет. Наименьшие протяженности входного участка соответствуют равномерному распределению скорости потока

перед макетом. Область существенного изменения характеристик турбулентности составляет $1 \dots 1,5$ шага дистанционирующей навивки, однако квазистационарные значения характеристик турбулентности в пределах длины макета ТВС ($\sim 2,4$ шага дистанционирующей навивки) не достигаются.

2. Осредненные по Рейнольдсу квазистационарные значения продольной скорости в области ядра турбулентного потока у поверхности стержня, расположенного в регулярной решетке, периодически изменяются с шагом, равным $1/6$ шага дистанционирующей навивки в направлении вдоль потока. Максимумы продольной скорости в соседних точках вдоль периметра стержня имеют фазовый сдвиг, равный половине углового шага периодичности (180°).

3. Осредненные по Рейнольдсу тангенциальные компоненты скорости достигают стабилизированных значений на расстоянии от входа в макет ТВС порядка $0,9 \dots 1,3$ шага навивки, причем наибольшие значения соответствуют области подветренной части потока, где наряду с периодичностью скорости через $1/6$ шага навивки ребер четко прослеживается периодичность $1/2$ шага навивки ребер. Значения поперечных скоростей составляют $0,04-0,2$ от значений продольных компонент, амплитуда их изменения — $0,02-0,05$.

4. Векторные распределения тангенциальных компонент скорости показывают, что трапецеидальное оребрение создает вторичное течение вдоль направления завивки ребер, содержащее в своем составе вихревые зоны, что инициирует обмен между ячейками в пучках твэлов с подобной геометрией трактов тепловода.

5. Статическое давление в потоке, омывающем оребренные стержни, содержит периодическую составляющую, достигающую $\sim 5\%$ среднего значения статического давления. Область начала квазилинейного изменения статического давления начинается на расстоянии $\sim 0,25$ шага навивки ребер.

6. Анализ полученных данных показывает, что использование стандартной ($k-\varepsilon$)-модели турбулентности для расчетов характеристик течения потока в сборках с оребренными стержнями позволяет определить основные особенности структуры течения.

7. Данные анализа указывают на то, что стабилизация течения потока (потерь давления) наступает существенно раньше, чем стабилизация распределений продольной и поперечной компонент скорости. Стабилизация характеристик турбулентности требует протяженности области течения более трех шагов навивки ребер. Эти данные соответствуют результатам анализа развития турбулентного течения в пристенном пограничном слое.

При необходимости уменьшить длину участка стабилизации в сборках стержней с оребрением необходимо уменьшать турбулентные возмущения потока на входе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белая книга ядерной энергетики* / В.В. Орлов, М.М. Селиверстов, В.А. Тищенко, В.В. Ужанова, В.С. Смирнов, И.Х. Ганев, А.В. Лопаткин, С.В. Брюнин, А.Н. Кархов, С.В. Европин, Г.Е. Шаталов, В.Е. Сытников, П.И. Долгошеев, В.Б. Козлов, В.П. Фотин / под ред. Е.О. Адамова. М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 1998. 356 с.
2. *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.
3. *Fomichev D.V., Solonin V.I.* A CFD Analysis of Hydraulic Characteristics of the Rod Bundles in the BREST-OD-300 Wire-Spaced Fuel Assemblies // *International Conference on Nuclear Energy Science and Technology, Zurich, Switzerland, 2014*. Vol. 8. No. 7. Part XII. P. 1514–1519.
4. *ANSYS Meshing User's Guide*, Rel. 14.5. ANSYS Inc., 2012.
5. *ANSYS FLUENT, Theory Guide*, Rel. 14.5. ANSYS Inc., 2012.
6. *Launder B.E., Spalding D.B.* Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London, England: Academic Press, 1972.

REFERENCES

- [1] Orlov V.V., Seliverstov M.M., Tishchenko V.A., Zhanova V.U., Smirnov V.S., Ganey I.H., Lopatkin A.V., Bryunin S.V., Karhu A.N., Evropin S.V., Shatalov G.E., Sitnikov V.E., Dolgosheev P.I. Kozlov V.B., Photinus V.P., Adamov E.O., ed. *The White Book of Nuclear Energy*. Moscow, NIKIET Publ, 1998. 356 p.
- [2] Dragunov Yu.G., Lemekhov V.V., Smirnov V.S., Chernetsov N.G. The Technical Solutions and Development Phases of the Reactor Plant BREST-OD-300. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy J.], 2012, vol. 113, no. 1, pp. 58–64 (in Russ.).
- [3] Fomichev D.V., Solonin V.I. A CFD Analysis of Hydraulic Characteristics of the Rod Bundles in the BREST-OD-300 Wire-Spaced Fuel Assemblies. *International Conference on Nuclear Energy Science and Technology, Zurich, Switzerland, 2014*, vol. 8, no. 7, part XII, pp. 1514–1519.
- [4] *ANSYS Meshing User's Guide*, Rel. 14.5. ANSYS Inc., 2012.
- [5] *ANSYS FLUENT, Theory Guide*, Rel. 14.5. ANSYS Inc., 2012.
- [6] *Launder B.E., Spalding D.B.* Lectures in Mathematical Models of Turbulence. London, England, Academic Press, 1972.

Статья поступила в редакцию 26.11.2014

Фомичев Дмитрий Вадимович — аспирант кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сотрудник отдела “Теплофизика” ОАО “НИКИЭТ”. Автор трех научных работ в области ядерной энергетики. АО “НИКИЭТ”, Российская Федерация, 107140, Москва, Малая Красносельская ул., д. 2/8.

Fomichev D.V. — postgraduate student of the “Nuclear Reactors and Plants” Department of Bauman Moscow State Technical University. Employee of the “Thermal Physics” Department of JSC “NIKIET”. Author of 3 publications in the field of nuclear technologies. JSC “NIKIET”, Malaya Krasnosel'skaya ul. 2/8, Moscow, 107140 Russian Federation.

Солонин Владимир Иванович — 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, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

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

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Фомичев Д.В., Солонин В.И. Структура турбулентного потока в пучках стержней тепловыделяющих сборок реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 4–16.

Please cite this article in English as:

Fomichev D.V., Solonin V.I. Structure of Turbulent Flow in the Pin Bundles of the BREST-OD-300. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 3, pp. 4–16.