

УДК 536.24

М.К. БЕЗРОДНЫЙ, И.А. НАЗАРОВА

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОСХОДЯЩЕГО ПОТОКА ГАЗА И ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Введение

Важным направлением развития энергетики Украины является энергосбережение. Один из путей решения вопросов энергосбережения - полезное использование теплоты уходящих газов энергетического оборудования. В связи с этим все большее распространение получают контактные теплоутилизаторы, в которых газ и нагреваемая жидкость взаимодействуют непосредственно, без разделяющей стенки. В большинстве известных конструкций таких аппаратов реализуется противоточная схема движения теплоносителей. Недостатком противоточной схемы движения теплоносителей является относительно невысокая скорость движения газов в аппарате, которая ограничена явлением "захлебывания" течения. Вследствие этого существуют ограничения по производительности, также невысока и интенсивность процессов теплообмена в таких аппаратах.

Авторами предложен контактный аппарат [1], в котором организовано движение газов со скоростью, превышающей верхнюю границу "захлебывания" противоточного движения фаз. Такие значения скоростей газового потока обеспечивают восходящее слутное течение нагреваемой жидкости и газов: жидкость течет вверх в виде пленки по стенкам трубы, а газ - в ядре потока.

Для определения условий эффективной работы такого аппарата необходимо установление границ устойчивого восходящего течения пленки жидкости и потока газа, а также знание закономерностей гидравлического сопротивления.

Исследованию процессов нарушения устойчивости течения пленки жидкости и потока газа в вертикальных каналах посвящено значительное число работ [2-9], содержащих как теоретические, так и экспериментальные исследования. При этом в большинстве работ исследуется режим "захлебывания" течения. Исследованию границ устойчивости различных режимов течения двухфазного потока в вертикальных каналах посвящены работы [10-13], в которых составлены карты режимов

течения. Результаты исследований кризисных переходов, соответствующих границам кольцевого режима в восходящем двухфазном течении приведены в работах [14,15]. Авторы работ [16,17] исследовали нарушение устойчивости восходящего пленочного течения в кольцевом вертикальном канале при использовании различных жидкостей. В работе [18] представлен анализ известных работ по исследованию кризисных явлений в кольцевых двухфазных течениях в вертикальных трубах и каналах, а также рекомендованы обобщенные соотношения для расчета границ устойчивого кольцевого течения. Исследованию гидравлического сопротивления восходящего двухфазного потока посвящено ограниченное число работ [19-22].

На рис. 1. приведено сравнение удельного гидравлического сопротивления по данным авторов [19-21]. Из рисунка видно, что кривые 1 и 3 хорошо согласуются между собой, однако получены для узкого диапазона изменения плотностей орошения. По данным [19] (кривая 2) плотность орошения оказывает влияние на градиент давления в большей степени, чем по данным [20,21] (кривые 1 и 3).

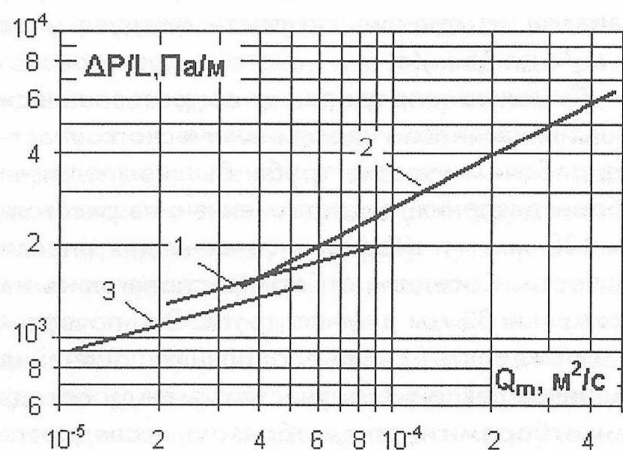


Рис. 1. Сравнение удельного гидравлического сопротивления по данным ряда авторов:

- 1 - $w_f=25$ м/с, $d=13,5$ мм по данным Конобева, Малюсова, Жаворонкова [20];
- 2 - $w_f=25$ м/с, $d=13$ мм по данным Живайкина, Волгина [19];
- 3 - $w_f=25$ м/с, $d=12,62$ мм по данным Семёнова, Рейбаха, Горшкова [21].

Необходимо также отметить, что в работах [19-22] результаты получены для гидродинамически стабилизированного потока. Согласно [23] в режимах развитого турбулентного течения газа и пленки жидкости длина участка стабилизации пленочного течения сопоставима с длиной контактных устройств аппаратов. Поэтому, необходимо знать данные о длине начального гидродинамического участка, а также о величине гидродинамического сопротивления на этом участке. В вышеуказанных работах такие данные отсутствуют.

Таким образом, гидродинамические характеристики спутного восходящего движения газа и пленки жидкости изучены недостаточно, поэтому актуальным является более глубокое исследование этих характеристик.

1 Методика проведения эксперимента

Для проведения исследований была создана экспериментальная установка, схема которой приведена в работе [24].

Объектом исследования являлся восходящий поток воздуха и воды, при котором движение воды осуществлялось под действием потока воздуха в виде пленки на внутренней поверхности вертикальной трубы.

Методика проведения эксперимента заключалась в ступенчатом увеличении расхода жидкости, которая подавалась в рабочий канал, при заданной скорости потока воздуха. При этом плотность орошения поверхности трубы водой в эксперименте изменялась от $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ до $2,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, диапазон изменения скорости воздуха - от 10 м/с до 35 м/с.

С целью определения сопротивления и длины начального гидродинамического участка в рабочем участке трубы были выполнены отборы давления, расположенные на расстоянии 120 мм от входного сечения для пленки жидкости. Соседние отборы располагались на расстоянии 80 мм друг от друга. Это позволило определять среднелокальные значения градиента давления на участках между соседними отборами и, таким образом, исследовать закономерности изменения гидравлического сопротивления в начальном гидродинамическом участке двухфазного потока.

2 Результаты экспериментов и их анализ

Результаты экспериментальных исследований были получены в виде зависимости удельного гидравлического сопротивления $\Delta P/L$ от высоты опытного участка L при различных значениях скорости воздуха w_r и

плотности орошения Q_m (рис.2).

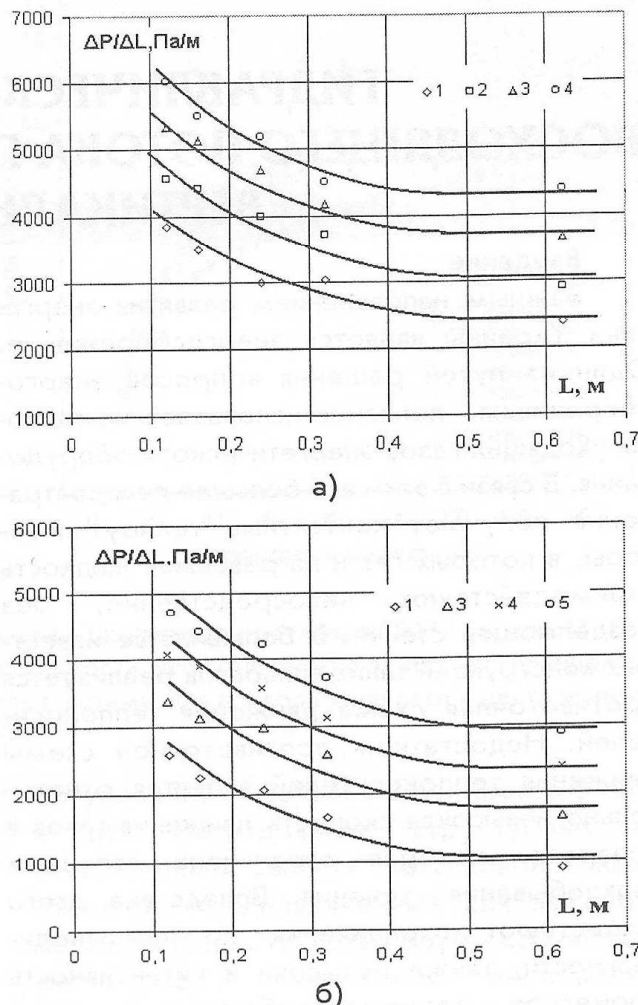


Рис. 2. Зависимость удельного гидравлического сопротивления от высоты опытного участка:

а) при различных значениях скорости воздуха при $Q_m = 2,87 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$:

- 1 - $w_r = 20 \text{ м/с}$;
- 2 - 25;
- 3 - 30;
- 4 - 35;

б) при различных значениях плотности орошения при $w_r = 25 \text{ м/с}$:

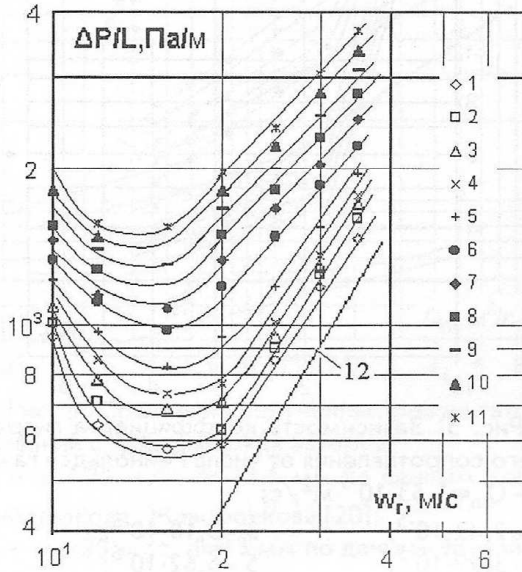
- 1 - $Q_m = 2,44 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$;
- 2 - $8,99 \cdot 10^{-5}$;
- 3 - $2,1 \cdot 10^{-4}$;
- 4 - $2,87 \cdot 10^{-4}$.

Из рисунков видно, что увеличение скорости воздуха и плотности орошения приводит к росту $\Delta P/L$. При изменении высоты опытного участка от $L=0,1 \text{ м}$ до $L=0,46 \text{ м}$ происходит резкое снижение удельного гидравлического сопротивления. При дальнейшем увеличении высоты опытного участка поток можно назвать гидродинамически стабилизированным, так как при этом удельное гидравлическое сопротивление $\Delta P/L$ остается неизменным.

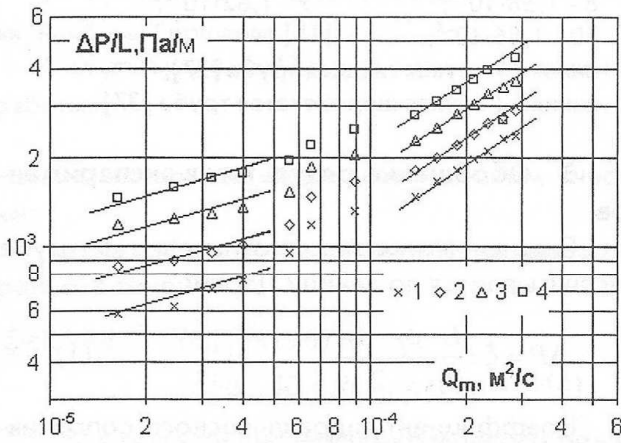
Таким образом, в ходе исследований

установлено, что длина начального гидродинамического участка составляет величину порядка $L_{н.г.} \approx 30 \cdot d$.

На втором этапе экспериментов было исследовано удельное гидравлическое сопротивление для гидродинамически стабилизированного восходящего потока газа и жидкости. На рис. 3 представлены результаты этих исследований в виде зависимостей удельного гидравлического сопротивления от скорости газа (рис. 3.а) и от плотности орошения (рис. 3.б).



а)



б)

Рис. 3. Зависимость удельного гидравлического сопротивления от скорости газа и плотности орошения:

- а) 1 – $Q_m = 1,63 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$;
- 2 – $2,43 \cdot 10^{-5}$;
- 3 – $3,18 \cdot 10^{-5}$;
- 4 – $3,99 \cdot 10^{-5}$;
- 5 – $5,62 \cdot 10^{-5}$;
- 6 – $6,56 \cdot 10^{-5}$;
- 7 – $8,99 \cdot 10^{-5}$;
- 8 – $1,38 \cdot 10^{-4}$;
- 9 – $1,62 \cdot 10^{-4}$;
- 10 – $1,86 \cdot 10^{-4}$;
- 11 – $2,1 \cdot 10^{-4}$;
- линия 12 – сухая труба ($Q_m = 0$);
- б) 1 – $w_r = 20 \text{ м/с}$;
- 2 – 25;
- 3 – 30;
- 4 – 35.

Из рисунков видно, что характер полученных зависимостей существенно изменяется как с увеличением скорости газа, так и плотности орошения, что свидетельствует о существовании различных режимов течения в различных диапазонах параметров двухфазного потока. При увеличении скорости воздуха от 10 м/с до 16 м/с удельное гидравлическое сопротивление падает до некоторого минимума, а затем возрастает в диапазоне скоростей от 16 м/с до 35 м/с. Минимум гидравлического сопротивления, наблюдаемый при скорости воздушного потока ~16 м/с, соответствует началу упорядоченного восходящего кольцевого течения, что согласуется с результатами визуальных наблюдений.

Полученное таким образом критическое значение скорости воздушного потока согласуется также с данными по прекращению нисходящего течения пленки (инверсия течения), характеризующими верхнюю границу "захлебывания" противоточного течения и соответствующими по данным работ [25,26] значению критерия устойчивости двухфазного потока $K=3,2$.

Область устойчивого кольцевого течения двухфазного потока ограничена также по расходу жидкости в пленке или плотностью орошения Q_m . Как видно из рис. 3.б), степень влияния плотности орошения на градиент сопротивления существенно возрастает при возрастании величины Q_m выше некоторого значения ($\sim 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$). Это может быть объяснено переходом части жидкости из пленки в газовое ядро потока, что приводит к росту удельного гидравлического сопротивления.

На рис. 4 весь массив опытных данных по параметрам течения нанесен на карту режимов течения восходящего двухфазного потока, полученную в [12] путем анализа закономерностей изменения толщины пленки жидкости и использовании в качестве взаимодействующих сред жидкой и паровой фазы фреонов на линии насыщения. Приведенное сопоставление подтверждает полученные выводы о существовании характерных режимов течения двухфазного потока и свидетельствует о совпадении границ этих режимов с ранее установленной картой режимов течения на других рабочих средах.

Если проанализировать карту режимов течения, полученную в [12] (рис.4), и сопоставить с полученными данными, представленными на рис. 3.б), то можно сделать следующие

выводы. При $Q_m=(1,63 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5}) \text{ м}^2/\text{с}$ в рабочем участке существует кольцевой режим течения (жидкость течет в виде пленки по стенкам трубы, а газ - в ядре потока), при $Q_m=(5 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-4}) \text{ м}^2/\text{с}$ - переходный режим (при котором начинается унос части жидкости с поверхности пленки в ядро потока), при $Q_m=(10^{-4} \dots 2,9 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2/\text{с}$ - дисперсно-кольцевой режим (при этом часть жидкости течет по стенкам трубы, а часть - в ядре потока в виде капель).

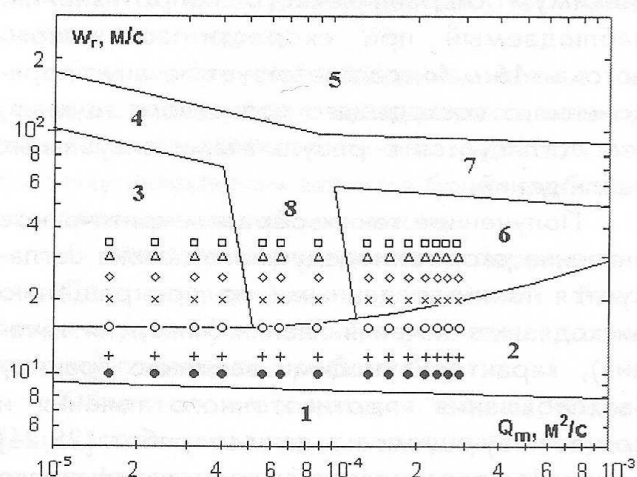


Рис. 4. Карта режимов течения в вертикальных кольцевых каналах [12]:

- 1 - противоток;
- 2 - эмульсионный;
- 3 - кольцевой;
- 5 - дисперсный;
- 6 - дисперсно-кольцевой;
- 4,7,8 - переходные.

Интересно также проследить как изменяется коэффициент гидравлического сопротивления ξ в зависимости от безразмерной скорости газового потока Re_r (рис.5). Из рисунка видно, что увеличение числа Re_r сопровождается резким снижением коэффициента гидравлического сопротивления, а переход от эмульсионного режима к восходящему кольцевому соответствует значению $Re_r=1,8 \cdot 10^4$. Кроме того, при $Re_r > 1,8 \cdot 10^4$ наблюдается различная степень влияния Re_r на коэффициент гидравлического сопротивления в кольцевом и дисперсно-кольцевом режимах.

На рис. 6 приведено сравнение удельного гидравлического сопротивления с данными других авторов [19-21]. Из рисунка видно, что кривые 4 (результаты данной работы) располагаются ниже, чем кривые 1-3. Это объясняется тем, что в данной работе удельное гидравлическое сопротивление получено для трубы большим диаметром, чем в работах

[19-21] (кривые 1-3). Степень влияния плотности орошения на градиент давления, полученная в данной работе, удовлетворительно согласуется с результатами работ [19-21].

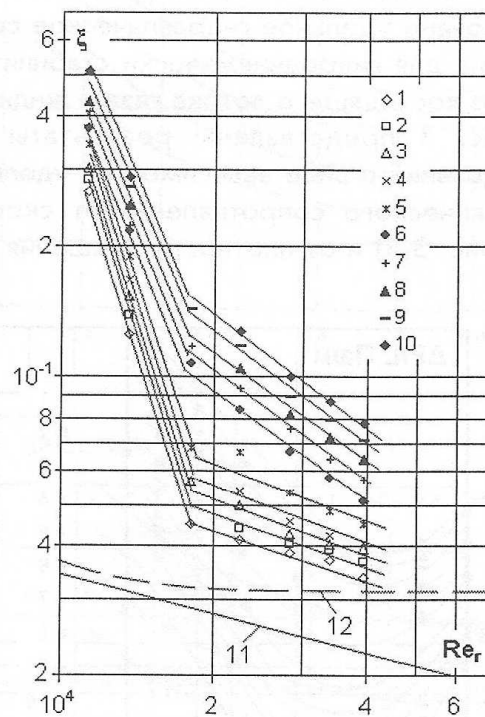


Рис. 5. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса газа:

- 1 - $Q_m=1,63 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$;
- 2 - $2,43 \cdot 10^{-5}$;
- 3 - $3,18 \cdot 10^{-5}$;
- 4 - $3,99 \cdot 10^{-5}$;
- 5 - $5,62 \cdot 10^{-5}$;
- 6 - $6,56 \cdot 10^{-5}$;
- 7 - $8,99 \cdot 10^{-5}$;
- 8 - $1,38 \cdot 10^{-4}$;
- 9 - $1,62 \cdot 10^{-4}$;
- 10 - $1,86 \cdot 10^{-4}$;

линия 11 - сухая гладкая труба [27];
линия 12 - сухая шероховатая труба [27].

3 Обобщение результатов экспериментов

Гидравлическое сопротивление в трубе рассчитывается по закону Дарси:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho_r \cdot w_r^2}{2} \tag{1}$$

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ в случае двухфазного потока может быть выражен уравнением:

а) на начальном гидродинамическом участке

$$\xi = C \cdot Re_r^m \cdot Re_{пл}^n \cdot (L/d)^k; \tag{2}$$

б) для гидродинамически стабилизированного потока

$$\xi = C \cdot Re_r^m \cdot Re_{пл}^n. \tag{3}$$

В результате обобщения экспериментальных данных на начальном гидродинамическом участке и для гидродинамически стабилизированного потока в области устойчивого

кольцевого режима течения и в области дисперсно-кольцевого режима были получены эмпирические зависимости, которые графически представлены на рис. 7 и 8. К обобщению привлекались данные, которые удовлетворяют условию $Re_{\Gamma} > 1,8 \cdot 10^4$. Обобщение опытных данных позволило получить уравнения для расчета коэффициента гидравлического сопротивления.

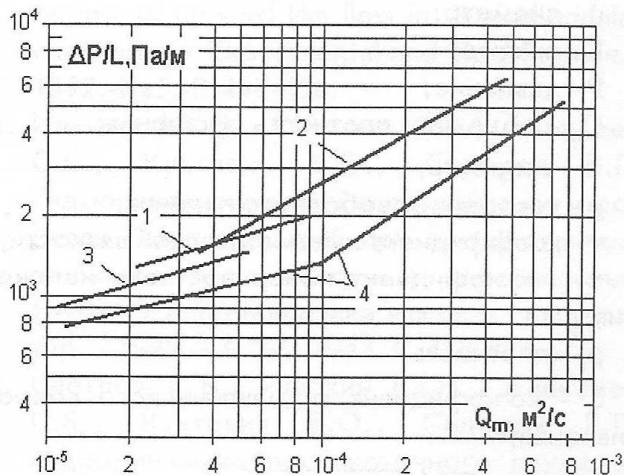


Рис. 6. Сравнение полученных результатов исследований с данными ряда авторов:

- 1 – $w_{\Gamma} = 25$ м/с, $d = 13,5$ мм по данным Конобева, Малюсова, Жаворонкова [20];
- 2 – $w_{\Gamma} = 25$ м/с, $d = 13$ мм по данным Живайкина, Волгина [19];
- 3 – $w_{\Gamma} = 25$ м/с, $d = 12,62$ мм по данным Семенова, Рейбаха, Горшкова [21];
- 4 – $w_{\Gamma} = 25$ м/с, $d = 17$ мм по результатам данной работы.

На начальном гидродинамическом участке:

а) в области устойчивого кольцевого режима течения

$$\xi = 23 \cdot Re_{\Gamma}^{-0,4} \cdot Re_{\text{пл}}^{0,2} (L/d)^{0,28} \quad \text{при } 40 < Re_{\text{пл}} < 106; \quad (4)$$

б) в области дисперсно-кольцевого режима течения

$$\xi = 112 \cdot Re_{\Gamma}^{-0,8} \cdot Re_{\text{пл}}^{0,6} (L/d)^{0,28} \quad \text{при } 360 < Re_{\text{пл}} < 760. \quad (5)$$

Для гидродинамически стабилизированного потока:

а) в области устойчивого кольцевого режима течения

$$\xi = 1,08 \cdot Re_{\Gamma}^{-0,4} \cdot Re_{\text{пл}}^{0,2} \quad \text{при } 40 < Re_{\text{пл}} < 106; \quad (6)$$

б) в области дисперсно-кольцевого режима течения:

$$\xi = 30,9 \cdot Re_{\Gamma}^{-0,8} \cdot Re_{\text{пл}}^{0,4} \quad \text{при } 360 < Re_{\text{пл}} < 760. \quad (7)$$

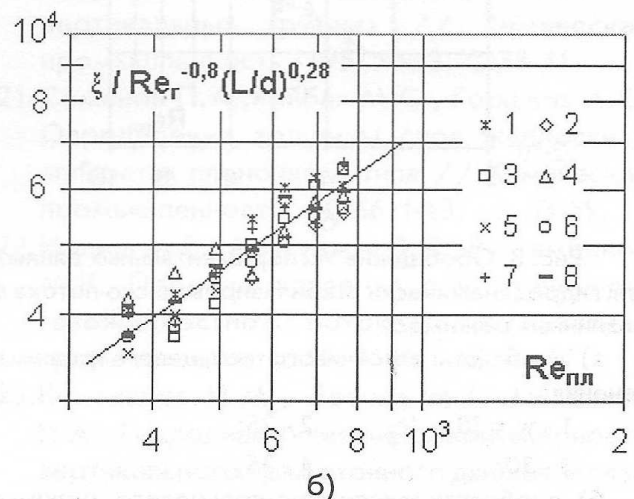
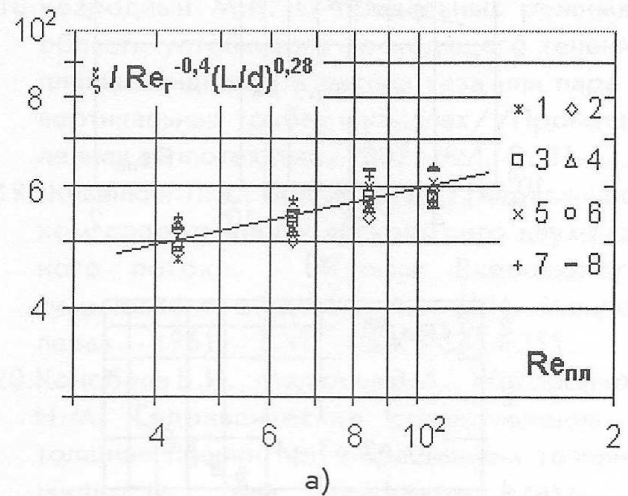


Рис. 7. Обобщение экспериментальных данных на начальном гидродинамическом участке в различных режимах:

а) в области устойчивого кольцевого режима течения:

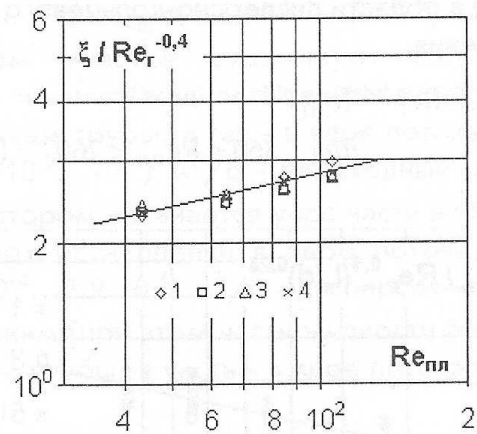
- 1 – $w_{\Gamma} = 25$ м/с; $L = 0,12$ м;
- 2 – 35; 0,12; 3 – 25; 0,16;
- 4 – 35; 0,16; 5 – 25; 0,24;
- 6 – 35; 0,24; 7 – 25; 0,32;
- 8 – 35; 0,32;

б) в области дисперсно-кольцевого режима течения:

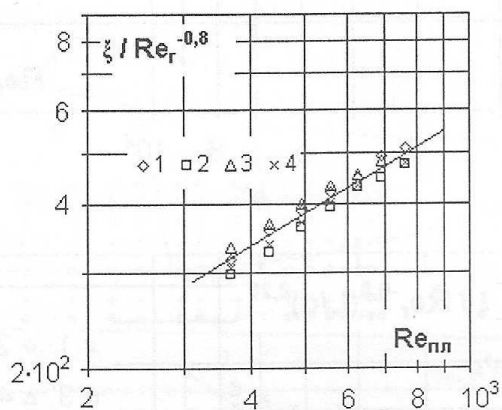
- 1 – $w_{\Gamma} = 25$ м/с; $L = 0,12$ м;
- 2 – 35; 0,12; 3 – 25; 0,16;
- 4 – 35; 0,16; 5 – 25; 0,24;
- 6 – 35; 0,24; 7 – 25; 0,32;
- 8 – 35; 0,32.

Уравнения (4-7) справедливы в диапазоне чисел $Re_{\Gamma} = 18000 \dots 40000$.

Относительная погрешность эксперимента не превышает $\pm 10\%$.



а)



б)

Рис. 8. Обобщение экспериментальных данных для гидродинамически стабилизированного потока в различных режимах:

а) в области устойчивого кольцевого режима течения:

- 1 - $w_{\Gamma} = 20$ м/с; 2 - 25;
- 3 - 30; 4 - 35;

б) в области дисперсно-кольцевого режима течения:

- 1 - $w_{\Gamma} = 20$ м/с; 2 - 25;
- 3 - 30; 4 - 35.

Выводы

На основании экспериментального исследования гидродинамических характеристик при восходящем спутном движении газа и жидкости можно сформулировать следующие выводы:

1. Получены экспериментальные зависимости удельного гидравлического сопротивления от скорости газа и плотности орошения на начальном гидродинамическом участке и для гидродинамически стабилизированного потока.
2. Высота начального гидродинамического участка при восходящем спутном движении газа и жидкости составляет $L_{н.г.} \approx 30 \cdot d$.
3. Получены обобщенные соотношения, которые позволяют рассчитать величину гидравлического сопротивления в восходящем спутном течении газа и жидкости на

начальном гидродинамическом участке и на участке гидродинамически стабилизированного потока.

4. Для эффективной работы контактных аппаратов с восходящим спутным течением пленки жидкости и газа рекомендована область устойчивого кольцевого режима течения.

Основные обозначения

- d - диаметр;
- L - высота;
- P - давление;
- Q_m - объемная плотность орошения;
- w - скорость;
- g - ускорение свободного падения;
- ν - коэффициент кинематической вязкости;
- σ - коэффициент поверхностного натяжения;
- ρ_{Γ} - плотность;
- ξ - коэффициент гидравлического сопротивления;

$$K = W_{KP}'' \sqrt{\rho''} / \sqrt[4]{\sigma g (\rho' - \rho'')} - \text{критерий устойчивости двухфазного потока;}$$

$$Re_{\Gamma} = w_{\Gamma} \cdot d / \nu - \text{число Рейнольдса для газа;}$$

$$Re_{пл} = 4 \cdot Q_m / \nu - \text{число Рейнольдса для}$$

пленки жидкости;

Нижние индексы:

- $г$ - газ;
- $кр$ - критический.

Литература

1. Безродний М.К., Хавін С.О., Назарова І.О., "Нагрівник текучої рідини", а.с. України, №53256 А, 7 F28C3/06.
2. Кутателадзе С.С., Сорокин Ю.Л. О гидродинамической устойчивости некоторых газожидкостных систем. Сб. Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных систем. - М.-Л.: Госэнергоиздат., 1961.- С.315-324.
3. Конобеев Б.И., Малюсов В.А., Жаворонков Н.М. Гидравлические сопротивления и толщина пленки при обращенном течении жидкости под действием газа в вертикальных трубках // Химическая промышленность.-1957.-№3.-С.38-41.
4. Wallis G.B. Flooding velocities for air and water in vertical tubes. // United Kingdom Atomic Energy Authority, AEEW-R123. - 1961.

5. Сорокин Ю.Л. Об условиях устойчивости некоторых режимов движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах // Журнал прикладной механики и технической физики. - 1963. - №6. - С. 150-165.
6. Андреевский А.А. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости // В книге: Температурный режим и гидравлика парогенераторов. - Л.: Наука. - 1978. - С. 181-230.
7. Bezrodny M.K., Antoshko Yu.V. Critical regime of upward film flow in vertical annular channels // Experimental and Fluid Science.-1992.-№5.-P.448-456.
8. Илюхин Ю.Н., Светлов С.В., Алексеев С.Б., Кухтевич В.О., Сидоров В.Г. Гидродинамические характеристики процесса "захлебывания" при противоточном движении пара и воды в вертикальных трубах // Теплофизика высоких температур. - 1999. - Т. 37. - №3. С.488-494.
9. Светлов С.В., Илюхин Ю.Н., Алексеев С.Б., Кухтевич В.О., Сидоров В.Г. Гидродинамика противоточного двухфазного потока в вертикальных каналах // Теплофизика высоких температур. - 2000. - Т. 38. - №4. С.631-638.
10. Хьюит Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения.-М.: Энергия, 1976.-407 с.
11. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. -М.: Мир.-1972.-440с.
12. Безродный М.К., Антошко Ю.В. Гидродинамика восходящего течения пленки жидкости и потока пара в вертикальных кольцевых каналах // ИФЖ.-1990.-Т.58.-№3.-С.425-430.
13. Das R.K., Pattanayak S. Electrical impedance method for flow regime identification in vertical upward gas-liquid two-phase flow // Meas. Sci. and Technol.-1993.-№12.-pp.1457-1463.
14. Кутателадзе С.С., Сорокин Ю.Л. О гидродинамической устойчивости некоторых газожидкостных систем. Сб. Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных систем.: Госэнергоиздат.-М.-Л., 1961.-С.315-324.
15. Нигматуллин Б.И., Нетунаев С.В., Горинова М.З. Исследование процессов уноса влаги с поверхности жидкой пленки в восходящем воздушно-водяном потоке // ТВТ.-1982.-№1.-С.40-42.
16. Безродный М.К., Антошко Ю.В. Влияние скорости пара на толщину пленки жидкости при спутном восходящем течении. - Первая российская национальная конференция по теплообмену, Москва, 1994, Т.6, С.35-40.
17. Безродный М.К., Антошко Ю.В., Лах Я. Закономерности восходящего течения пленки жидкости и потока пара в вертикальном канале. - IX symposium wumianu ciepła i masy, Augustov, 1995, s. 61-74.
18. Безродный М.К. О предельных режимах области устойчивого восходящего течения пленки жидкости и потока газа или пара в вертикальных трубах и каналах // Промышленная теплотехника.-2002.-№4.-С. 31-37.
19. Живайкин Л.Я., Волгин Б.П. О гидравлическом сопротивлении восходящего двухфазного потока. - Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. - 1961. - Т. VI. - №3. - С354-355.
20. Конобеев Б.И., Малюсов В.А., Жаворонков Н.М. Гидравлические сопротивления и толщина пленки при обращенном течении жидкости под действием газа в вертикальных трубах // Химическая промышленность.-1957.-№3.-С.38-41.
21. Семенов П.А., Рейбах М.С., Горшков А.С. Определение толщины слоя жидкости в аппаратах пленочного типа // Химическая промышленность. - 1966. №3. - С.53-59.
22. Иванов М.Е., Арустамян Э.С., Рустамбеков М.К. Перепад давления при пленочном газожидкостном потоке. - Химическая промышленность.-1969.-№1.-С. 64-67.
23. Коновалов Н.М., Войнов Н.А, Николаев Н.А. Гидродинамические закономерности вертикального прямого движения газа и пленки жидкости в трубах // Теоретические основы химической технологии. - 1993. - №2. - С.192-196.
24. Безродный М.К., Назарова И.А., Хавин С.А. Гидравлическое сопротивление при восходящем спутном течении пленки жидкости и газа в вертикальных трубах // Промышленная теплотехника. - 2004. - №2. - С. 13-18.
25. Сорокин Ю.Л., Кирдяшкин А.Г., Покусаев Б.Г. Исследование устойчивости пленочного режима течения жидкости в вертикальной трубе при восходящем движении фаз // Химическое и нефтяное машиностроение.-1965.-№5.-С.35-38.
26. Пушкина О.Л., Сорокин Ю.Л. Опрокидывание движения пленки жидкости в вертикальных трубах // Труды ЦКТИ.-1969.-вып.96.-С.34-39.
27. Гидравлический расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Под. ред. В.А. Локшина и др. - М.: Энергия, 1978. - 256 с.