

УДК 536.24

БЕЗРОДНЫЙ М.К., БАРАБАШ П.А.,
НАЗАРОВА И.А., КОСТЮК А.П.*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”*

ГИДРОДИНАМИКА ПРОТОЧНОГО БАРБОТАЖНОГО СЛОЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ

Представлено експериментальні дослідження гідродинамічних характеристик двофазного потоку, встановлено вплив режимних параметрів, способу подачі газу в робочий канал та геометричних характеристик каналу на структуру потоку, визначено межі стійкого двофазного режиму.

Представлено експериментальное исследование гидродинамических характеристик двухфазного потока, установлено влияние режимных параметров, способа подачи газа в рабочий канал и геометрических характеристик канала на структуру потока, определены границы устойчивого двухфазного режима.

Experimental study of the hydrodynamic characteristics of two-phase flow is presented; the influence of regime parameters, the way of gas feed to the working channel and geometrical parameters of the channel on the flow structure is established; the limits of steady two-phase mode are determined.

$Bo = d/\delta$ – число Бонда;

d – диаметр;

$Fr_{пл} = Q_m/\delta(g\delta)^{0,5}$ – число Фруда для пленки жидкости;

g – ускорение свободного падения;

Q_m – объемная плотность орошения;

w – приведенная скорость воздуха;

$\Delta P/L$ – продольный средний градиент полных потерь давления;

$\delta = (\sigma/(g(\rho - \rho_r)))^{0,5}$ – постоянная Лапласа;

ρ – плотность;

σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Индексы:

вх – воздух;

г – газ;

тр – труба;

ш – шайба.

Введение

Большинство вопросов повышения эффективности работы контактных аппаратов связано с тепло- и массообменом между жидкостью и газом. Развитие новых современных технологий требует глубокого изучения процесса теплообмена при высокой турбулизации поверхности контактирующих фаз. Основным критерием разработки новых высокоэффективных контактных аппаратов является интенсификация процесса теплообмена и уменьшение капитальных затрат.

Достаточно развитая межфазная поверхность жидкой и газовой фаз создается при пузырьковым или струйном барботаже газа в жидкости. Такой режим взаимодействия сред используется в различных контактных аппаратах, имеющих форму высоких колонн, рабочее пространство которых разделено горизонтальными тарелками

на ряд камер. Барботажные аппараты характеризуются повышенной интенсивностью тепло- и массообмена на единицу объема аппарата, допускают работу с загрязненными и умеренно вязкими жидкостями, нечувствительны к колебаниям расхода теплоносителей. Однако к их недостаткам относятся сложность конструкции, металлоемкость, высокое гидравлическое сопротивление [1]. В режиме барботажа такие аппараты работают вблизи критических скоростей движения газа, то есть на 15...20% ниже так называемой скорости захлебывания, при которой наблюдается потеря устойчивости противоточного движения фаз, повышенный унос воды и вследствие этого – повышение гидравлического сопротивления. Явление захлебывания определяется взаимодействием сил трения, инерции, тяжести и поверхностного натяжения, а также геометрическими характеристиками аппарата.

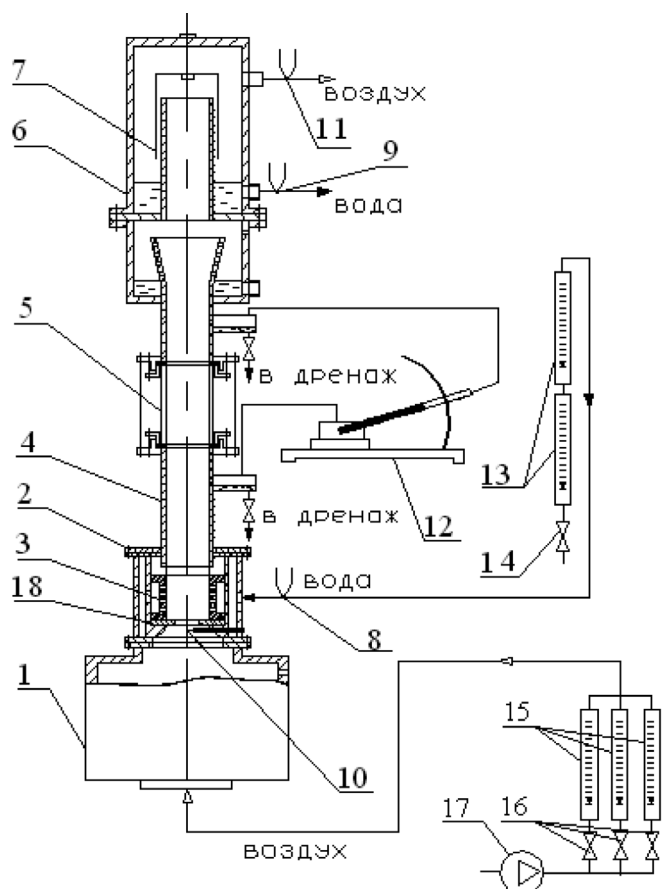


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 — камера входа; 2 — камера смешения;
 3 — пористая вставка; 4 — рабочий канал;
 5 — участок визуализации; 6 — камера сбора жидкости; 7 — сепаратор;
 8, 9, 10, 11 — термопары; 12 — микроманометр;
 13, 15 — ротаметры, 14, 16 — вентили;
 17 — компрессор; 18 — шайба.

На кафедре ТПТ НТУУ «КПИ» был разработан контактный аппарат [2], в котором организовано движение газов со скоростью выше 15 м/с, т.е. превышающей верхнюю границу захлебывания противоточного движения газа и пленки жидкости в вертикальных трубах. При таких значениях скоростей газового потока в вертикальном канале создается восходящее спутное движение фаз. Результаты экспериментального исследования гидродинамических характеристик восходящего спутного течения пленки жидкости и газа изложены в работах [3,4]. Эти исследования позволили установить эффективный режим работы контактного аппарата, а также получить

обобщенные зависимости для расчета величины гидравлического сопротивления в восходящем спутном течении пленки жидкости и газа в вертикальной трубе. При работе контактного аппарата в таком режиме достигаются высокие значения коэффициентов тепло- и массоотдачи [5, 6]. Поверхностью контакта в этом случае является волновая пленка жидкости, которая течет по стенкам канала, а газ движется в ядре потока. Интенсифицировать теплообмен можно путем увеличения межфазной поверхности, что можно достичь в проточном барботажном слое в вертикальной трубе, снизив при этом скорость газовой фазы. Вопрос о режимах и формах движения газожидкостных смесей в трубах небольшого диаметра, а также гидравлическое сопротивление в проточном барботажном слое в настоящее время еще мало изучен. В данной работе представлено экспериментальное исследование гидродинамических характеристик проточного барботажного слоя в вертикальной трубе с целью установления режимов наиболее рациональной и экономичной работы контактного аппарата с такой двухфазной системой.

Схема экспериментальной установки и методика проведения экспериментов

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

Основными составными частями установки являются: камера входа 1, камера смешения 2, рабочий канал 4 с участком визуализации 5, камера сбора жидкости 6 с сепаратором 7. Внутренний диаметр участка визуализации 5 совпадает с диаметром рабочего канала 4, что предотвращает возмущение двухфазного потока. Камера входа 1 выполняет роль ресивера для воздуха, который подается компрессором 17. Устройство для ввода жидкости выполнено в виде камеры смешения 2 с пористой вставкой 3, которая согласована с внешним диаметром трубы рабочего канала 4. Рабочий канал выполнен в виде труб с внутренним диаметром 0,017 м, 0,026 м, 0,035 м и высотой 0,143 м, 0,264 м, 0,437 м. Расход воздуха измерялся ротаметрами 15 и регулировался при помощи вентиля 16. Расход воды, которая подавалась в

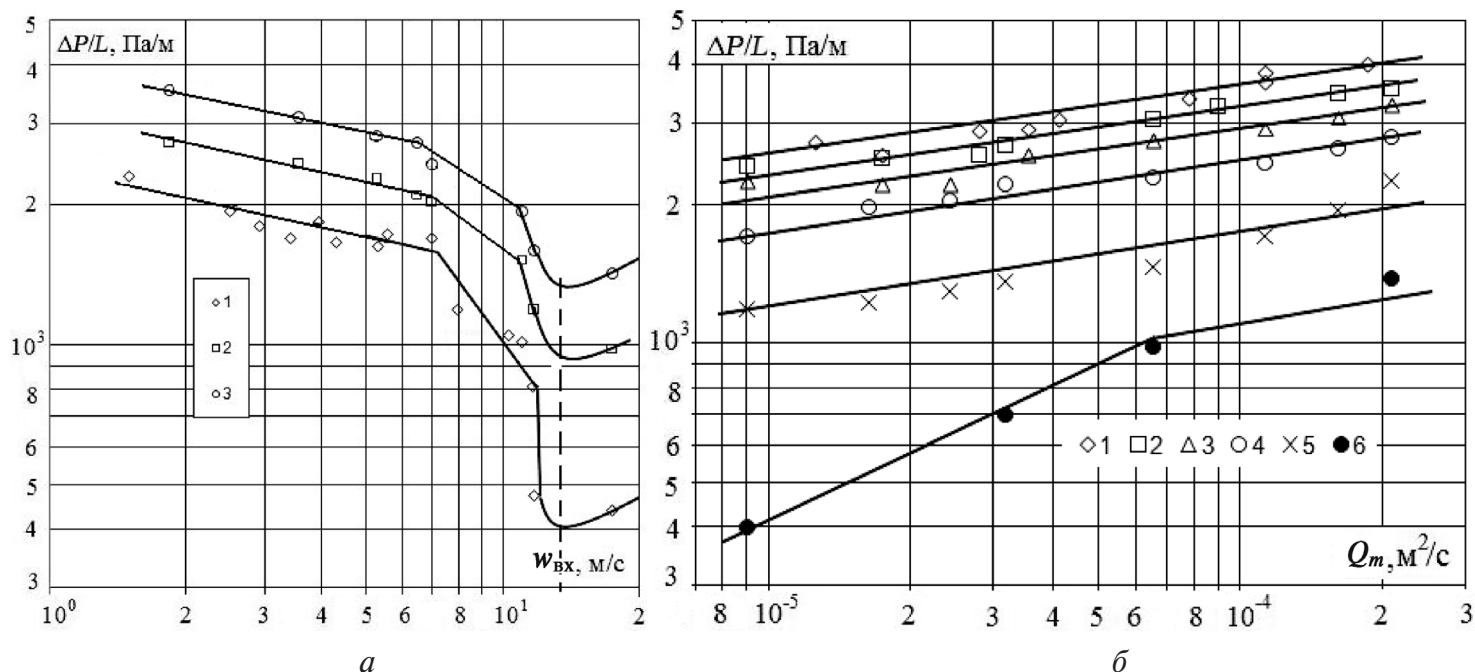


Рис. 2. Зависимость продольного среднего градиента полных потерь давления при $d_{mp} = 0,017$ м, $d_{ш} = 5,4$ мм: *а* – от приведенной скорости воздуха: 1 – $Q_m = 8,99 \cdot 10^{-6}$ м²/с; 2 – $6,56 \cdot 10^{-5}$; 3 – $2,1 \cdot 10^{-4}$; *б* – от объемной плотности орошения: 1 – $w_{вх} = 1,84$ м/с; 2 – 2,45; 3 – 3,06; 4 – 5,26; 5 – 9; 6 – 14.

камеру смешения 2, измерялся ротаметрами 13 и регулировался вентилями 14.

На входе в канал размещались шайбы 18, имеющие одно или несколько отверстий. Диаметры отверстий в шайбах составляли 5 мм, 8 мм и 10 мм (при одном отверстии). Установка перед рабочим участком шайбы необходима для предотвращения провала жидкости. При этом значение скорости потока воздуха в сечении шайбы было не меньше 15...16 м/с, что обеспечивало подачу всей жидкости в рабочий канал. В ходе проведения экспериментальных исследований изучалось влияние способа ввода воздуха в рабочий канал. В первом случае воздух подавался в рабочий канал через шайбу с одним отверстием, во втором – через шайбу с несколькими отверстиями, при этом суммарная площадь отверстий в шайбе была равной площади сечения шайбы с одним отверстием.

Методика исследования гидродинамических режимов двухфазного адиабатного течения была построена на основе изучения закономерностей изменения продольного среднего градиента полных потерь давления $\Delta P/L$, который определялся как отношение общего перепада давления в по-

токе ΔP к расстоянию между отборами давления L . Перепад давлений измерялся микроманометром 12. Для измерения перепада давлений в стенке трубы были просверлены отверстия диаметром 2 мм. Отверстия соединялись с объемом небольших емкостей, выполняющих роль сепараторов. В нижней части сепараторов собиралась жидкость, а верхняя, воздушная часть, соединялась с микроманометром, с помощью которого производилось измерение перепада давления.

Результаты экспериментов и их анализ

При проведении экспериментальных исследований были получены зависимости продольного среднего градиента полных потерь давления $\Delta P/L$ на измерительном участке от приведенной скорости воздуха и объемной плотности орошения для различных шайб, диаметров рабочего канала и его высоты. Также проводились визуальные наблюдения за характерными режимами течения, которые фиксировались с помощью фотосъемки.

На рис. 2 представлены зависимости продольного среднего градиента полных потерь давления

от приведенной скорости воздуха и объемной плотности орошения.

Характер полученных зависимостей меняется с увеличением приведенной скорости газа, что свидетельствует о существовании различных режимов течения. Первый излом графика (рис. 2, *a*) наблюдается при скорости воздуха $w_{\text{вх}} = 6...7$ м/с. Дальнейшее увеличение скорости воздушного потока сопровождается более резким падением $\Delta P/L$. Изменение характера зависимости продольного градиента полных потерь давления от скорости воздуха объясняется тем, что при скоростях меньше 6...7 м/с в рабочем канале происходит барботирование потока воздуха сквозь столб жидкости без заметного взаимодействия фаз, как в непроточном барботажном слое.

При увеличении скорости воздуха выше 6...7 м/с происходит более активное взаимодействие фаз на границе раздела, вызывающее рост уноса жидкости, что увеличивает среднее газосодержание двухфазного слоя и более интенсивно уменьшает гидростатическую составляющую общего перепада давления. Значение критической скорости газа при этом согласуется с соответствующим значением для начала процесса “захлебывания” течения при противотоке газа и пленки жидкости [7]. Следующий излом графика соответствует значению приведенной скорости газа 11...12 м/с, выше которой наблюдается резкое снижение общего перепада давления. Это может быть объяснено образованием сквозного газового канала в ядре двухфазного потока вследствие выброса перемычек жидкости между большими пузырями и газовыми снарядами, что обеспечивает резкое снижение гидростатической составляющей ΔP практически до нуля. Рост ΔP при дальнейшем увеличении скорости газа обусловлен только ростом потерь на трение в разделенном восходящем двухфазном потоке. Этот участок зависимости соответствует началу упорядоченного восходящего кольцевого течения, что также согласуется с результатами визуальных наблюдений. Явный минимум гидравлического сопротивления, наблюдаемый при приведенной скорости воздушного потока ~ 14 м/с, количественно соответствует инверсии течения, при которой происходит прекращение нисходящего течения пленки жидкости при разделенном двухфазном течении

и начинается формирование упорядоченного восходящего кольцевого течения [7, 8].

При увеличении плотности орошения качественный характер кривых $\Delta P/L = f(w_{\text{вх}})$ на рис. 2, *a* не изменяется. Однако увеличение расхода жидкости вызывает уменьшение газосодержания потока, что затрудняет образование устойчивого газового стержня в ядре двухфазного потока и, как следствие, обеспечивает меньшее относительное снижение критического значения $\Delta P/L$. При достаточно большой плотности орошения кривая $\Delta P/L = f(w_{\text{вх}})$ плавно переходит через минимум функции без провала значений $\Delta P/L$, что объясняется отсутствием разделения фаз при увеличении скорости воздуха выше критического значения. Наличие минимума на кривой зависимости $\Delta P/L = f(w_{\text{вх}})$ связано с противоположным влиянием гидростатической составляющей перепада давления и потерь на трение на общий перепад давления ΔP при увеличении скорости воздуха.

Опытные данные, приведенные на рис. 2, *б*, свидетельствуют о монотонном влиянии плотности орошения на величину $\Delta P/L$ за исключением нижней кривой, соответствующей критической скорости воздуха $w_{\text{вх}} \approx 14$ м/с. При этом интенсивный рост значений $\Delta P/L$ на первом участке зависимости свидетельствует о постепенном вытеснении сквозного газового стержня в центральной части потока, и при увеличении плотности орошения выше значения $Q_{\text{м}} = (6...7) \cdot 10^{-5}$ м²/с наблюдается “беспровальный” режим течения двухфазного потока при переходе через критическую скорость газа.

На рис. 3 представлена зависимость продольного среднего градиента полных потерь давления от приведенной скорости воздуха при различных способах подачи воздуха в рабочий канал (разных диаметрах отверстия и их количестве во входной шайбе).

Из рисунка видно, что для канала диаметром 17 мм на зависимость $\Delta P/L = f(w_{\text{вх}})$ практически не влияет изменение диаметра отверстия шайбы (рис. 3, *a*), так же как и изменение количества отверстий в шайбе при сохранении неизменной суммарной площади проходного сечения отверстий (рис. 3, *б*). Данное обстоятельство, по-видимому, объясняется тем, что на формирование

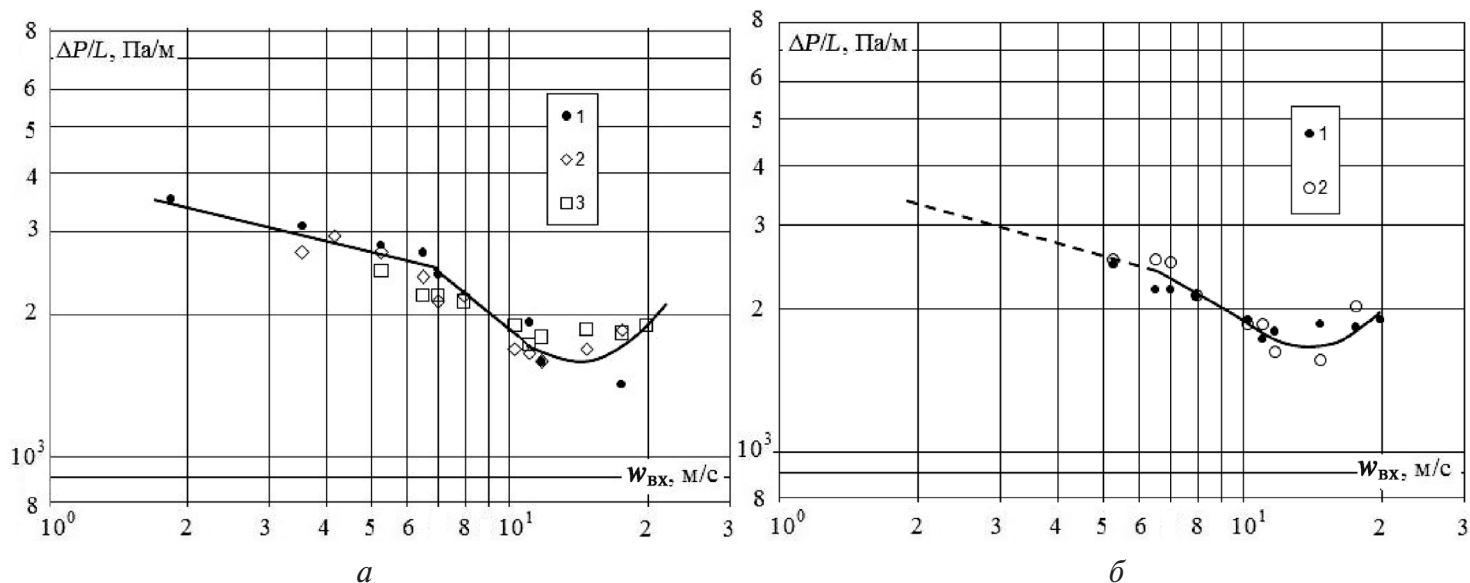


Рис. 3. Влияние способа подачи воздуха в активную зону на зависимость $\Delta P/L = f(w_{BX})$ при $Q_m = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, $d_{mp} = 0,017 \text{ м}$: а – 1 – $d_w = 5,4 \text{ мм}$; 2 – 8,2; 3 – 10,4; б – 1 – $d_w = 10,4 \text{ мм}$, одно отверстие; 2 – семь отверстий при той же суммарной площади сечения отверстий.

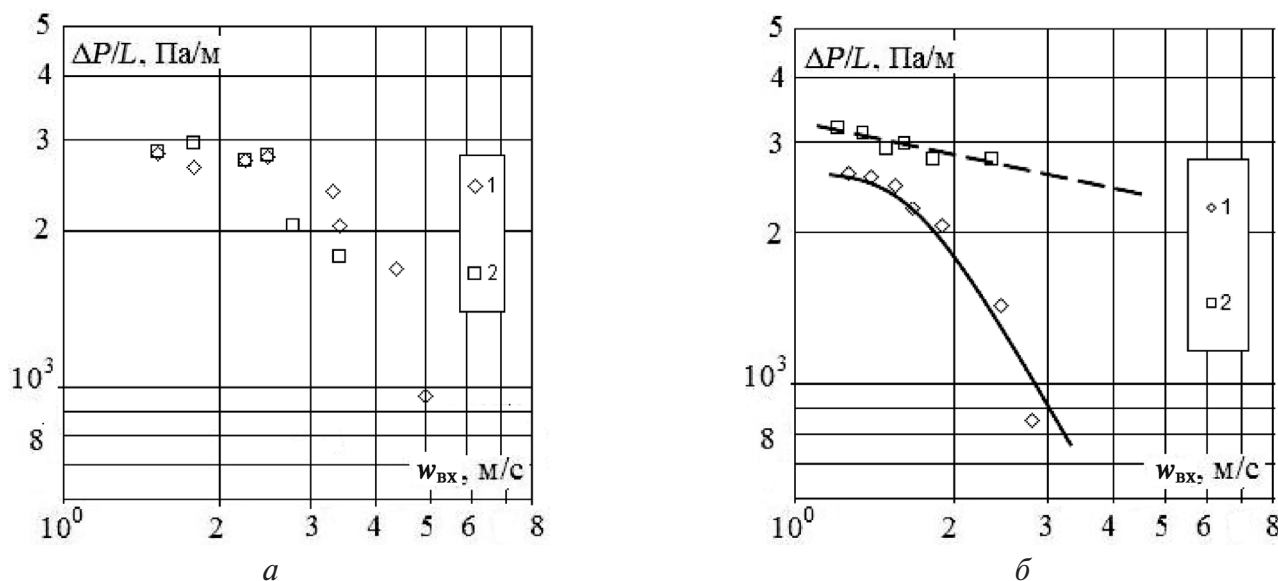


Рис. 4. Влияние условий подвода воздуха в рабочий канал на зависимость $\Delta P/L = f(w_{BX})$ при $Q_m = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ и различных диаметрах канала: а – $d_{mp} = 0,026 \text{ м}$, 1 – одно отверстие, $d_w = 8,2 \text{ мм}$; 2 – восемь отверстий при той же суммарной площади сечения отверстий; б – $d_{mp} = 0,035 \text{ м}$, 1 – одно отверстие, $d_w = 8,2 \text{ мм}$; 2 – восемь отверстий при той же суммарной площади сечения отверстий.

структуры барботажного слоя главное влияние оказывает диаметр канала, который в области значений, соответствующих числам $Bo < 10$ [9], формирует в основном снарядный режим течения двухфазного потока. В диапазоне чисел $10 < Bo < 30$ наблюдается эмульсионный режим

течения при значительной концентрации частиц жидкости в центральной части канала [9] и диаметр канала постепенно теряет свое влияние на формирование структуры барботажного слоя. Как видно из рис. 4, а, при диаметре канала $d_{тр} = 0,026 \text{ м}$, что соответствует граничному зна-

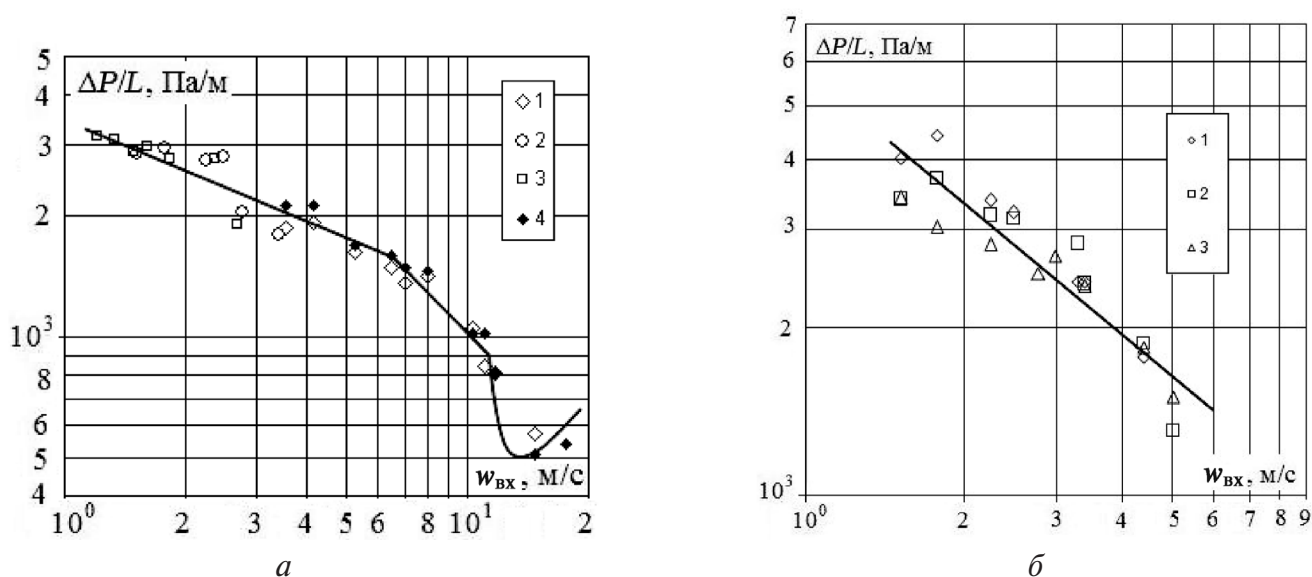


Рис. 5. Влияние геометрических характеристик рабочего канала на зависимость $\Delta P/L = f(w_{вх})$ при $Q_m = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$: а – диаметра канала, 4 – $d_{mp} = 0,017 \text{ м}$, $d_{ш} = 8,2 \text{ мм}$, одно отверстие; 1–3 – восемь отверстий при той же суммарной площади сечения отверстий; 1 – $d_{mp} = 0,017 \text{ м}$; 2 – $d_{mp} = 0,026 \text{ м}$; 3 – $d_{mp} = 0,035 \text{ м}$; б – высоты канала при $d_{mp} = 0,026 \text{ м}$, $d_{ш} = 8,2 \text{ мм}$, 1 – $L = 0,143 \text{ м}$; 2 – $L = 0,264$; 3 – $L = 0,437$.

чению числа $Bo = 10$, еще не проявляется влияние условий ввода воздуха в рабочий канал. Вместе с тем при значении диаметра $d_{тр} = 0,035 \text{ м}$ (рис. 4, б) начинает проявляться влияние способа подачи воздуха в рабочий участок. Свидетельством этого является возрастание значения $\Delta P/L$ при переходе от одного отверстия в шайбе (линия 1 рис. 4, б) до восьми отверстий в шайбе при сохранении неизменной суммарной площади сечения отверстий (линия 2 рис. 4, б). При этом возрастает равномерность распределения газа в жидкости, уменьшается вероятность образования газовых струй в центре канала, что ведет к некоторому увеличению гидростатической составляющей перепада давления.

На рис. 5 приведены опытные данные, иллюстрирующие закономерности изменения структуры двухфазного потока при изменении геометрических характеристик рабочего канала: диаметра канала и высоты барботажного слоя.

Как видно из рис. 5, а, гидравлическая характеристика двухфазного слоя $\Delta P/L = f(w_{вх})$ при обеспечении условий равномерности подачи газовой фазы через входную диафрагму не зависит от диаметра канала. Изменение высоты рабочего участка в диапазоне изменения ее от $L = 0,143 \text{ м}$

до $L = 0,437 \text{ м}$ практически не влияет на продольный средний градиент полных потерь давления (рис. 5, б). Объяснением этого может быть то, что процесс формирования структуры двухфазного потока происходит на очень малой высоте рабочего канала, при этом среднее газосодержание проточного барботажного слоя остается практически неизменным по высоте рабочего участка.

Выводы

1. При относительно небольшом диаметре канала (число $Bo < 10$), при котором диаметр канала формирует главным образом снарядный режим течения двухфазного потока, структура двухфазного потока не зависит от способа подачи газа в рабочий канал.

2. При большем значении диаметра канала ($10 < Bo < 30$, в области существования эмульсионного режима течения) на структуру двухфазного потока начинают влиять условия подвода газа в рабочий участок. При этом для обеспечения равномерной структуры слоя по сечению канала требуется равномерный (рассредоточенный) подвод газа.

3. При увеличении приведенной скорости

газа до значений скорости инверсии пленки в вертикальном канале и относительно небольшой плотности орошения ($F_{гпл} = 2,5...3$) проточный барботажный слой может переходить в разделенный (кольцевой) режим течения двухфазного потока.

4. Обеспечение режима устойчивого проточного барботажного двухфазного слоя может быть достигнуто во всем диапазоне изменения скорости газа при числе Фруда выше значения $F_{гпл} = 2,5...3$.

5. Для практического применения барботажных аппаратов может быть рекомендован проточный барботажный слой с режимными параметрами жидкости и газа, обеспечивающими минимум гидравлического сопротивления двухфазного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аронов И.З.* Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.

2. *Декларацийний* патент на корисну модель № 22852 України, МПК F24H 6/00. Нагрівник текучої рідини. Безродний М.К., Назарова І.О., Костюк О.П. Власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u2006 13907; заявл. 27.12.2006; опубл. 25.04.2007, Бюл. № 5.– 4 с.: (іл).

3. *Безродний М.К., Назарова И.А., Хавин С.А.* Гидравлическое сопротивление при восходящем спутном течении пленки жидкости и газа в вер-

тикальных трубах // Промышленная теплотехника. – 2004. – № 2. – С. 13–18.

4. *Безродний М.К., Назарова И.А.* Гидравлическое сопротивление восходящего потока газа и пленки жидкости в вертикальных трубах // Энергетика: економіка, технології, екологія // – 2005. – № 2. – С. 35–41.

5. *Безродний М.К., Хавин С.А., Назарова И.А.* Теплообмен при спутном восходящем течении газа и жидкости // Промышленная теплотехника. – 2003. – № 1. – С. 23–28.

6. *Безродний М.К., Назарова И.А., Хавин С.А.* Теплообмен при конденсации водяных паров из парогазовой смеси в восходящем потоке с пленкой жидкости // Промышленная теплотехника. – 2003. – № 4. – С. 26–30.

7. *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.

8. *Пушкина О.Л., Сорокин Ю.Л.* Опрокидывание движения пленки жидкости в вертикальных трубах // Труды ЦКТИ. – 1969. – вып. 96. – С. 34–39.

9. *Безродний М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О.* Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. – 2-е издание, дополненное и переработанное. – К.: Факт, 2005. – 704 с.

Получено 03.04.2009 г.