

УДК 621.039.5

## **Определение параметров интегральной модели турбулентности применительно к расчету обтекания стержневых сборок в приближении пористого тела**

**М.Н. Власов, А.С. Корсун, Ю.А. Маслов, И.Г. Меринов, В.И. Рачков, В.С. Харитонов**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва*

E-mail: maslovyu@mail.ru

В работе представлены результаты расчетного моделирования обтекания потоком однофазного теплоносителя квадратного и треугольного пучков стержней для определения параметров разрабатываемой интегральной модели турбулентности, которая может быть использована при моделировании активных зон ядерных реакторов и теплообменников в приближении анизотропного пористого тела.

**Ключевые слова:** модель пористого тела, анизотропия, интегральная модель турбулентности, трехмерное моделирование, тепломассоперенос.

### **Введение**

В настоящее время в кодах, используемых при разработке и проектировании ядерно-энергетических установок для расчета трехмерных теплогидравлических процессов в активных зонах и теплообменном оборудовании, помимо попячейковой и CFD-моделей (от англ. Computational Fluid Dynamics) применяется модель пористого тела, в которой рассмотрение процессов теплопереноса производится относительно локально средних по объему значений скоростей, температур, давлений и т.п. Модель пористого тела была развита [1, 2] для расчета сложного продольно-поперечного обтекания стержневых теплоделяющих сборок и трубных пучков теплообменников. В этих работах был предложен способ описания объемной силы сопротивления на основании данных о сопротивлении при поперечном и продольном обтекании пучка. Однако в работе авторов [3] было показано, что такое описание объемной силы сопротивления не является корректным. Неверным также является использование в этом случае скалярной величины эффективной вязкости обтекающего стержневые сборки потока теплоносителя. Помимо этого было показано [4], что на интенсивность переноса тепла в потоке, обтекающем стержневые структуры, влияет не только направление потока тепла по отношению к ориентации пучка стержней, но и то, под каким углом сборка обтекается потоком теплоносителя. Тем самым было отмечено, что в данном случае анизотропия теплопереноса имеет более сложный характер по сравнению со случаем теплопереноса в анизотропных твердых телах.

С учетом всего вышеизложенного применительно к описанию процессов тепло-массо-переноса в активных зонах и теплообменном оборудовании была разработана модель анизотропного пористого тела [5, 6]. Для учета анизотропии процессов переноса тепла и импульса в уравнениях модели пористого тела, полученных путем локального осреднения по объему исходных уравнений турбулентного переноса типа Рейнольдса, использовался следующий подход. В число аргументов, от которых зависит рассматриваемый поток, дополнительно включался вектор, определяющий ориентированные свойства среды. Это позволило корректно учесть силы инерции потока в стержневой структуре, анизотропию процессов переноса импульса и тепла, уточнить описание объемной силы сопротивления, а также условий на границах пористой структуры при решении задач движения теплоносителя и теплопереноса в нем.

Замыкающие соотношения модели анизотропного пористого тела, определяющие компоненты тензоров эффективной вязкости, теплопроводности и силы сопротивления, могут быть получены с помощью интегральной модели турбулентности. Работ, посвященных построению интегральной модели турбулентности для потока, обтекающего пористую структуру, опубликовано достаточно много, к ним, например, относятся работы [7, 8]. Вместе с тем необходимо отметить, что ни в одной из известных работ исследование не было доведено до определения эффективных коэффициентов переноса по осредненным параметрам турбулентности.

Целью настоящей работы являлось проведение систематических расчетных исследований обтекания стержневыхборок с помощью CFD-кодов для определения параметров, необходимых для разрабатываемой интегральной модели турбулентности, а также проверка полученной интегральной модели турбулентности на основе имеющихся экспериментальных данных.

### Интегральная модель турбулентности

Интегральная модель турбулентности была получена путем применения процедуры локального осреднения уравнений  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности по объему ячейки периодичности структуры стержневой сборки. В результате были определены уравнения переноса осредненной кинетической энергии турбулентности ( $k$ ) и осредненной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ( $\varepsilon$ ):

$$\phi \frac{\partial}{\partial \tau} k + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \phi k = \frac{\partial}{\partial x_j} a^k \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_u + P_d - \phi \varepsilon, \quad (1)$$

$$\phi \frac{\partial}{\partial \tau} \varepsilon + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \phi \varepsilon = \frac{\partial}{\partial x_j} a_{ij}^\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + C_\varepsilon \frac{\varepsilon}{k} [P_u + P_d - \phi \varepsilon]. \quad (2)$$

Здесь для упрощения записи дважды осредненные (по времени и по представительному объему) значения величин обозначены символами без знаков осреднения. В уравнениях (1) и (2)  $a^k$  и  $a^\varepsilon$  — эффективные коэффициенты диффузионного переноса энергии турбулентности и скорости ее диссипации,  $P_u$  и  $P_d$  — порождение турбулентности за счет осредненного движения и скоростей отклонения.

Осредненные параметры турбулентного потока  $k$  и  $\varepsilon$  позволяют найти значение коэффициента турбулентной вязкости  $\nu_t^{\text{яч}}$ , знание которого необходимо для определения эффективных коэффициентов переноса в модели анизотропного пористого тела. В проведенных расчетных исследованиях обтекания потоком теплоносителя пучков стержней определялась величина коэффициента пропорциональности  $C_\nu$  в выражении, связывающем  $\nu_t^{\text{яч}}$  с кинетической энергией турбулентности и скоростью ее диссипации:

$$\nu_t^{\text{яч}} = C_\nu k^2 / \varepsilon. \quad (3)$$

### Моделирование поперечного и продольного обтекания стержневой структуры

Расчетное исследование обтекания сборки стержней выполнялись с помощью программного кода ANSYS CFX. При этом использовалась стандартная  $k-\varepsilon$  модель турбулентности, которая позволяет получать требуемые интегральные параметры турбулентности непосредственно в ходе осреднения полученных их локальных значений.

**Постановка задачи.** Моделировалось поперечное и продольное обтекание потоком воды с температурой около 25 °С сборки круглых стержней (рис. 1). Диаметр стержней равнялся 10 мм. Расход через ячейку периодичности сборки задавался таким образом, чтобы числа Рейнольдса  $Re$ , определяемые по гидравлическому диаметру ячейки, перекрывали диапазон от  $10^4$  до  $10^6$ . Расчеты проводились для квадратной и треугольной компоновок стержней в сборке и значений пористости  $\phi = 0,4, 0,6, 0,8$ . Значение пористости варьировалось изменением расстояния между стержнями в интервале от 11,4 до 19,8 мм для квадратной и от 12,3 до 21,3 мм для треугольной компоновок.

В силу симметрии задачи и с целью уменьшения вычислительных затрат все расчеты проводились на половине и четверти ячейки для случая поперечного и продольного обтекания стержней соответственно.

**Граничные условия.** На торцевых границах расчетной области задавались периодические граничные условия, а на боковых — условие равенства нулю диффузионных и конвективных потоков (граничное условие симметрии). На границах «твердое тело (оболочка стержня)–жидкость» задавалось условие прилипания жидкости к стенке.

**Расчетная сетка.** Расчетная сетка создавалась при помощи программы ANSYS MESH. Размер элемента сетки задавался таким образом, чтобы получить сеточную сходимость решения.

### Результаты расчетного исследования обтекания стержневыхборок

Расчеты обтекания стержневыхборок проводились с использованием масштабируемых пристеночных функций. Был использован второй порядок аппроксимации. В качестве критерия сходимости были выбраны значения дисбаланса менее 1 % и максимальных локальных невязок не более  $10^{-5}$ .

Для каждого из рассмотренных режимов течения и варианта компоновки стержней в сборке было получено стационарное распределение скоростей, давления, кинетической энергии турбулентных пульсаций и изменение скорости диссипации турбулентной энергии в пределах расчетного объема. В ходе последующей обработки получены искомые интегральные характеристики течения: средние по ячейке осреднения значения кинетической энергии турбулентности  $k$ , скорости ее диссипации  $\varepsilon$ , значения коэффициента

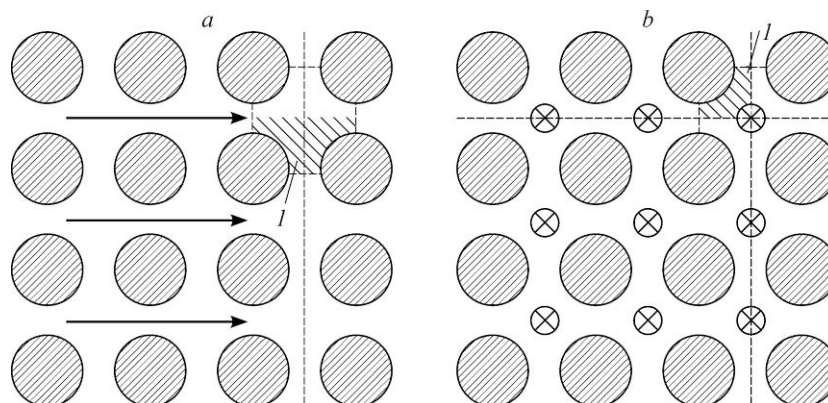


Рис. 1. Квадратная решетка стержней.

$a$  — поперечное обтекание,  $b$  — продольное обтекание;  $l$  — моделируемая область.

Таблица 1

Результаты расчета для поперечного обтекания сборки с квадратной упаковкой круглых стержней

$\phi$	Re, $10^4$	$U_x$ , м/с	$\Delta P$ , Па	$k$ , $\text{м}^2/\text{с}^2$	$\varepsilon$ , $\text{м}^2/\text{с}^3$	$v_t^{\text{яч}}$ , $\text{м}^2/\text{с}$ , $10^{-5}$	$C_v$
0,40	1	$1,34 \cdot 10^0$	$1,51 \cdot 10^3$	$3,08 \cdot 10^{-1}$	$1,34 \cdot 10^2$	$8,15 \cdot 10^0$	0,11
	3	$4,02 \cdot 10^0$	$1,30 \cdot 10^4$	$2,79 \cdot 10^0$	$3,67 \cdot 10^3$	$2,49 \cdot 10^1$	0,12
	10	$1,34 \cdot 10^1$	$1,39 \cdot 10^3$	$3,15 \cdot 10^1$	$1,40 \cdot 10^5$	$8,60 \cdot 10^1$	0,12
	30	$4,02 \cdot 10^1$	$1,19 \cdot 10^6$	$2,85 \cdot 10^2$	$3,75 \cdot 10^6$	$2,65 \cdot 10^2$	0,12
	100	$1,34 \cdot 10^2$	$1,31 \cdot 10^7$	$3,34 \cdot 10^3$	$1,38 \cdot 10^8$	$9,57 \cdot 10^2$	0,12
0,51	1	$8,48 \cdot 10^{-1}$	$3,19 \cdot 10^2$	$1,01 \cdot 10^{-1}$	$1,69 \cdot 10^1$	$6,75 \cdot 10^0$	0,11
	3	$2,54 \cdot 10^0$	$2,73 \cdot 10^3$	$8,89 \cdot 10^{-1}$	$4,55 \cdot 10^2$	$2,01 \cdot 10^1$	0,12
	10	$8,48 \cdot 10^0$	$2,99 \cdot 10^4$	$1,02 \cdot 10^1$	$1,75 \cdot 10^4$	$7,03 \cdot 10^1$	0,12
	30	$2,54 \cdot 10^1$	$2,61 \cdot 10^5$	$9,25 \cdot 10^1$	$4,83 \cdot 10^5$	$2,15 \cdot 10^2$	0,12
	100	$8,48 \cdot 10^1$	$3,04 \cdot 10^6$	$1,15 \cdot 10^3$	$1,89 \cdot 10^7$	$8,16 \cdot 10^2$	0,12
0,60	1	$5,97 \cdot 10^{-1}$	$1,07 \cdot 10^2$	$4,21 \cdot 10^{-2}$	$3,71 \cdot 10^0$	$5,48 \cdot 10^0$	0,11
	3	$1,79 \cdot 10^0$	$8,85 \cdot 10^2$	$3,53 \cdot 10^{-1}$	$9,61 \cdot 10^1$	$1,54 \cdot 10^1$	0,12
	10	$5,97 \cdot 10^0$	$9,75 \cdot 10^3$	$4,07 \cdot 10^0$	$3,67 \cdot 10^3$	$5,41 \cdot 10^1$	0,12
	30	$1,79 \cdot 10^1$	$8,45 \cdot 10^4$	$3,63 \cdot 10^1$	$1,00 \cdot 10^5$	$1,62 \cdot 10^2$	0,12
	100	$5,97 \cdot 10^1$	$9,98 \cdot 10^5$	$4,56 \cdot 10^2$	$4,01 \cdot 10^6$	$6,25 \cdot 10^2$	0,12
0,80	1	$2,23 \cdot 10^{-1}$	$8,83 \cdot 10^0$	$5,43 \cdot 10^{-3}$	$8,73 \cdot 10^{-2}$	$3,88 \cdot 10^0$	0,12
	3	$6,71 \cdot 10^{-1}$	$7,33 \cdot 10^1$	$4,57 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^0$	$1,10 \cdot 10^1$	0,12
	10	$2,24 \cdot 10^0$	$7,96 \cdot 10^2$	$5,07 \cdot 10^{-1}$	$8,35 \cdot 10^1$	$3,71 \cdot 10^1$	0,12
	30	$6,71 \cdot 10^0$	$7,10 \cdot 10^3$	$4,62 \cdot 10^0$	$2,28 \cdot 10^3$	$1,13 \cdot 10^2$	0,12
	100	$2,24 \cdot 10^1$	$7,80 \cdot 10^4$	$5,19 \cdot 10^1$	$8,53 \cdot 10^4$	$3,86 \cdot 10^2$	0,12

Таблица 2

Результаты расчета для продольного обтекания сборки с квадратной упаковкой круглых стержней

$\phi$	Re, $10^4$	$U_x$ , м/с	$\Delta P$ , Па	$k$ , $\text{м}^2/\text{с}^2$	$\varepsilon$ , $\text{м}^2/\text{с}^3$	$v_t^{\text{яч}}$ , $\text{м}^2/\text{с}$ , $10^{-6}$	$C_v$
0,40	1	$1,34 \cdot 10^0$	$6,98 \cdot 10^1$	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^0$	$1,71 \cdot 10^1$	0,14
	3	$4,02 \cdot 10^0$	$5,20 \cdot 10^2$	$9,55 \cdot 10^{-2}$	$3,82 \cdot 10^1$	$4,37 \cdot 10^1$	0,18
	10	$1,34 \cdot 10^1$	$4,64 \cdot 10^3$	$8,78 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^3$	$1,29 \cdot 10^2$	0,25
	30	$4,02 \cdot 10^1$	$3,37 \cdot 10^4$	$6,49 \cdot 10^0$	$4,18 \cdot 10^4$	$3,48 \cdot 10^2$	0,34
	100	$1,34 \cdot 10^2$	$3,01 \cdot 10^5$	$5,87 \cdot 10^1$	$1,34 \cdot 10^6$	$1,05 \cdot 10^3$	0,41
0,51	1	$8,47 \cdot 10^{-1}$	$1,87 \cdot 10^1$	$4,41 \cdot 10^{-3}$	$1,97 \cdot 10^{-1}$	$1,34 \cdot 10^1$	0,14
	3	$2,54 \cdot 10^0$	$1,40 \cdot 10^2$	$3,44 \cdot 10^{-2}$	$6,39 \cdot 10^0$	$3,38 \cdot 10^1$	0,18
	10	$8,47 \cdot 10^0$	$1,24 \cdot 10^3$	$3,14 \cdot 10^{-1}$	$2,58 \cdot 10^2$	$9,84 \cdot 10^1$	0,26
	30	$2,54 \cdot 10^1$	$8,95 \cdot 10^3$	$2,30 \cdot 10^0$	$7,20 \cdot 10^3$	$2,63 \cdot 10^2$	0,36
	100	$8,47 \cdot 10^1$	$8,00 \cdot 10^4$	$2,07 \cdot 10^1$	$2,18 \cdot 10^5$	$7,87 \cdot 10^2$	0,40
0,60	1	$5,95 \cdot 10^{-1}$	$6,59 \cdot 10^0$	$1,98 \cdot 10^{-3}$	$4,59 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^1$	0,13
	3	$1,78 \cdot 10^0$	$4,94 \cdot 10^1$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$1,51 \cdot 10^0$	$2,83 \cdot 10^1$	0,18
	10	$5,95 \cdot 10^0$	$4,42 \cdot 10^2$	$1,43 \cdot 10^{-1}$	$6,08 \cdot 10^1$	$8,25 \cdot 10^1$	0,25
	30	$1,79 \cdot 10^1$	$3,20 \cdot 10^3$	$1,05 \cdot 10^0$	$1,70 \cdot 10^3$	$2,20 \cdot 10^2$	0,34
	100	$5,95 \cdot 10^1$	$2,84 \cdot 10^4$	$9,37 \cdot 10^0$	$5,62 \cdot 10^4$	$6,55 \cdot 10^2$	0,42
0,80	1	$2,23 \cdot 10^{-1}$	$3,51 \cdot 10^{-1}$	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$7,78 \cdot 10^{-4}$	$7,63 \cdot 10^0$	0,12
	3	$6,69 \cdot 10^{-1}$	$2,69 \cdot 10^0$	$1,75 \cdot 10^{-3}$	$2,83 \cdot 10^{-2}$	$1,83 \cdot 10^1$	0,17
	10	$2,23 \cdot 10^0$	$2,43 \cdot 10^1$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^0$	$5,30 \cdot 10^1$	0,23
	30	$6,69 \cdot 10^0$	$1,77 \cdot 10^2$	$1,21 \cdot 10^{-1}$	$3,31 \cdot 10^1$	$1,42 \cdot 10^2$	0,32
	100	$2,23 \cdot 10^1$	$1,56 \cdot 10^3$	$1,07 \cdot 10^0$	$1,17 \cdot 10^3$	$4,19 \cdot 10^2$	0,42

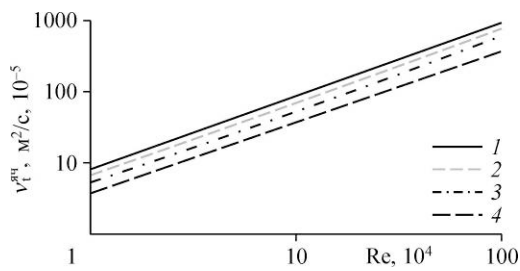


Рис. 2. Зависимость средней величины коэффициента турбулентной вязкости при поперечном обтекании сборки с квадратной упаковкой круглых стержней от числа  $Re$  и пористости  $\phi$ .  $\phi = 0,4$  (1),  $0,5$  (2),  $0,6$  (3),  $0,8$  (4).

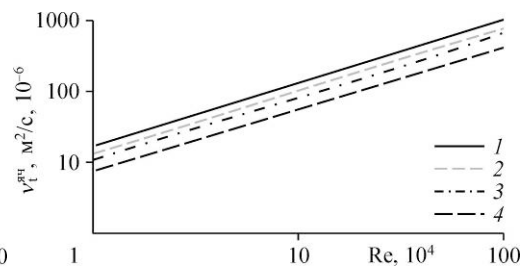


Рис. 3. Зависимость средней величины коэффициента турбулентной вязкости при продольном обтекании сборки с квадратной упаковкой круглых стержней от числа  $Re$  и пористости  $\phi$ . Обозначения см. на рис. 2.

кинематической турбулентной вязкости  $\nu_t^{яч}$  и коэффициента пропорциональности  $C_v$ , в выражении (3). Эти характеристики представлены в табл. 1, 2 для поперечного и продольного обтекания сборки с квадратной упаковкой круглых стержней в зависимости от числа  $Re$  и пористости  $\phi$ .

Полученные средние значения коэффициента турбулентной вязкости при поперечном и продольном обтекании сборки приведены на рис. 2 и 3. Зависимость коэффициента турбулентной вязкости от скорости потока близка к линейной, отклонение показателя степени от единицы не превышает 4%. Это совпадает с результатами экспериментальных исследований [9].

Зависимость интегрального коэффициента  $C_v$  от числа  $Re$  при поперечном и продольном обтекании сборки представлена на рис. 4 и 5. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что интегральный коэффициент  $C_v$  при поперечном обтекании сборки в рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса практически постоянен и может быть принят равным 0,118, в то время как при продольном обтекании он является функцией числа Рейнольдса:  $C_v = 0,0134 \cdot Re^{0,25}$ .

Для анализа влияния типа упаковки стержней также были проведены расчетные исследования поперечного обтекания пучка стержней с треугольной компоновкой (рис. 6). Результаты расчета представлены в табл. 3, в которой  $Re_H$  — число Рейнольдса, определяемое по шагу решетки стержней.

Анализ полученных результатов (рис. 7, 8) показал, что тип упаковки стержней на результаты расчета влияет незначительно.

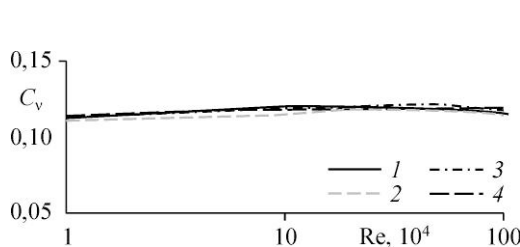


Рис. 4. Зависимость значения интегрального коэффициента  $C_v$  при поперечном обтекании сборки с квадратной упаковкой круглых стержней от числа  $Re$  и пористости  $\phi$ . Обозначения см. на рис. 2.

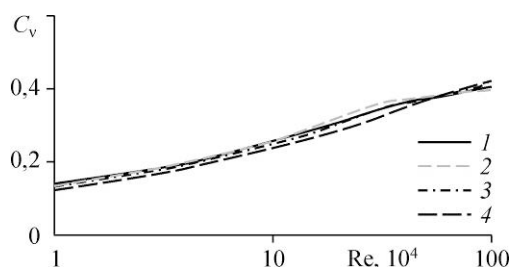


Рис. 5. Зависимость значения интегрального коэффициента  $C_v$  при продольном обтекании сборки с квадратной упаковкой круглых стержней от числа  $Re$  и пористости  $\phi$ . Обозначения см. на рис. 2.

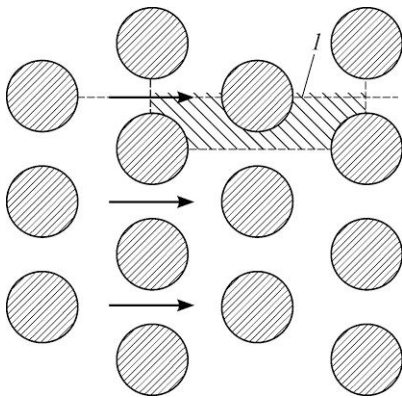


Рис. 6. Треугольная решетка стержней (поперечное обтекание).  
1 — моделируемая область.

По результатам всей серии расчетов следует отметить, что интегральный коэффициент  $C_v$ , связывающий локально-среднее значение коэффициента турбулентной вязкости  $\nu_t^{яч}$  с величинами средней энергии турбулентности  $k$  и скорости диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$  в выражении (3), в отличие от локальной модели турбулентности не является константой, а зависит от направления обтекания и числа Рейнольдса и практически не зависит от вида упаковки и пористости структуры.

Таблица 3

Результаты расчета для поперечного обтекания сборки с треугольной упаковкой круглых стержней

$\phi$	$Re_H, 10^4$	$U_x, \text{м/с}$	$\Delta P, \text{Па}$	$k, \text{м}^2/\text{с}^2, 10^{-2}$	$\varepsilon, \text{м}^2/\text{с}^3$	$\nu_t^{яч}, \text{м}^2/\text{с}, 10^{-4}$	$C_v$
0,40	1,2	$4,50 \cdot 10^{-1}$	$5,57 \cdot 10^2$	$6,24 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \cdot 10^0$	$4,32 \cdot 10^0$	0,11
	12,0	$4,50 \cdot 10^0$	$5,02 \cdot 10^4$	$6,09 \cdot 10^0$	$1,03 \cdot 10^3$	$4,33 \cdot 10^1$	0,12
	120,0	$4,51 \cdot 10^1$	$4,65 \cdot 10^6$	$6,03 \cdot 10^2$	$9,64 \cdot 10^5$	$4,36 \cdot 10^2$	0,12
0,60	1,2	$3,00 \cdot 10^{-1}$	$1,49 \cdot 10^2$	$3,06 \cdot 10^{-2}$	$2,00 \cdot 10^{-1}$	$5,08 \cdot 10^0$	0,11
	12,0	$3,00 \cdot 10^0$	$1,41 \cdot 10^4$	$3,01 \cdot 10^0$	$2,00 \cdot 10^2$	$5,08 \cdot 10^1$	0,11
	120	$3,00 \cdot 10^1$	$1,34 \cdot 10^6$	$2,97 \cdot 10^2$	$1,93 \cdot 10^5$	$5,06 \cdot 10^2$	0,11
0,80	1,2	$2,25 \cdot 10^{-1}$	$3,88 \cdot 10^1$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$3,92 \cdot 10^{-2}$	$3,18 \cdot 10^0$	0,11
	12,0	$2,25 \cdot 10^0$	$3,68 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^0$	$3,91 \cdot 10^1$	$3,17 \cdot 10^1$	0,12
	120,0	$2,25 \cdot 10^1$	$3,48 \cdot 10^5$	$1,01 \cdot 10^2$	$3,77 \cdot 10^4$	$3,13 \cdot 10^2$	0,12

### Тестирование интегральной модели турбулентности

Среднее значение коэффициента кинематической турбулентной вязкости  $\nu_t^{яч}$  является одним из основных параметров интегральной  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, поскольку по величине  $\nu_t^{яч}$  в данной точке путем введения двух корректирующих множителей можно определить главные компоненты тензоров переноса для всех переносимых субстанций (тепла, импульса, энергии турбулентности  $k$ , скорости диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$  и др.). При этом первый множитель учитывает род переносимой субстанции и имеет смысл аналога

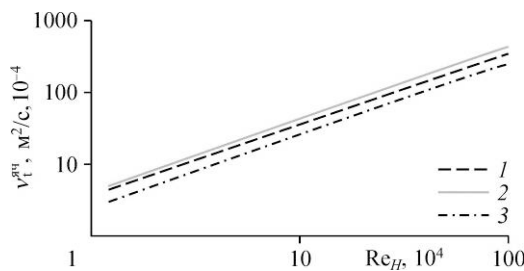


Рис. 7. Зависимость средней величины коэффициента турбулентной вязкости при поперечном обтекании сборки с треугольной упаковкой круглых стержней от числа  $Re_H$  и пористости  $\phi$   
 $\phi = 0,4$  (1),  $0,6$  (2),  $0,8$  (3).

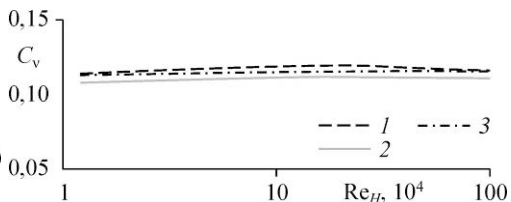


Рис. 8. Изменение значения интегрального коэффициента  $C_v$  при поперечном обтекании сборки с треугольной упаковкой круглых стержней от числа  $Re_H$  и пористости  $\phi$ .  
Обозначения см. на рис. 7.

турбулентного числа Прандтля для соответствующей субстанции, а второй — учитывает геометрию анизотропной стержневой структуры и направление переноса субстанции. В частности, для компонент тензоров эффективной теплопроводности и вязкости применительно к моделированию тепломассопереноса в стержневой сборке в приближении анизотропного пористого тела было получено

$$\lambda_{ij} = ((\lambda + \rho c \frac{v_t^{яч}}{Pr_t})(\phi - \phi_1) + \lambda^{ст})\delta_{ij} + ((\lambda + \rho c \frac{v_t^{яч}}{Pr_t})\phi_1 - \lambda^{ст})n_i n_j, \quad (4)$$

$$\mu_{\uparrow\perp} = v_t^{яч}(\phi - \phi_1)\rho, \quad \mu_{\perp\uparrow} = v_t^{яч} \cdot \phi\rho, \quad \mu_{\perp\perp} = v_t^{яч}(\phi - \phi_1)\rho, \quad (5)$$

здесь  $\lambda$  — молекулярная теплопроводность теплоносителя,  $\rho, c$  — плотность и теплоемкость теплоносителя соответственно,  $\phi_1$  — пористость структуры при плотной упаковке стержней,  $\lambda^{ст}$  — теплопроводность через стержни,  $\lambda_{ij}$  — компоненты тензора эффективной теплопроводности,  $Pr_t$  — турбулентное число Прандтля, которое принималось равным единице,  $n_i, n_j$  — компоненты единичного вектора, ориентированного вдоль оси стержней,  $\delta_{ij}$  — единичный тензор,  $\mu_{\uparrow\perp}, \mu_{\perp\uparrow}, \mu_{\perp\perp}$  — «опорные» коэффициенты эффективной вязкости, соответствующие продольному ( $\mu_{\perp\uparrow}$ ) и поперечному ( $\mu_{\uparrow\perp}, \mu_{\perp\perp}$ ) обтеканию пучка стержней [10].

Полученные соотношения для компонент тензоров эффективной теплопроводности и вязкости были сопоставлены с данными экспериментальных исследований и рекомендациями по описанию анизотропных свойств тепломассопереноса в структурах типа пучков стержней или труб, полученными ранее авторами настоящего исследования [11].

Зависимость эффективной теплопроводности поперек стержней при продольном обтекании квадратной решетки стержней от числа  $Re$  представлена на рис. 9. Там же приведены результаты расчета эффективной теплопроводности с помощью коэффициента межканального турбулентного обмена теплом  $\mu_{тур}^T$ :

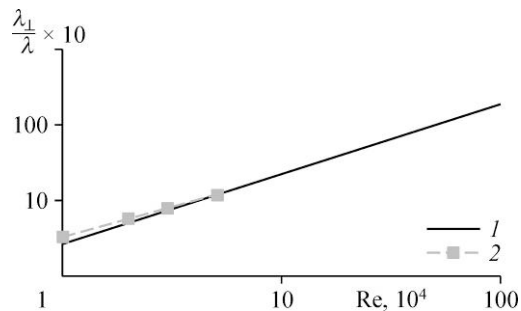
$$\lambda = \mu_{тур}^T S_{яч} \bar{u} \rho c, \quad (6)$$

где  $S_{яч}$  — площадь эквивалентной ячейки решетки,  $\bar{u}$  — средняя по ячейке скорость теплоносителя. Коэффициент  $\mu_{тур}^T$  определялся по формуле, обобщающей экспериментальные данные авторов [12–14]:

$$\mu_{тур}^T = \frac{1}{150\sqrt{s/d-1} \cdot Re^{0,2} \cdot d}. \quad (7)$$

Разница в результатах, полученных с использованием интегральной модели турбулентности и с помощью коэффициента  $\mu_{тур}^T$ , не превышает 5 %, что сопоставимо с разбросом исходных экспериментальных данных по коэффициентам межканального обмена.

Рис. 9. Эффективная теплопроводность поперек стержней при продольном обтекании квадратной решетки стержней.  
1 — интегральная модель турбулентности,  
2 — расчет на основе коэффициента  $\mu_{тур}^T$  по формуле (6);  $s/d = 1,35$ .



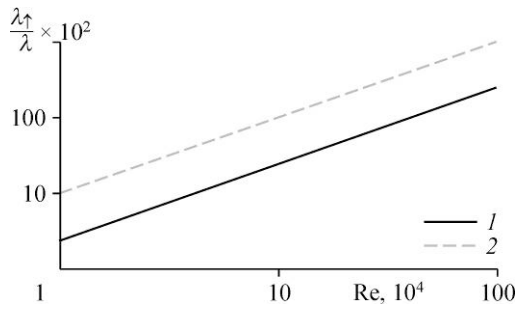


Рис. 10. Эффективная теплопроводность вдоль стержней при поперечном обтекании квадратной решетки стержней.

1 — интегральная модель турбулентности,  
2 — эксперимент [9];  $s/d = 1,35$ .

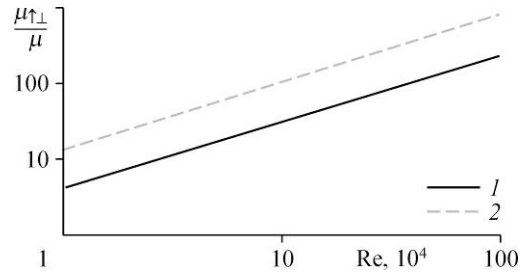


Рис. 11. Опорный коэффициент вязкости  $\mu_{\uparrow\perp}$ .

1 — интегральная модель турбулентности,  
2 — расчет на основе коэффициента  $\mu_{\text{тур}}^{\text{и}}$   
по формуле (8);  $s/d = 1,35$ .

Эффективная теплопроводность в направлении вдоль и поперек стержней при их поперечном обтекании экспериментально определена в единственной работе [9] для шагов  $s/d = 1,4$  и  $2,0$ . На рис. 10 результаты расчета по интегральной модели эффективного коэффициента теплопроводности вдоль стержней при их поперечном обтекании сопоставляются с экспериментальной зависимостью [9], экстраполированной на относительный шаг упаковки  $s/d = 1,35$ .

Зависимость опорного коэффициента вязкости  $\mu_{\uparrow\perp}$  от числа  $Re$  представлена на рис. 11. Расчет по формуле (5) сопоставляется с расчетом с использованием коэффициента межканального обмена импульсом  $\mu_{\text{тур}}^{\text{и}}$  по соотношению

$$\mu_{\uparrow\perp} / \mu = \pi \sqrt{3} \mu_{\text{тур}}^{\text{и}} d Re / 8, \quad (8)$$

где  $\mu$  — молекулярная вязкость. При этом коэффициент  $\mu_{\text{тур}}^{\text{и}}$  определялся по экспериментальной зависимости [12]:

$$\mu_{\text{тур}}^{\text{и}} = \frac{8 \cdot 10^{-2}}{\pi d} \cdot \frac{1,0744(s/d - 1) + 0,1864}{[(2\sqrt{3}/\pi)(s/d)^2 - 1] \cdot Re^{0,1}}. \quad (9)$$

Анализируя расчетные данные, можно отметить, что результаты, полученные с использованием интегральной модели турбулентности по коэффициенту эффективной теплопроводности и опорному коэффициенту вязкости  $\mu_{\uparrow\perp}$ , располагаются систематически ниже данных работы [9] и данных, рассчитанных по коэффициенту межканального обмена импульсом.

Имеющиеся расхождения результатов моделирования с известными экспериментальными данными, по-видимому, связаны с тем, что локальная  $k-\varepsilon$  модель дает погрешность при описании поперечного обтекания сборки, когда может иметь место отрыв потока от стенки. Однако с учетом экспериментальных данных параметры интегральной модели турбулентности могут быть скорректированы. Возможность такой корректировки параметров интегральной модели турбулентности по результатам интегральных экспериментов является ее важным преимуществом для прикладных расчетов.



### Заключение

Проведено моделирование обтекания квадратного и треугольного пучка стержней турбулентным потоком однофазного теплоносителя для определения параметров разрабатываемой интегральной модели турбулентности. На основе результатов численных исследований были сделаны следующие выводы.

1. Зависимость среднего по ячейке коэффициента турбулентной кинематической вязкости  $\nu_t^{яч}$  от числа Рейнольдса является практически линейной, что согласуется с результатами экспериментов.

2. Рассчитанная по интегральной модели турбулентности эффективная теплопроводность поперек стержней при их продольном обтекании потоком теплоносителя хорошо совпадает с результатами ее определения с помощью коэффициента межканального турбулентного обмена теплом  $\mu_{тур}^T$ , что свидетельствует о работоспособности модели. Величина эффективной теплопроводности в направлении вдоль стержней при их поперечном обтекании, рассчитанная по интегральной модели, оказывается в 3–4 раза ниже экспериментальной. Причину такого расхождения (при подтверждении экспериментальных результатов в работах других исследователей) можно объяснить возможной погрешностью описания с помощью локальных моделей турбулентности поперечного обтекания стержней при высоких числах Re, характеризующихся отрывом пограничных слоев и интенсивным вихреобразованием.

3. Интегральный коэффициент  $C_\nu$  при поперечном обтекании сборки в рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса практически постоянен, в то время как при продольном обтекании является функцией числа Рейнольдса.

4. Разрабатываемая интегральная модель турбулентности обеспечивает удовлетворительное замыкание осредненных уравнений тепломассопереноса в потоке, обтекающем стержневые сборки, и может быть использована при моделировании активных зон ядерных реакторов и теплообменников в приближении анизотропного пористого тела.

### Список литературы

1. Митенков Ф.М., Головкин В.Ф., Ушаков П.А., Юрьев Ю.С. Проектирование теплообменных аппаратов АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1988. С. 181–218.
2. Субботин В.И., Кашеев В.М., Номофилов Е.В., Юрьев Ю.С. Решение задач реакторной теплофизики на ЭВМ. М.: Атомиздат, 1979. 143 с.
3. Корсун А.С., Викулова С.В. К определению сопротивления анизотропного пористого тела // Тр. Второй Росс. конф. по теплообмену. В 8 т. М.: МЭИ, 1998. Т. 5. С. 215–218.
4. Корсун А.С. Эффективная теплопроводность пористых структур, составленных из пучков стержней или труб // Тепломассообмен ММФ 4. Тр. IV Минского междунац. форума. Минск, 2000. Т. 10. С. 242–250.
5. Корсун А.С., Круглов В.Б., Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Одинцов А.А., Харитонов В.С., Васильченко И.Н., Кобелев С.Н., Мальчевский Д.В. Расчетные исследования циркуляции теплоносителя в ТВС с решетками перемешивающего типа // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Обеспечение безопасности АЭС. 2008. Вып. 23. С. 97–102.
6. Давиденко Н.Н., Маслов Ю.А., Корсун А.С., Меринов И.Г., Харитонов В.С., Шумский Б.Е. Моделирование трехмерных теплогидравлических процессов в активной зоне ВВЭР с помощью программного комплекса ТРЕТОН // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2009. Вып. 3. С. 139–151.
7. Pedras M.H.J., de Lemos M.J.S. Computation of turbulent flow in porous media using a Low-Reynolds model and an infinite array of transversally displaced elliptic rods // Numerical Heat Transfer. 2003. Part A. Vol. 43. P. 585–602.
8. De Lemos M.J.S. Turbulence in porous media: modeling and applications. Elsevier, 2006. 408 p.
9. Субботин В.И., Харитонов В.В., Плаксеев А.А., Алексеев С.В. Межканальный обмен при поперечном обтекании водой пучка труб // Теплоэнергетика. 1985. № 1. С. 42–44.

10. **Корсун А.С., Пономарев В.А.** Тензор эффективных напряжений в потоке, обтекающем структуры типа пучков стержней или труб // Теплогидравлические аспекты безопасности активных зон, охлаждаемых водой и жидкими металлами. Сб. тр. научно-техн. конф. «Теплофизика 2008». 2009. С. 550–565.
11. **Корсун А.С.** Эффективная теплопроводность пористых структур, составленных из пучков стержней или труб // Теплообмен ММФ4. Тр. IV Минского междунар. форума. Минск. 2000. Т. 10. С. 242–250.
12. **Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С.** Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ / Под общей ред. П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ, 2010. 770 с.
13. **Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 180 с.
14. **Жуков А.В.** Теплогидравлический расчет реакторов. Часть 1. Общие вопросы. Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2001. 210 с.

*Статья поступила в редакцию 13 января 2015 г.,  
после доработки — 21 апреля 2015 г.*