

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

АННОТАЦИЯ

В работе представлена математическая и численная модели процессов гидродинамики и теплообмена неоднородных потоков в кольцевых каналах с кольцевыми вставками. Приведены результаты расчетов полей скорости, температуры, коэффициентов трения и теплоотдачи. Дано сравнение расчетов с опытными данными.

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка современных экономически эффективных проектов высоконапряженного оборудования в тепловой и атомной энергетике должна опираться на знание локальных характеристик течения теплоносителя, таких как поля скорости, давления, температуры и др. [1, 2]. Это стимулирует как развитие экспериментальных исследований, так и разработку многомерных математических моделей, численных алгоритмов и программ расчета гидродинамики и тепломассообмена (CFD (computational fluid dynamics) – в западной терминологии). Они приходят на смену расчетным кодам, построенным на классических гомогенных и одномерных моделях и служащим в основном целям поверочного анализа балансов тепла, импульса и массы теплоносителя, поскольку искомыми переменными в них служат осредненные по сечению канала характеристики: средняя температура, скорость (расход), перепад давления. В настоящей работе представлена математическая модель, численная методика и результаты расчетов гидродинамических и теплообменных характеристик в неоднородных потоках при наличии в кольцевых каналах (КК) препятствий, в частности кольцевых вставок (КВ), моделирующих дистанционирующие решетки.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

2.1. Уравнения модели

Математическая модель основана на использовании осредненных уравнений Рейнольдса с учетом гипотезы Буссинеска о связи тензора напряжений с тензором скоростей деформации. Система уравнений однофазной модели включает в себя уравнения неразрывности, количества движения, энергии и в векторной форме имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \bar{\mathbf{u}} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \nabla \bar{\mathbf{u}} \right) = \rho \bar{\mathbf{F}} - \text{grad} p + 2 \text{div} \mu \mathbf{E} - \frac{2}{3} \text{grad} (\mu \text{div} \bar{\mathbf{u}} + \rho K), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \bar{\mathbf{u}}) = -\nabla \cdot \bar{\mathbf{q}} + q_v, \quad (3)$$

где $\mu = \mu_m + \mu_t$ – коэффициент молекулярной и турбулентной вязкости; \mathbf{E} – тензор скоростей деформации; K – кинетическая энергия турбулентности; член $\bar{\mathbf{F}}$ учитывает действие сил плавучести, межфазного взаимодействия и др. (подробнее см. [3], [4]). Плотность и энтальпия двухкомпонентного потока вычисляются по формулам:

$$\rho = (1 - \alpha) \rho_f + \alpha \rho_g, \quad \rho h = \alpha \rho_g h_g + (1 - \alpha) \rho_f h_f.$$

2.2. Модель турбулентности

Для моделирования турбулентности используются как двухпараметрические [5], так и алгебраические модели. В частности, для неоднородных потоков (например, газожидкостных) используется аддитивная добавка в формуле турбулентной вязкости, описывающая влияние легкой фазы на дополнительную генерацию турбулентности. Например, алгебраическая модель (в случае круглой трубы) турбулентной вязкости имеет вид:

$$\mu_t = \mu'_t + \mu''_t, \quad (4)$$

$$\mu'_t = \rho \mu_f \begin{cases} 0.4 (y^+ - 1) \ln(y^+ / 11), & y^+ \leq 50, \\ 0.133 y^+ (0.5 + R^2) (1 + R), & y^+ > 50. \end{cases} \quad (5)$$

Для дополнительной турбулентной вязкости, обусловленной движением пузырей, используется следующее соотношение:

$$\mu''_t = A_1 \rho (1 - \exp(-y^+ / A_2))^2 \alpha(r) u_b d_b, \quad (6)$$

где u_b – скорость всплытия пузырьков; d_b – диаметр пузырьков. Эмпирические константы A_1 , A_2 по физическому смыслу являются аналогами постоянной Кармана и константы демпфирования Ван Дрифта в однофазных моделях турбулентности (подробнее см. в работе [3]).

3. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для численного моделирования системы уравнений модели применяется неявный метод установления (см. [3, 4]). Для уравнений количества движения используются монотонные балансные нейтральные разностные схемы, позволяющие сохранить важнейшие интегральные свойства дифференциальных уравнений. При описании процессов в тонких пограничных слоях используется неравномерная сетка с логарифмическим сгущением. Неявный метод показал свою устойчивость и эффективность, в том числе и при использовании сильно неравномерных сеток, необходимых для корректного расчета скорости в пограничном слое, касательного напряжения, коэффициентов сопротивления, теплообмена и др. Двумерная методика реализована в программе FLUID2D.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Были проведены двумерные расчетные исследования гидродинамических и теплообменных характеристик неоднородных потоков в кольцевых каналах при наличии в них препятствий в виде кольцевых вставок (рис.1). Анализировалось изменение теплогидравлических характеристик в затесненных каналах по сравнению со свободными. Такая задача имеет важное практическое значение для исследования влияния дистанционирующих решеток в пучках тепловыделяющих элементов.

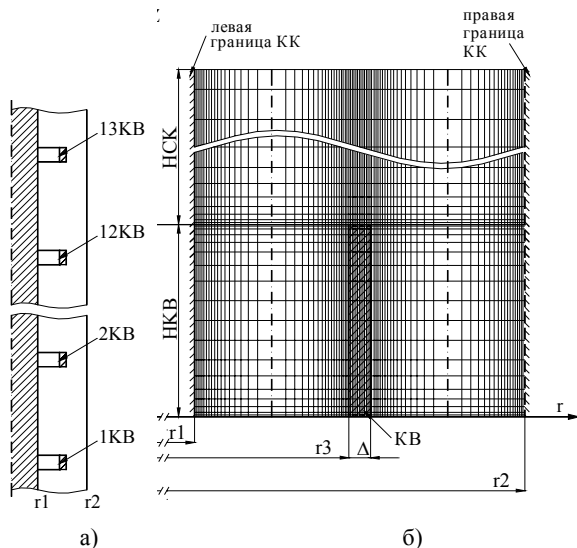


Рис. 1. Расчетная схема для канала с кольцевыми вставками: а – общий вид; б – фрагмент сетки

4.1. Тестовые расчеты кольцевого канала

Для свободных (без KB) кольцевых каналов было проведено сопоставление расчетов с опытными данными [6]. Внешний радиус КК [6] равнялся $r_2 = 19.1$ мм, $r_1 / r_2 = 0.5$, длина – 2.67 м. На входе в канал задавалась скорость жидкости, на выходе использовалось условие стабилизации потока, на твердых боковых стенках – условие прилипания.

Число Рейнольдса Re вычислялось по эффективному диаметру КК $d_e = 2 \cdot (r_2 - r_1)$.

В расчетах использовалась неравномерная сетка с числом узлов $Nr \cdot Nz = 75 \times 200$ ячеек. Для описания тонких пограничных слоев применялось логарифмическое сгущение к твердой стенке, степень сгущения определялась по первому шагу у стенки, который обычно принимался равным 10^{-5} м.

Для однофазного течения (см. рис. 2, а). Получено хорошее согласие расчета и эксперимента [6] для различных чисел Рейнольдса по профилю скорости в выходном сечении. Расчетные локальный и средний коэффициенты сопротивления, вычисляемые по полю давления, на участке стабилизации хорошо согласуются с эмпирической зависимостью, приведенной в работе [7]. В случае газожидкостного потока с неоднородным профилем газосодержания [6] профиль скорости жидкости начинает искажаться, растет трение по сравнению с однофазным течением (рис. 2, б,в). Для профилей скорости получено удовлетворительное согласие с экспериментом [6].

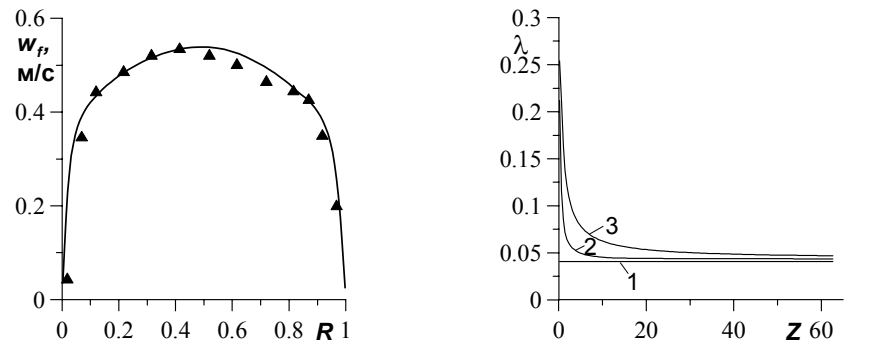
4.2. Расчеты каналов с кольцевыми вставками

Был рассмотрен кольцевой канал с обогреваемым внутренним стержнем, обтекаемый однофазным потоком теплоносителя. Канал имел следующие геометрические характеристики: $r_2 = 8.2$ мм, $r_1 / r_2 = 0.55$, высота 4.5 м, 13 кольцевых вставок (KB) высотой $HKB = 30$ мм, толщиной $\Delta = 0.3$ мм и расстоянием между вставками $HCK = 310$ мм (рис. 1). При заданном внутреннем энерговыделении рассчитывалось поле температуры в твердой части и в потоке теплоносителя. На поверхности обтекаемого внутреннего цилиндра ставилось условие равенства тепловых потоков.

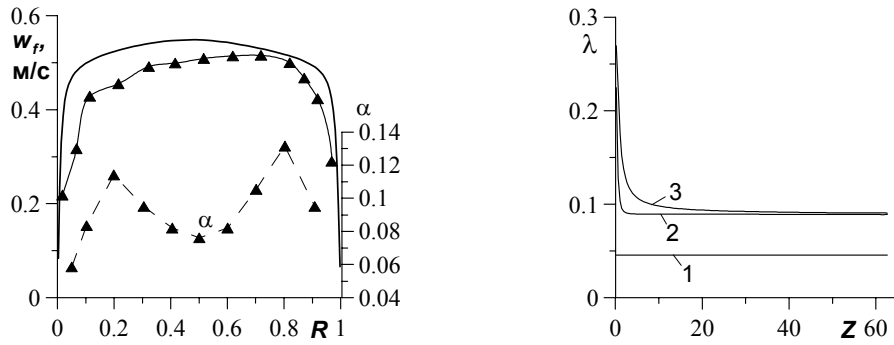
Для описания сложной структуры канала с KB в расчетной области была построена неравномерная сетка со сгущением к каждой твердой поверхности, т.е. со сгущением в зоны с высоким и нелинейным изменением расчетных параметров: давления, скорости и температуры. Общее число узлов порядка $Nr \cdot Nz = 80 \cdot 500$.

На рис. 3, 4 показаны результаты расчетов для режима со входной скоростью $w_{in} = 4$ м/с ($Re = 2.3 \cdot 10^5$). Наличие препятствий резко изменяет картину течения; при обтекании вставок в узких частях канала поток ускоряется (рис. 3, а), существенных значений достигает радиальная составляющая скорости. Более чем в два раза по сравнению с гладким каналом возрастает сопротивление (рис. 3, б).

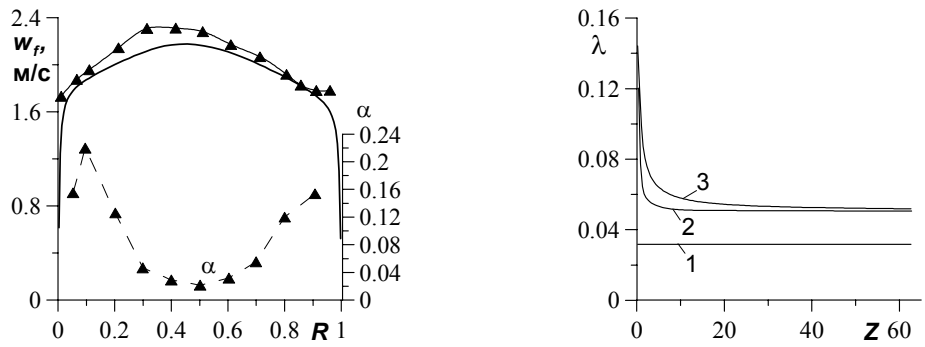
Изменение характера течения, оказывает существенное влияние на теплообмен. В зоне вставок интенсифицируется теплообмен, снижается температура стенки. На рис. 4 показаны числа Нуссельта для канала с KB и для свободного канала. В зоне каждой вставки наблюдается локальный максимум и в целом уровень теплоотдачи выше по сравнению с гладким каналом.



а) $Re = 9709, < j_f \geq 0.516 \text{ м/с}, \beta = 0$



б) $Re = 9709, < j_f \geq 0.516 \text{ м/с}, \beta = 0.117$



в) $Re = 37256, < j_f \geq 2.08 \text{ м/с}, \beta = 0.094$

Рис. 2. Профили продольной скорости (на графике w_{fj}) и коэффициенты трения двухфазного потока в кольцевом канале: — — численное решение; ▲ — эксперимент [6]; коэффициент трения: 1 — эмпирическая формула (типа Блазиуса [7]); 2 — местный; 3 — средний

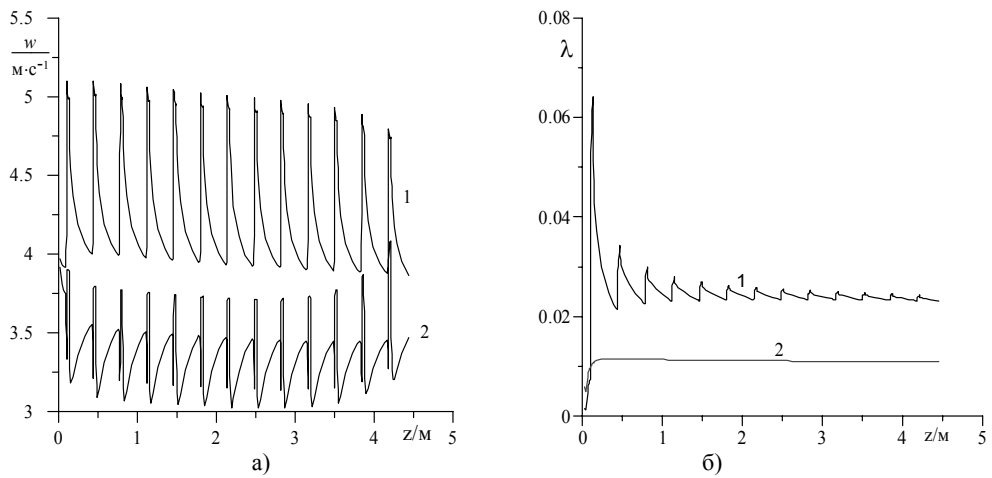


Рис. 3. Профиль аксиальной скорости по высоте канала: а — кривая 1 — на линии 5.3 мм от оси канала; кривая 2 — на линии 7.275 мм от оси канала; б — профиль изменения местного коэффициента сопротивления по высоте канала; 1 — при наличии 13 КВ; 2 — гладкий канал

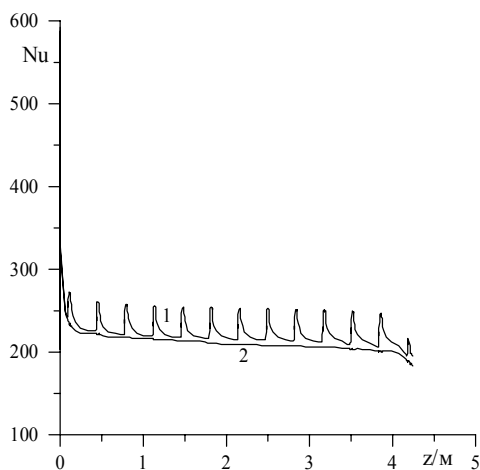


Рис. 4. Распределение числа Нуссельта по высоте канала, 1 – с KB, 2 – без KB

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая и численная модель процессов гидродинамики и теплообмена неоднородных потоков в кольцевых каналах с кольцевыми вставками. Для описания сложной структуры канала с KB используется неравномерная сетка со сгущением в зоны с высоким и нелинейным изменением расчетных параметров: давления, скорости и температуры. Применяемый неявный численный метод обладает большим запасом устойчивости и эффективности, что позволяет проводить длительные нестационарные расчеты и моделировать процессы с очень большим значением градиентов изменения параметров.

Проведены верификационные исследования для одно- и двухфазных потоков и получено хорошее совпадение с опытными данными [6].

Получены расчетные поля локальных параметров: скорости, давления и температуры, а также коэффициенты трения и теплообмена для кольцевых каналов с множеством препятствий в виде кольцевых вставок.

Указанные преимущества и возможности настоящей методики оказываются наиболее затребованными при проведении оптимизационных исследований различных вариантов конструкций каналов сложной формы высоконапряженного энергооборудования.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 04-01-97216).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

α – истинное объемное паро(газо)содержание;
 β – расходное объемное газосодержание;
 μ – эффективная динамическая вязкость, Па·с;
 μ_m – молекулярная динамическая вязкость, Па·с;
 μ_t – турбулентная динамическая вязкость, Па·с;

ν_m – кинематическая вязкость, м²/с;
 ρ – плотность, кг/м³;
 τ_w – касательное напряжение на стенке, Н/м²;
 j_f – приведенная скорость жидкости, м/с;
 h – энтальпия, Дж/кг;
 K – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²;
 P – давление, н/м²;
 q_v – источник внутреннего энерговыделения, Вт/м³;
 \bar{q} – плотность теплового потока, Вт/м²;
 r – радиальная координата, м;
 r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы КК, м;
 $R = (r - r_1)/(r_2 - r_1)$, (для трубы $R = r/r_2$);
 t – время, с;
 $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ – скорость трения;
 \vec{u} – вектор скорости, м/с;
 w_{in} – скорость на входе в канал, м/с;
 $y = r_2 - r$ – координата от стенки, м;
 $y^+ = y u_\tau / \nu_m$ – безразмерная расстояние;
 $Z = z/d_e$ – безразмерная длина;
 z – аксиальная координата, м.
 Индексы:
 e – эффективный;
 f – жидкость;
 g – газ (пар);
 in – вход;
 m – молекулярный;
 r – радиальный;
 t – турбулентный;
 v – объемный;
 z – аксиальный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильченко И.Н., Кобелев С.Н., Вялицын В.В., Мальчевский Д.В. Преемственность при выборе решений по конструкции активной зоны ВВЭР-1500 // Атомная энергия. 2005. Т.99. Вып. 6. С.412-416.
2. Stosic Z. On the role of spacer grids on conditions of dry-out/rewetting and local thermal hydraulics in boiling water channels // 9th Int. Nucl. Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9), Paper N 329, San Francisco, USA, 1999.
3. Артемьев В.К., Корниенко Ю.Н. Двумерное численное моделирование двухфазных потоков пузырьковой структуры на основе одножидкостного описания // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2003. № 1. С. 88-96.
4. Артемьев В.К., Корниенко Ю.Н. Численное исследование влияния профилей паро(газо)содержаний в пузырьковых двухфазных потоках на гидродинамику и теплообмен. Сравнение с экспериментом // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2003. № 2. С.78-87.
5. Нагано, Тагава. Улучшенная (К-ε)-модель турбулентности в пограничном слое // Современное машиностроение. 1990. Т. 7. С.9-16.
6. Hibiki T., Situ R, Mi Y., Ishii M. Local flow measurements of vertical upward bubbly flow in an annulus // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol.46. P. 1479-1496.
7. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). —2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1990. 360 с.