

УДК 621.039.5:532.5

Влияние геометрии канала на взаимодействие фаз дисперсно-пленочных течений

КРОШИЛИН А. Е., КРОШИЛИН В. Е.

Расчет каналов с пучками стержней часто проводят в рамках гомогенной модели парожидкостного течения [1]. При широком диапазоне параметров (объемная концентрация пара $\alpha_1 > 0,75$) смесь движется в дисперсно-пленочном режиме, для которого характерна различная скорость течения жидкой пленки по стенкам канала и стержней и парокапельного ядра. Учесть эту особенность можно в рамках гетерогенного подхода [2, 3]. Непосредственное использование замыкающих соотношений, полученных для круглых труб, приводит к различию экспериментальных и расчетных параметров течения, что связано с различием геометрии ячейки и круглой трубы.

Рассмотрим шестиугольную ячейку размером под ключ $2H$ стержнем радиусом R (рис. 1) и проходным сечением S . Введем полярную систему координат (r, φ) с началом в центре стержня. В «тесных» пучках стержней ($H/R < 1,15-1,2$) ширина проходного сечения ячейки много меньше R и сильно меняется в зависимости от угла φ . Межфазные взаимодействия нелинейно зависят от разности скоростей жидкой пленки и парокапельного ядра. Следовательно, полное межфазное взаимодействие определяется не только средней (во всей ячейке) разностью скоростей $\langle \Delta v \rangle$, но также распределением Δv по периметру стержня. Для расчета последнего используем баланс сил смеси в элементе площадью dS , ограниченном лучами с углом $d\varphi$ (см. рис. 1):

$$dS \frac{\partial P}{\partial Z} = R d\varphi \lambda \frac{\rho (\Delta v)^2}{2}, \quad (1)$$

где $\partial P / \partial Z$ — производная от давления по длине канала; λ — коэффициент сопротивления, ρ — плотность пара. В элементе площадью dS можно пренебречь зависимостью его толщины и разности скоростей Δv от угла и использовать для λ зависимость, полученную для круглых труб.

Градиент давления P вдоль оси канала много больше чем в поперечном направлении, поэтому будем считать $\partial P / \partial Z$, не зависящей от угла φ . Тогда из уравнения (1) путем интегрирования его по сечению определим зависимость $\partial P / \partial Z$ от средней по всему проходному сечению разности скоростей $\langle \Delta v \rangle = 1/S \int_S \Delta v dS$. Подставив полученное выражение в уравнение (1), получим искомое распределение разности скоростей Δv по углу φ , выраженное через среднюю разность скоростей:

$$\Delta v = \sqrt{2 \frac{dS}{d\varphi} \frac{1}{R\lambda\rho} \frac{\langle \Delta v \rangle}{\psi}}; \quad (2)$$

$$\psi = \frac{1}{S} \int_{\varphi} \sqrt{2 \frac{dS}{d\varphi} \frac{1}{R\lambda\rho} \frac{dS}{d\varphi}} d\varphi.$$

Зависимость Δv от φ позволяет проинтегрировать по периметру стержня интенсивность межфазных взаимодействий и получить усредненные по всей ячейке межфазные взаимодействия (массовые и силовые). Например, полная

сила трения между жидкой пленкой и ядром равна

$$F = \int_{\varphi} R d\varphi \lambda \frac{\rho \Delta v^2}{2} = \frac{\langle \Delta v \rangle^2}{\psi^2} S. \quad (3)$$

Проиллюстрируем изложенный подход. В работе [4] для коэффициента сопротивления в уравнении (1) предложено следующее выражение, удовлетворительно описывающее эксперименты в трубах

$$\lambda = c_1 \left[1 + c_2 \left(\frac{2\delta}{D} \right)^{1,3} \right], \quad (4)$$

где $c_1 = 0,008$, $c_2 = 210$.

Здесь δ — среднерасходная толщина жидкой пленки; D — диаметр трубы. Формула (4) при $\delta \rightarrow 0$ не переходит в классическую формулу, а значит может быть использована только для не слишком тонких [$c_2 (2\delta/D)^{1,3} \gg 1$] пленок [4]. Поскольку ячейка симметрична, достаточно рассмотреть одну двенадцатую ее часть: $0 \leq \varphi \leq \pi/6$. Под характерным размером в рассматриваемом случае нужно понимать удвоенную ширину проходного сечения: $2(H/\cos\varphi - R)$. Величина dS имеет вид $(H^2/\cos^2\varphi - R^2) d\varphi/2$. С учетом сказанного выше легко вычислить ψ , входящее в уравнение (2):

$$\psi = R^{1,15} \frac{\int_0^{\pi/6} \left(\frac{b^2}{\cos^2\varphi} - 1 \right)^{1,5} \left(\frac{b}{\cos\varphi} - 1 \right)^{0,65} d\varphi}{\sqrt{\rho c_1 c_2 \delta^{1,3} \left(\frac{b^2}{\sqrt{3}} - \frac{\pi}{6} \right)}}, \quad (5)$$

где $b = H/R$ — относительный шаг решетки. При выводе равенства (5) предполагалось, что толщина жидкой пленки δ не зависит от угла φ . Подставив выражение (5) в уравнение (3), получим полную силу трения в ячейке, которую интересно сравнить с силой трения, определенной при использовании зависимости F_0 , справедливой для круглой трубы:

$$F_0 = 2\pi R c_1 c_2 \left[\delta / \left(\sqrt{\frac{6}{\pi \sqrt{3}}} H - R \right) \right]^{1,3} \frac{\rho (\Delta v)^2}{2}. \quad (6)$$

При выводе уравнения (6) в качестве D в формуле (4) использовали удвоенную среднюю толщину проходного

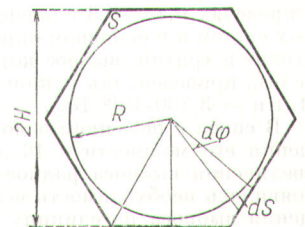
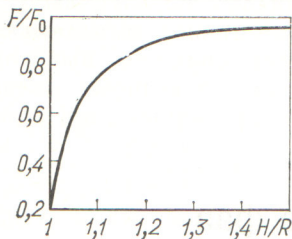


Рис. 1. Ячейка с упаковкой стержней в вершинах равносторонних треугольников



Р и с. 2. Отношение силы трения потока о жидкую пленку в рассматриваемой ячейке к силе трения в круглой трубе того же гидравлического диаметра при различных значениях относительного шага решетки H/R

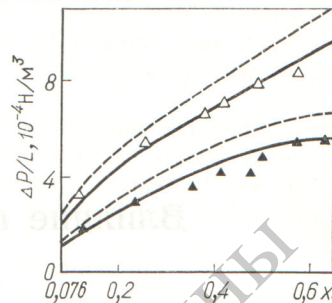
сечения ячейки $D = 2\left(\sqrt{\frac{6}{\pi\sqrt{3}}H} - R\right)$. Отношение значе-

ний силы, рассчитанных по выражениям (3) и (6) зависит только от $b = H/R$ (рис. 2). При b , близком к 1, сила трения в формуле (6) значительно превышает силу трения, рассчитанную по уравнению (3). Отношения интенсивностей силового взаимодействия и уноса капель с пленки в пучках стержней к соответствующим значениям в круглых трубах [5] того же гидравлического диаметра (при тех же параметрах течения) совпадают (см. рис. 2). Интенсивность осаждения капель на стенку в каналах с пучками стержней и в круглой трубе мало различается [5].

В работе [6] эксперименты по перепаду давления проводили в необогреваемом канале с семистержневым пучком, моделирующим бесконечное число стержней (профилированный канал). Это уменьшило влияние потоков между ячейками на гидродинамическое сопротивление канала, поэтому эксперименты [6] были наиболее удобны для проверки найденных соотношений. Ячейки имели форму шестиугольников (см. рис. 1 с $H = 7,5$; $R = 6,5$ мм). Значение b равно 1,15. Из рис. 2 следует, что при этом значении b сила трения, рассчитанная по формуле (6), на 20% превышает силу, полученную с использованием выражения (3).

Для расчета перепадов давления численно решали уравнения (рис. 3) сохранения массы, импульса, энергии составляющих смеси [3], которые замыкались зависимостями для межфазных взаимодействий [5]. Диапазон приведенных результатов расчетов ($0,075 < x_1 < 0,65$) определялся тем, что при больших x_1 жидкая пленка оказывалась очень тонкой и разрушалась, поэтому модель дисперсно-кольцевого течения была неприменима (например, при

Р и с. 3. Зависимость $\Delta P/L$ (L — длина канала) от паросодержания x_1 и массового расхода теплоносителя G для пучка с относительным шагом $H/R = 1,15$ ($P = 40$ бар): \blacktriangle и \triangle — эксперимент при G , равном 870 и 1200 $\text{кг} \times \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, — — — расчет с выведенными межфазными взаимодействиями, — — — с взаимодействиями, полученными при непосредственном использовании формул для круглых труб



$G = 1200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, $x_1 = 0,6$, $\delta = 11 \text{ мкм}$). При $x_1 < 0,075$ ($\alpha_1 \leq 0,75$) дисперсно-кольцевой режим течения так же невозможен. Из рис. 3 следует, что гидравлическое сопротивление «тесных» каналов с пучками стержней недостаточно хорошо описывается при непосредственном использовании межфазных взаимодействий, полученных для круглых труб. Использование изложенной методики учета особенностей геометрии проходного сечения канала для расчета межфазных взаимодействий позволяет получить хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений гидравлического сопротивления тесных каналов с пучками стержней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов Ю. В., Шпанский С. В. — Атомная энергия, 1975, т. 39, вып. 6, с. 403.
2. Whalley P. — Intern. J. Multiphas Flow, 1977, v. 3, N 6, p. 501.
3. Нигматулин Б. И. — Прикл. мат. и техн. физика, 1974, № 6, с. 141.
4. Нигматулин Б. И., Милашенко В. И., Николаев В. Е. — Теплофизика высоких температур, 1978, т. 16, вып. 6, с. 1258.
5. Крошилин А. Е., Крошилин В. Е., Нигматулин Б. И. — Прикл. мат. и техн. физика, 1981, № 4.
6. Боришанский В. М. и др. — В кн.: Достижения в области исследования теплообмена и гидравлики двухфазных потоков в элементах энергооборудования. Л., 1973, с. 144.

Поступило в Редакцию 04.04.80

УДК 621.039.76

О сокращении выброса радиоактивных газов реактора ВВР-М в атмосферу

КОНОВАЛОВ Е. А., КОНОПЛЕВ К. А., ПИКУЛИК Р. Г., ПЛОЩАНСКИЙ Л. М., РАЗОВ Б. С., САЙГОВ Ю. П.

Исследования выброса радиоактивных продуктов в атмосферу реактора ВВР-М ЛИЯФ им. Б. П. Константинова АН СССР [1] показали, что по всем идентифицированным радионуклидам сумма отношений мощности выброса каждого нуклида к его предельно допустимому выбросу, рассчитанному в соответствии с ПДВ—73 [2], находится в пределах 0,15—0,3 в зависимости от состояния реакторных систем и в основном определяется ^{41}Ag . В это значение входит и тритий, выброс которого ($\sim 1 \text{ мКи/ч}$) в работе [1] не был приведен, так как он был идентифицирован позднее ($1 \text{ Ки} = 3,700 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$).

В связи с решением о модернизации ВВР-М для повышения его мощности с 16 до 30 МВт без существенного увеличения выброса радиоактивных веществ в атмосферу появилась необходимость исследовать возможности сокращения выброса на единицу мощности реактора. Использование известных способов такого сокращения рецирку-

ляционных систем и линий задержек на выходе системы вентиляции в виде лабиринтов воздухопроводов или газгольдеров требует значительных материальных затрат.

Поэтому исследования были направлены на разработку простых, эффективных и недорогих средств снижения выброса.

Основными источниками поступления ^{41}Ag в систему вентиляции реактора являются воздушные полости тепловой колонны (60%) и горизонтальных экспериментальных каналов (30%). Герметизация таких воздушных полостей для сокращения выброса ^{41}Ag ограничивает экспериментальные возможности исследовательского реактора, а иногда просто неприменима из-за сложности реализации на действующем реакторе. Более предпочтителен метод вытеснения или замещения воздуха в таких полостях, например, азотом [3]. К сожалению, для этой цели требуется не технический, а чистый азот, так как содержание