

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

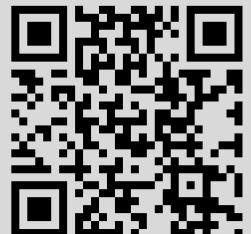
А. А. Авдеев, Р. И. Созиев, Гидродинамическое сопротивление потока пароводяной смеси в шаровой засыпке, *ТВТ*, 2008, том 46, выпуск 2, 251–256

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.85

19 марта 2025 г., 15:18:25



ТЕПЛОМАССОБМЕН И ФИЗИЧЕСКАЯ ГАЗОДИНАМИКА

УДК 532.546+532.55

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОТОКА ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ

© 2008 г. А. А. Авдеев, Р. И. Созиев

Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного энергетического машиностроения (ВНИИАМ), Москва

Поступила в редакцию 02.05.2007 г.

Проведен анализ влияния основных режимных параметров на потери давления при движении двухфазного потока в шаровой засыпке. Предложены расчетные соотношения, обобщающие имеющиеся данные опытов с пароводяными потоками через шаровые засыпки (диапазон изменения давления 0.9–15.6 МПа, массовой скорости в засыпке 180–770 кг/(м² с) массового расхода паросодержания 0–0.48), а также данные на пористых структурах из спеченных сферических бронзовых частиц малого диаметра (0.16–0.63 мм) при относительно низких давлениях (0.2–0.59 МПа), малых массовых скоростях (10–27 кг/(м² с)) и в широком диапазоне изменения объемного паросодержания (0–1.0).

PACS: 47.56. + г; 47.55. Са

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию гидродинамического сопротивления при течении однофазных и паровых газожидкостных сред через зернистые слои, в частности через шаровые засыпки, определился давно. Он обусловлен запросами многих областей инженерной практики, где использование пористых слоев и засыпок либо технологически необходимо, либо предпочтительно как способ повышения эффективности тепло- и массообменных процессов в ограниченном объеме или при минимальном расходе теплоносителя и реагента.

К настоящему времени накоплен значительный объем экспериментальных данных о сопротивлении однофазных потоков в засыпках, многочисленны и расчетные рекомендации. Хотя само множество известных и все еще предлагаемых новых формул свидетельствует об отсутствии общепризнанной модели процесса, имеющиеся методы расчета сопротивления в целом удовлетворяют инженерную практику.

Вместе с тем до последнего времени практически отсутствовали систематические данные по потерям давления в двухфазных потоках через шаровые засыпки. Экспериментальные данные [1, 2] в широком интервале изменения режимных параметров (давление $p = 0.9\text{--}15.6$ МПа, массовая скорость фильтрации $j = 70\text{--}290$ кг/(м² с), расходное массовое паросодержание $x = 0\text{--}0.48$, диаметр шаров – 2 мм, высота слоя засыпки – $H = 50\text{--}1000$ мм) на сегодня, быть может, являются наиболее удобными и доступными для использования в качестве основы анализа и поиска формул расчета сопротивления паро- и газожидкостных потоков в шаровых засыпках.

Важная информация об особенностях гидродинамического сопротивления парожидкостных потоков в пористых структурах получена и в работе [3] при низких давлениях ($p = 0.2\text{--}0.59$ МПа), малых массовых скоростях фильтрации ($j = 10\text{--}45$ кг/(м² с)) и во всем возможном диапазоне изменения массового паросодержания потока ($x = 0\text{--}1.0$). В отличие от [1, 2] в опытах [3] исследовалось течение не через свободные шаровые засыпки, а через пористые металлокерамические образцы из заранее спеченных сферических бронзовых частиц малого диаметра (0.16–0.63 мм).

Описание методики исследования и таблицы опытных данных приведены в [1, 2]. В данной статье лишь укажем, что эксперименты проводились на рабочем участке, представлявшем собой круглую трубу диаметром $D = 34$ мм. В качестве шаровой засыпки в [1] использовалась свинцовая дробь средним диаметром $d = 2.033$ мм при пористости засыпки (доле пустот в засыпке) $m = 0.37$, а в [2] использовались калиброванные стальные шарики диаметром $d = 2.123$ мм. При этом пористость составляла $m = 0.392$. Различие пористости засыпки на двух рабочих участках объясняется как отклонением формы используемых свинцовых шариков от сферической, так и неодинаковым их размером.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Однофазный поток. Экспериментальные значения коэффициента гидродинамического сопротивления ξ_0 в [2] рассчитаны по измеренному перепаду давления Δp в шаровом слое и расходу жидкости как

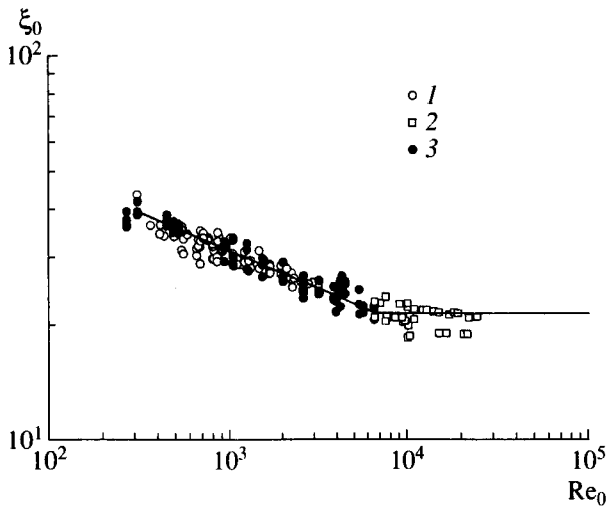


Рис. 1. Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления однофазного потока от числа Рейнольдса в шаровой засыпке: 1 — воздух; 2 — воздух [4]; 3 — вода.

$$\xi_0 = \frac{\Delta p_0}{(\rho u_0^2/2)(H/d)}. \quad (1)$$

Результаты приведены на рис. 1 в координатах $\xi_0 = f(Re_0)$. В качестве примера на рисунке нанесены точки [4], охватывающие диапазон больших чисел Рейнольдса $Re_0 = 6.5 \times 10^3 - 2.5 \times 10^4$.

Здесь $Re_0 = (\rho' u_0 d)/\mu'$, u_0 — скорость фильтрации (скорость жидкости, отнесенная к полному сечению трубы без шаровой засыпки); H — высота засыпки; d — диаметр шаров; ρ' — плотность жидкости (для воздуха — плотность, соответствующая среднеарифметическому значению давления на контрольном участке), μ' — кинематический коэффициент вязкости жидкости.

На рис. 1 линии соответствуют формулам, усредняющим опытные точки:

$$\xi_0 = \frac{3.56}{m^{3.8}} \frac{1}{Re_0^{0.2}} \quad \text{при } 250 < Re_0 \leq 6.5 \times 10^3, \quad (2)$$

$$\xi_0 = \frac{0.615}{m^{3.8}} \quad \text{при } Re_0 \geq 6.5 \times 10^3.$$

Максимальные отклонения экспериментальных точек [1, 2] от значений, рассчитанных по формулам (2), лежат в пределах $\pm 14\%$, что практически соответствует погрешности измерений [2].

Следует отметить, что формулы (2) хорошо совпадают как с результатами предыдущих исследований, так и с известными обобщающими зависимостями.

Двухфазный поток. Опытные данные о сопротивлении потока пароводяной смеси в шаровых засыпках показаны в традиционных для двухфаз-

ных потоков координатах $\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = f(x)$ на рис. 2.

Здесь Δp — опытные значения потери давления двухфазного потока; Δp_0 — потери давления в потоке насыщенной жидкости при расходе, равном расходу смеси; x — среднее на контрольном участке массовое расходное паросодержание потока. Величина Δp_0 определялась в опытах по среднему при данном Re_0 значению ξ_0 , т.е. по формулам (2).

На рис. 2а выделены четыре группы опытных данных [2] в непересекающихся друг с другом интервалах давления (1.8–2.2 МПа, 4.8–5.2 МПа, 9.0–10.0 МПа, 14.6–15.6 МПа). Это позволяет выявить влияние давления и паросодержания на относительные потери. Разброс опытных точек на графиках, превышающий погрешность измерений, обусловлен выбранным широким интервалом значений давления (0.4–1 МПа) в каждой группе точек. На рис. 2б в аналогичных координатах показаны данные работы [3], по рекомендациям из которой и определялось значение Δp_0 .

Из графиков видно, что относительные потери давления двухфазного потока с ростом паросодержания растут монотонно и уменьшаются с ростом давления. Ниже мы покажем, что характер

зависимости $\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = f(x)$ нелинейный.

Интересно отметить, что в отличие от известных закономерностей течения двухфазной смеси в прямых трубах в рассматриваемых условиях во всем исследованном диапазоне изменения режимных параметров относительные потери давления практически не зависят от скорости смеси в засыпке.

ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Представлялось логичным начать поиск обобщающих расчетных соотношений с простейшей гомогенной модели двухфазного потока. В рамках этой модели плотность двухфазной смеси ρ_β рассчитывается по расходному объемному паросодержанию β (без учета относительного движения фаз), а коэффициент сопротивления потока смеси $\xi_{см}$ принимается равным ξ_0 однофазного потока насыщенной жидкости при расходе, равном расходу смеси. Однако подобный подход не позволил удовлетворительно описать экспериментальные результаты. Оказалось, что относительные потери давления в шаровой засыпке, рассчитанные по гомогенной модели, значительно превосходят реальные во всем интервале изменения паросодержания (рис. 3).

Для построения адекватной расчетной схемы проанализируем более подробно физику переноса количества движения при тении двухфазной смеси через шаровую засыпку.

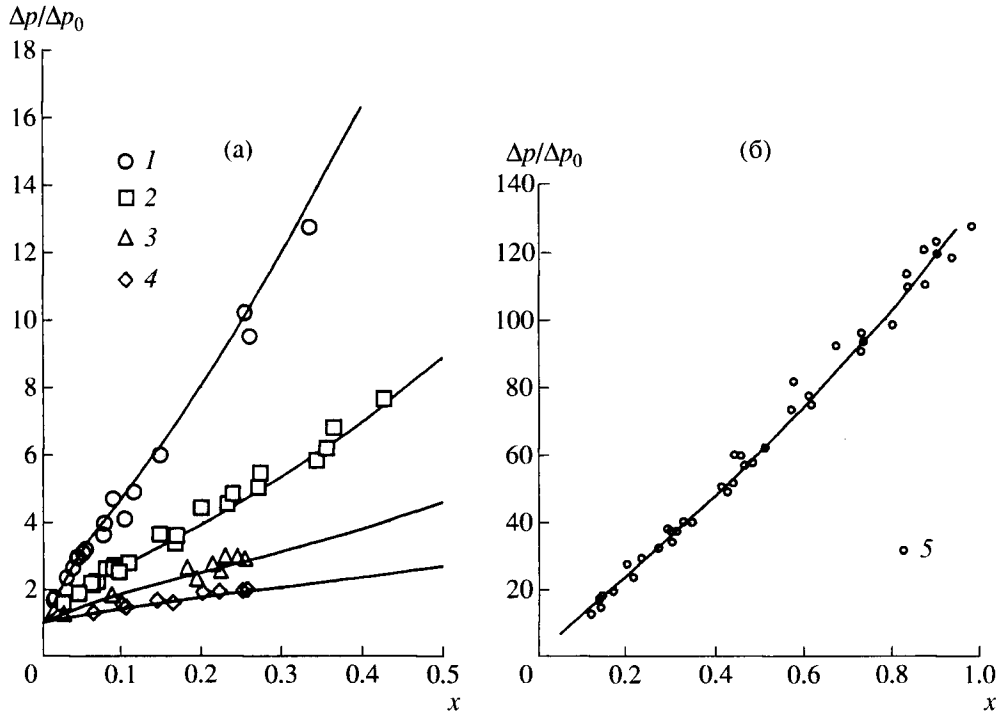


Рис. 2. Зависимость относительных потерь давления потока пароводяной смеси в шаровой засыпке (а) и в пористом образце (б) от расходного массового паросодержания; (а): 1 – $p = 1.8\text{--}2.2$ МПа, 2 – $p = 4.8\text{--}5.2$ МПа, 3 – $p = 9.0\text{--}10.0$ МПа, 4 – $p = 14.6\text{--}15.6$ МПа; (б): 5 – $p = 0.59$ МПа [3].

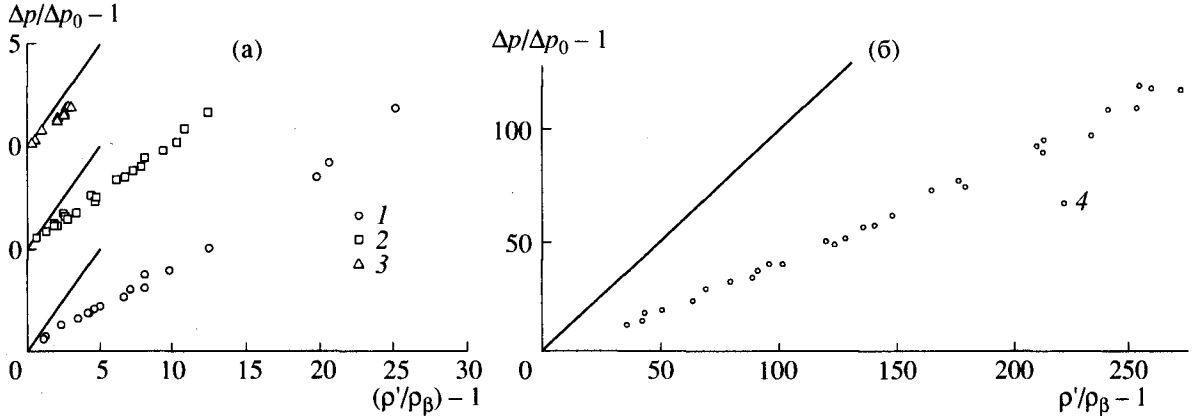


Рис. 3. Сравнение опытных и рассчитанных по гомогенной модели относительных потерь давления потока. (а): 1 – $p = 1.8\text{--}2.2$ МПа, 2 – $p = 4.8\text{--}5.2$ МПа, 3 – $p = 9.0\text{--}10.0$ МПа; (б): 4 – $p = 0.59$ МПа.

При однофазном течении жидкости

$$\Delta p_0 = \xi_0 \frac{j^2 H}{2\rho' d}, \quad (3)$$

где ρ' – плотность жидкой фазы.

По аналогии запишем формулу для двухфазного потока

$$\Delta p_{дв} = \xi_{дв} \frac{j^2 H}{2\rho_{см} d}. \quad (4)$$

Здесь $\xi_{дв}$ – эквивалентный коэффициент гидродинамического сопротивления для двухфазного потока, $\rho_{см}$ – расчетная плотность двухфазной смеси.

При напорном двухфазном течении средние по сечению скорости фаз различаются: имеет место относительное скольжение фаз. Как правило, при подъемном течении пар движется быстрее жидкости. Соответственно, среднее по сечению истинное объемное паросодержание ϕ практически всегда существенно меньше расходного объ-

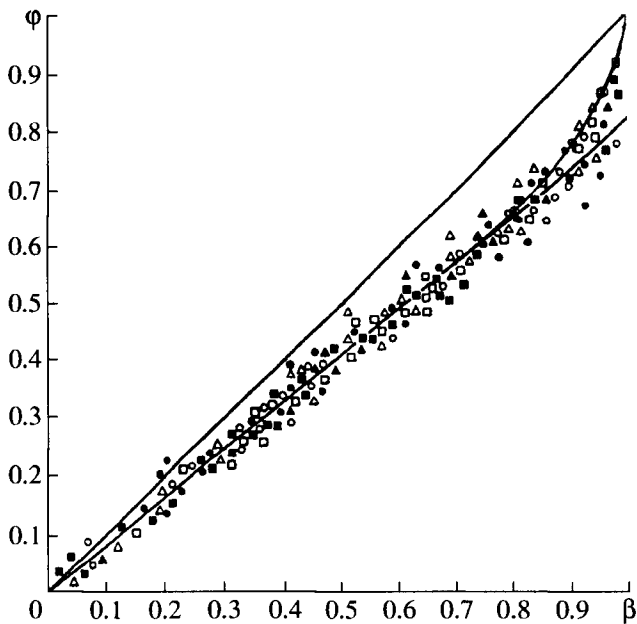


Рис. 4. Зависимость истинного объемного паросодержания ϕ от расходного объемного паросодержания β : точки – данные опытов в прямых трубах, [4]; линии – расчет по (7) и (8).

емного паросодержания β . Средняя по сечению плотность смеси может быть определена как

$$\rho_{\phi} = \rho' \left[1 - \phi \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) \right],$$

где ρ'' – плотность паровой (газовой) фазы.

Гидродинамическое сопротивление при движении двухфазного потока в конечном итоге определяется осредненными закономерностями переноса импульса в направлении, перпендикулярном к направлению движения основного потока.

В канале, заполненном шаровой засыпкой, пульсационные движения, определяющие поперечный перенос импульса, обусловлены как классическими турбулентными механизмами, так и регулярными пульсациями, обусловленными хаотическим взаимодействием струй, обтекающих отдельные шарики. Результирующие пульсационные движения должны иметь характерный макромасштаб порядка размера шарика и достаточно высокую интенсивность. В этих условиях представляется логичным принять, что пульсационные движения будут переносить паровую фазу по сечению канала подобно пассивной примеси.

Эффекты молекулярной вязкости должны проявляться в непосредственной близости от твердых поверхностей шариков, покрытых жидкой пленкой. Тогда силы вязкости независимо от паросодержания будут определяться динамическим ко-

эффициентом вязкости жидкости μ' . С учетом сказанного можно предположить, что в зернистой засыпке двухфазная смесь должна вести себя подобно сплошной среде со средней плотностью ρ_{ϕ} и вязкостью μ' .

Так как $j = \rho_{\phi} \bar{u}$, эффективное число Рейнольдса для двухфазного потока Re будет совпадать с числом Рейнольдса для однофазного потока Re_0

$$Re = jd/\mu' = \rho' u_0 d/\mu' = Re_0.$$

Отсюда следует, что в рассматриваемых условиях коэффициент гидродинамического сопротивления $\xi_{\text{дв}}$ можно рассчитать по соотношениям (2), т.е. принять $Re_{\text{см}} = Re_0$.

С учетом сказанного

$$\Delta p_{\text{дв}}/\Delta p_0 = \rho'/\rho_{\phi}. \quad (5)$$

Таким образом, в рамках обсуждаемой модели задача о расчете гидродинамического сопротивления сводится к задаче точного определения истинного распределения фаз в потоке.

Многочисленные данные экспериментов с прямыми трубами показывают [5], что практически во всей зоне существования пробковой структуры потока истинное и расходное объемные паросодержания связаны линейной зависимостью

$$\phi \sim C\beta. \quad (6)$$

Здесь $C = f(Fr_{\text{см}})$, $Fr_{\text{см}} = \frac{u_{\text{см}}^2}{gD}$ – число Фруда; $u_{\text{см}} = u'_0 + u''_0$ – среднемассовая скорость жидкости двухфазной смеси; u'_0 и u''_0 – приведенная скорость жидкости и пара соответственно. В области $Fr_{\text{см}} \geq 4$ коэффициент C практически постоянен, и из (6) следует известная формула Арманда–Невструевой [8]

$$\phi = 0.83\beta \text{ при } \beta < 0.8-0.9. \quad (7)$$

В области высоких паросодержаний ($\beta > 0.8$), когда жидкостные пробки начинают разрушаться, взаимодействие парового потока с пристенной жидкостной пленкой усиливается и соотношение (7) нарушается (рис. 4).

Для расчета истинного объемного паросодержания при $\beta > 0.8$ может быть использована интерполяционная формула (см. рис. 4)

$$\phi = \sqrt{\frac{1}{1 + 6.25(1 - \beta)}} \text{ при } \beta \geq 0.8. \quad (8)$$

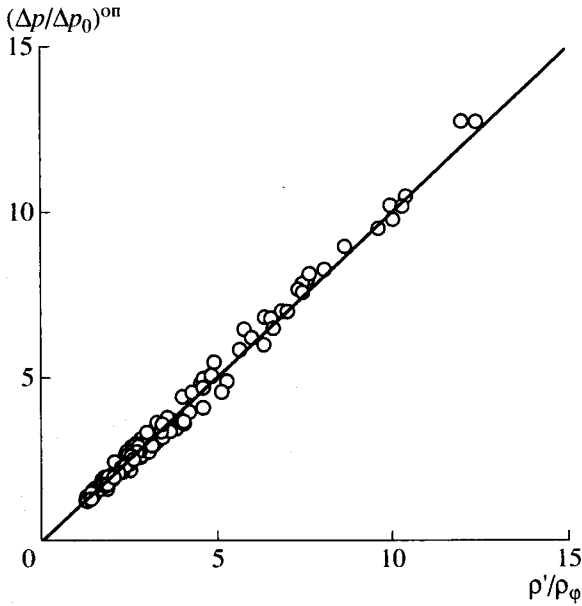


Рис. 5. Сравнение опытных и рассчитанных по (9) относительных потерь давления.

Расчетную формулу (5), используя (7) и (8), удобно переписать в виде

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \frac{1}{1 - 0.83\beta \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right)} \quad \text{при } \beta \leq 0.8;$$

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + 6.25(1 - \beta)}}} \quad (9)$$

при $\beta \geq 0.8$.

На рис. 5 дано сравнение рассчитанных по (9) относительных потерь давления в шаровой засыпке с опытными данными [2]. Статистическая обработка всего массива опытных данных [1, 2] показала среднеквадратичное расхождение ± 0.05 , при этом более 95% экспериментальных точек попадают в доверительный интервал ± 12 . Это практически соответствует погрешности измерений.

Большой интерес имело сравнение результатов расчета с опытными данными [3], полученными на пористых металлокерамических вставках и охватывающими область низких давлений (0.2–0.6 МПа), паросодержаний x от нуля до единицы и очень малых расходов ($Re_0 = 10-45$).

Как и следовало ожидать, предлагаемая модель не описывает данные, полученные на образце № 4, представлявшем собой губчатую структуру с пористостью 0.87. Экспериментальные данные, полученные на образцах № 1–3, 7–9, состоящих из спеченных сферических частиц диаметром 0.16–0.63 мм с пористостью 0.28–0.41, хорошо описы-

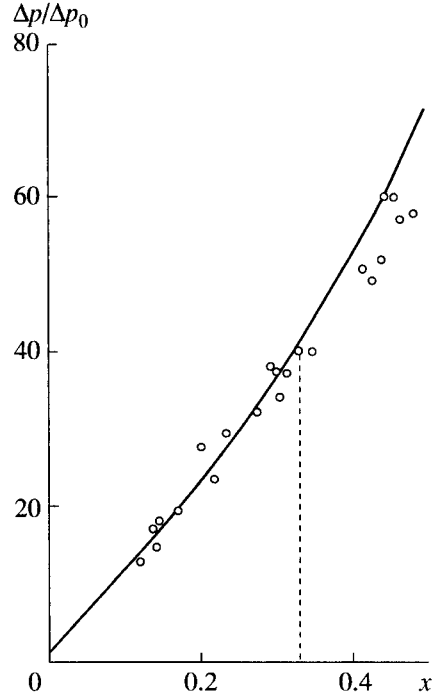


Рис. 6. Сравнение опытных и рассчитанных по (9) относительных потерь давления пароводяной смеси в пористых образцах [3]: пунктир – $\beta = 0.99$.

ваются предлагаемой моделью в области повышенных чисел Рейнольдса ($Re_0 \geq 15$).

В области малых чисел Рейнольдса имеют место систематические расхождения результатов расчета с экспериментом. В области сверхмалых чисел Рейнольдса, скорее всего, происходит переход к ламинарному режиму течения и положенные в основу расчетной схемы физические соображения не реализуются.

На рис. 6 показано сравнение результатов расчета по формулам (9) с опытными данными [3], охватывающими диапазон повышенных чисел Рейнольдса ($Re_0 \geq 15$). Как видим, совпадение расчетных и опытных значений относительных потерь давления удивительно хорошее, особенно если учесть, что при низких давлениях и столь высоких объемных паросодержаниях точность расчета

по формуле $\frac{\Delta p}{\Delta p_0} \sim \frac{1}{1 - \phi}$ должна быть весьма чувствительна к погрешности определения ϕ . Совпадение расчетных и опытных значений $\frac{\Delta p}{\Delta p_0}$ иллю-

стрируют и графики на рис. 2а, где линии, осредняющие опытные данные, определены по (9).

Видно, что ход зависимостей $\Delta p/\Delta p_0 = f(x)$ отличается от линейного закона.

ПРЕДЕЛЫ ПРИМЕНИМОСТИ МОДЕЛИ

Прежде всего из вышеизложенного следует, что предлагаемые расчетные соотношения неприменимы в области малых чисел Рейнольдса ($Re_0 < 15$).

При проведении анализа мы не учитывали ни влияния силы тяжести, ни влияния сил поверхностного натяжения, которое также может быть существенно при малых скоростях движения.

Оценкой порядка величины капиллярного перепада давления может служить параметр

$$\Delta p_\sigma = \sigma/d,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Аналогично влияние силы тяжести можно оценить как

$$\Delta p_g = (\rho' - \rho'')gd,$$

где g – ускорение свободного падения.

Сравнение с экспериментом [2] охватывает область

$$We_{0\text{ мод}} = \frac{\Delta p_0 d}{4\sigma} = \frac{\xi \rho' u^2 d}{8\sigma} \geq 7.8, \quad (10)$$

$$Fr_{0\text{ мод}} = \frac{\Delta p_0}{\rho g H} = \frac{\xi \rho' u^2}{2\rho g d} \geq 36, \quad (11)$$

где $u = \frac{u_0}{m}$.

В данных пределах какие-либо систематические расхождения с моделью отсутствуют.

В области малых паросодержаний ($\beta \rightarrow 0$) модель обеспечивает предельный переход к случаю течения чистой жидкости. Тем не менее при $\beta \rightarrow 1$ предельный переход к закономерностям движения чистого пара не реализуется. Кроме того, как отмечалось выше, в области больших β влияние погрешности расчета истинного объемного паросодержания должно приводить к значительной погрешности расчета относительных потерь давления. Поэтому диапазон применимости

модели должен быть ограничен при больших β . Однако, к удивлению авторов, какие-либо систематические расхождения результатов расчета с экспериментом отсутствуют вплоть до $\beta = 0.98$ – 0.99 . Границы этой области показаны на рис. 6 пунктиром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что двухфазные потоки в шаровой засыпке, где можно было бы ожидать интенсивного дробления и равномерного распределения фаз хотя бы при высоких скоростях смеси, на самом деле весьма негомогенны и менее разнообразны по структуре и режимам течения, чем в прямых трубах. Возможно, именно поэтому и гидродинамическое сопротивление здесь поддается расчету по единой модели и простыми формулами в широком диапазоне изменения режимных параметров с точностью, не меньшей, чем для однофазных потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев А.А., Балунев Б.Ф., Рыбин Р.А. и др. Гидродинамическое сопротивление при течении двухфазной смеси в шаровой засыпке // ТВТ. 2003. Т. 41. № 3. С. 432.
2. Авдеев А.А., Балунев Б.Ф., Зудин Ю.Б. и др. Гидродинамическое сопротивление при течении двухфазной смеси в шаровой засыпке // ТВТ. 2006. Т. 44. № 2. С. 259.
3. Зейгарник Ю.А., Калмыков И.В. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления пористых структур при адиабатическом движении пароводяных смесей // ТВТ. 1985. Т. 23. № 5. С. 934.
4. Богоявленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978. 112 с.
5. Мамаев В.А., Одишария Г.Э., Семенов Н.И., Точигин А.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах. М.: Недра, 1969. 208 с.
6. Арманд А.А., Невструева Е.И. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе // Известия ВТИ. 1950. № 2. С. 1.