

остаются постоянными. Это объясняется тем, что векторы скоростей на срезе профилированного сопла не имеют поперечных составляющих и формирование поля закончено. У конических сопел векторы скорости капле на срезе сопла имеют поперечные составляющие, направленные к оси (в соответствии с характером профиля), и формирование профиля продолжается в струе после сопла. В этом смысле конические сопла обладают последствием.

3. В полном соответствии с [1] представленные данные показывают, что для относительно грубодисперсной каплевой примеси профилирование конфузурной части сопла существенно влияет на характер движения дискретной фазы и позволяет эффективно управлять ее распределением на срезе сопла. Для достижения максимальной равномерности полей концентраций дискретной фазы необходимо использовать сопла с клиновыми и выпуклыми профилями входа. При этом необходимо иметь в виду, что на выходе конфузурного клинового сопла будет градиент поперечных скоростей, который вызывает перестройку течения и ухудшает равномерность полей концентраций вниз по потоку от среза сопла. Применительно к сверхзвуковым соплам это обстоятельство приводит к тому, что сопла с профилированной до- и трансзвуковыми частями должны иметь более равномерное поле концентраций в сверхзвуковой части сопла, чем сопла с клиновой дозвуковой частью.

В случае газокapельного потока средняя величина дисперсности на выходе из сопла не зависит от начальной дисперсности и профиля сопла, а определяется газодинамикой течения (перепадом давления и концентрацией).

Поступила 5 VIII 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Злобин В. В. Исследование распределения твердой примеси в осесимметричных соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 4.
2. Левшинский И. А., Барановский С. И., Тихонов Б. А., Эпштейн В. И. Исследование структуры двухфазного потока в плоском сопле. В кн. «Вопросы газотермодинамики энергоустановок», вып. 1. Харьков, 1974.
3. Циклаури Г. В., Данилин В. С., Селезнев Л. И. Адиабатные двухфазные течения. М., Атомиздат, 1973.

УДК 532.529.5:536.24

### К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ В УЗКИХ КАНАЛАХ

А. Г. БЕЙНУЧОВ, А. Н. ХОЗЕ, А. Я. ЧЕРКАС

(Новосибирск)

Интенсификация теплопереноса при воздушно-испарительном охлаждении в значительной степени определяется организацией движения газожидкостных потоков в охлаждаемых каналах [1]. Эта задача представляет особый интерес в случае спутного восходящего движения газожидкостных потоков в относительно узких прямолинейных и криволинейных каналах прямоугольного сечения ( $\Delta \leq 2$  мм). В литературе практически отсутствуют данные по гидродинамике газожидкостных потоков в таких каналах. Поэтому цель настоящей работы — изучение в них режимов движения, амплитудно-частотных характеристик пленочного течения жидкости и потерь статического давления.

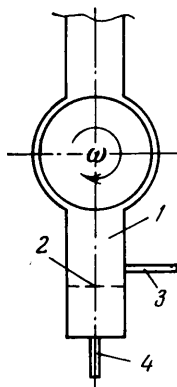
Криволинейные каналы выполнялись в виде двух коаксиальных цилиндров из полированного органического стекла с диаметром внутреннего цилиндра  $d_1 = 34, 50, 100$  и  $120$  мм; зазор между цилиндрами принимался  $\Delta = 0,2, 0,25, 0,35, 0,5, 0,6, 1, 2$  мм соответственно каждому диаметру.

Прямолинейные каналы выполнялись из полированных пластин органического стекла. Расстояние между пластинами устанавливалось при помощи калиброванных прокладок толщиной  $\Delta = 0,2, 0,25, 0,5, 1, 2$  мм; длина каналов определялась по условию  $l > 200\Delta$ . Ширина каналов во всех экспериментах была  $b = 124$  мм.

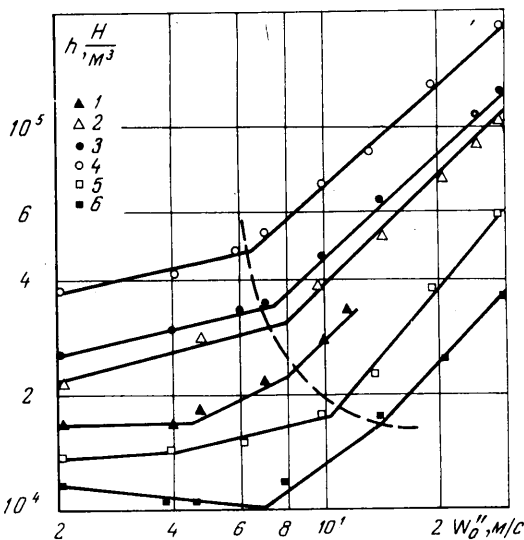
В качестве легкой фазы использовался воздух, жидкой фазы — вода, водные растворы глицерина ( $\nu = 10^{-6} - 10 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/сек), водные растворы олеата натрия ( $\sigma = 26,5 \cdot 10^{-3} - 72,4 \cdot 10^{-3}$  н/м).

На фиг. 1 дана принципиальная схема экспериментальной установки для криволинейных каналов.

Внутренний цилиндр приводился во вращение двигателем постоянного тока, скорость которого задавалась от регулируемого источника тока. По образующей наружного цилиндра располагались штуцера для отбора статического давления. Измерение статического давления выполнялось при помощи водяных манометров по методу «проливки». Волновые характеристики пленки изучались при использовании метода электропроводимости с помощью датчиков толщины пленки, установленных поперек движения потока заподлицо с поверхностью. Датчики располагались по длине и ширине рабочего канала и выполнялись в виде двух посеребренных бронзовых электродов с диаметром 2,6 мм с межцентровым расстоянием 7,8 мм.



Фиг. 1



Фиг. 2

Такое конструктивное исполнение датчиков позволяло уменьшить влияние емкостных эффектов, а покрытие из серебра предохраняло головки датчиков от окисления.

Схема измерения включала в себя звуковой генератор, электронный осциллограф, вольтметр средних значений и комплект контрольных датчиков. Частотные характеристики волнового пленочного течения на вращающейся поверхности определялись по методике, описанной в [2].

Изучение режимов газожидкостных потоков выполнялось по результатам фотографирования, измерения толщины пленки жидкости и изучения закономерностей потерь статического давления. Насыщенная двухфазная смесь при входе в рабочий канал создавалась в барботажной камере 1, снабженной воздухораспределительной решеткой 2, на которую через штуцер 3 подавалась жидкость, а под решетку через штуцер 4 — воздух. Температура смеси на входе поддерживалась  $\sim 25^\circ \text{C}$ . На выходе из рабочего канала располагалась сборная камера, за которой находился циклон. Жидкость из циклона возвращалась в емкость постоянного уровня.

Измерение расхода жидкости и воздуха осуществлялось ротаметрами. Эксперименты выполнялись при приведенных скоростях воздуха  $w_0'' = 2.5 - 40 \text{ м/сек}$  и жидкости  $w_0' = 0.013 - 0.2 \text{ м/сек}$ . (Здесь и далее два штриха относятся к газу, один штрих — к жидкости.) Измерение скорости вращения внутреннего цилиндра выполнялось ручным тахометром при  $\omega < 20 \text{ сек}^{-1}$  и при  $\omega \geq 20 \text{ сек}^{-1}$  строботахометром. Угловая скорость вращения внутреннего цилиндра изменялась в пределах  $0 \leq \omega \leq 400 \text{ сек}^{-1}$ .

Изучение режимов газожидкостных потоков в криволинейных каналах при  $\Delta \leq 2 \text{ мм}$  показало появление ряда особенностей, отличающих эти режимы от наблюдаемых в трубах и каналах относительно большого гидравлического диаметра [3, 4].

Так, например, в канале, имеющем  $d_1 = 50 \text{ мм}$  и  $d_2 = 50.5 \text{ мм}$  при  $0 < Re' < 100$  и  $40 < Re'' < 120$  имеет место обращенная картина пробкового течения, т. е. двухфазная структура представляет собой воздушную среду с распределенными в ней жидкостными пробками; при этом стенки канала покрыты пленкой жидкости (здесь  $Re' = w_0' 2\Delta / \nu'$  и  $Re'' = w_0'' 2\Delta / \nu''$ ).

В этом случае минимальная толщина пленки жидкости на поверхности внутреннего цилиндра при  $\omega=0$  составляла  $\sim 5$  мк, а частота прохождения жидкостных пробок  $f \approx 10$  гц.

С ростом скорости воздуха обращенный пробковый режим переходит к режиму, напоминающему барботажный; при этом между стенками канала движутся тонкие жидкостные перегородки, частота которых  $f \approx 20$  гц.

При дальнейшем повышении скорости  $w_0''$  возникает дисперсно-кольцевой режим; поверхность пленки покрыта рябью с частотой 25 гц, а амплитуда волн изменяется в пределах 0.02–0.04 мм.

В настоящей работе основное внимание уделено результатам изучения дисперсно-кольцевого режима движения двухфазного потока, представляющего наибольший интерес с точки зрения технической реализуемости (высокая интенсивность теплообмена и относительная простота создания организованного движения двухфазного потока).

На фиг. 2 представлена зависимость  $h=f(w_0'')$  для криволинейного канала. Данные 1–6 соответствуют следующим значениям  $\Delta$  и  $r_1$  в мм,  $w_0'$  в м/сек: (0.3, 17, 0.02), (0.25, 30, 0.02), (0.3, 30, 0.09), (0.25, 60, 0.08), (0.6, 60, 0.039), (1.0, 60, 0.052).

Для иллюстрации на фиг. 2 отмечены примерные границы перехода к дисперсно-кольцевому режиму, установленные по изменению характера потерь статического давления для водовоздушного потока; область дисперсно-кольцевого режима расположена на фигуре сплава от границы.

Анализ результатов изучения волновых характеристик пленочного течения показывает, что изменение расходных характеристик фаз при дисперсно-кольцевом режиме оказывает незначительное влияние на величину средней толщины пленки жидкости ( $\delta$ ) и существенное на частотные характеристики. Слабую зависимость ( $\delta$ ) от расходных характеристик фаз можно объяснить консервативностью тонких жидкостных пленок к внешним возмущениям.

Увеличение скорости воздуха  $w_0''$  в 3 раза ведет к повышению частотных характеристик почти на порядок, а увеличение  $w_0'$  на порядок снижает частоту прохождения волн примерно в 3 раза. При этом наиболее характерно для рассматриваемого режима существенное влияние вязкости и сил поверхностного натяжения.

Так, увеличение вязкости жидкости  $\nu'$  приводит к увеличению ( $\delta$ ); при этом волны на поверхности пленки затухают.

Уменьшение поверхностного натяжения  $\sigma$  создает условия для генерирования волн большой частоты с одновременным возрастанием их амплитуды.

Аналогичные выводы получены и для плоских прямоугольных каналов. В этом случае закономерность изменения потерь статического давления  $h=\Delta p/l$  при  $\Delta \geq 1$  мм в зависимости от  $w_0''$  такая же, как и для труб большего гидравлического диаметра. Зависимость  $h=f(w_0'')$  имеет характерный минимум, однако последний смещен в сторону меньших значений  $w_0''$ , что, по-видимому, определяется относительно усилившимся влиянием загромождения полезного сечения канала пленкой жидкости по сравнению с каналом большего гидравлического диаметра. При этом увеличение  $w_0'$  приводит к смещению минимума  $h$  в сторону меньших  $w_0''$  в отличие от [3]. Для щелей, имеющих  $\Delta < 1$  мм минимум зависимости в рассматриваемом диапазоне параметров не был зафиксирован.

На фиг. 3 даны результаты некоторых исследований по измерению потерь статического давления при движении водовоздушного потока в прямолинейных каналах с гидравлическим диаметром  $l_0=2\Delta=0.4-6$  мм, а также использованы результаты работ [6–8] для труб с  $l_0 < 4-6$  мм. Здесь точки 1–7 соответствуют  $w_0''=20$  м/сек, 8–11 –  $w_0''=30$  м/сек, при этом 1–4, 8, 9 отвечают  $w_0'=0.5$  м/сек, а 5–7 –  $w_0'=0.1$  м/сек. Данные 2, 6; 3, 7; 4, 10, 11 взяты из работ [4–6] соответственно.

В результате обобщения экспериментальных данных получены зависимости для определения коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_p$  и относительной толщины пленки жидкости  $\delta/\Delta$  в плоских каналах

$$(1) \quad \xi_p = 3.6 \cdot 10^3 \left( \frac{w_0'}{w_0''} \right)^{0.5} Re_*''^{-0.52} We_*^{-0.4}$$

$$(2) \quad \frac{\delta}{\Delta} = 1.12 \cdot 10^3 \left( \frac{w_0'}{w_0''} \right)^{0.5} Re_*''^{-0.52} We_*^{-0.4}$$

$$Re_*'' = \frac{w_0'' \sqrt{\nu'^2/g}}{\nu'} \quad We = \frac{\sigma}{(\rho' - \rho'') g (\nu'^2/g)^{2/3}}$$

Кривизна канала вызывает асимметрию пленочного течения на поверхностях неподвижного внутреннего и наружного цилиндров.

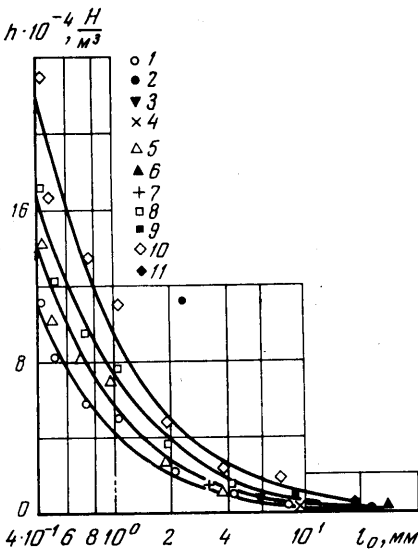
Для коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_0$  и толщины пленки  $\langle \delta_0 \rangle$  на поверхности внутреннего цилиндра получены зависимости

$$(3) \quad \frac{\xi_0}{\xi_p} = 1 + 2.4 \left( \frac{\Delta}{r} \right)^{2/3}, \quad \frac{\langle \delta_0 \rangle}{\langle \delta \rangle} = 1 - 0.75 \left( \frac{\Delta}{r} \right)^{1/3}$$

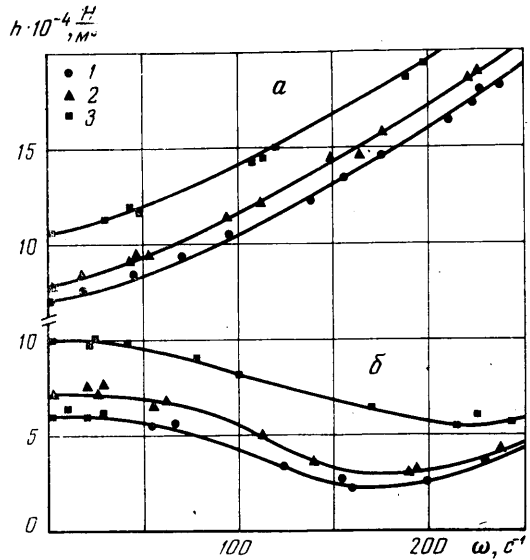
Формулы (1)–(3) получены при  $0.325 \cdot 10^{-3} < w_0'/w_0'' < 16.7 \cdot 10^{-3}$ ,  $1.6 \cdot 10^2 < Re.'' < 2.1 \cdot 10^3$ ,  $10^3 < We_* < 3.9 \cdot 10^3$ ,  $4.17 \cdot 10^{-3} < \Delta/r < 1.25 \cdot 10^{-2}$ .

Вращение внутреннего цилиндра вносит дополнительную асимметрию в движение двухфазного потока. В той части гидравлического контура, где происходит совпадение направления вектора линейной скорости вращения внутреннего цилиндра и направления вектора скорости ядра потока, наблюдается усилившаяся неравномерность пленочного покрытия криволинейного канала.

При этом при увеличении  $\omega$  толщина пленки  $\langle \delta \rangle$  на неподвижной поверхности возрастает, а на вращающейся – уменьшается по сравнению с толщинами пленок



Фиг. 3



Фиг. 4

для случая неподвижного цилиндра. На фиг. 4, а, б представлена зависимость  $h=f(\omega)$  для случая, когда вектор линейной скорости вращения внутреннего цилиндра совпадает с вектором скорости ядра потока или противоположен ему соответственно. Здесь  $\Delta=0.25$  мм,  $r_1=30$  мм,  $w_0'=0.024$  м/сек, а точки 1–3 соответствуют значениям  $w_0''=18.6, 23.0$  и  $32.0$  м/сек. Перепад статического давления в этой части гидравлического контура повышается при увеличении  $\omega$  и определяется как сумма потерь давления в случае неподвижного цилиндра  $\Delta p_0$  и потерь давления  $\Delta p_\omega$ , обусловленных его вращением.

Для определения  $\Delta p_\omega$  использована зависимость

$$(4) \quad \Delta p_\omega = \xi_\omega \rho'' \left( \frac{\omega r_1}{2} \right)^2 \frac{l}{4\Delta}, \quad \xi_\omega = 73 Ta^{-1/2}, \quad 0 < Ta = \frac{\omega^2 r_1 \Delta^3}{\nu''^2} < 4.6 \cdot 10^5$$

Здесь  $\xi_\omega$  – коэффициент сопротивления, учитывающий вращение внутреннего цилиндра.

В результате имеем

$$\Delta p = \Delta p_0 + \Delta p_\omega = \frac{\rho'' l}{4\Delta} \left[ \xi_0 w_0''^2 + \xi_\omega \left( \frac{\omega r_1}{2} \right)^2 \right]$$

С противоположной стороны гидравлического контура, т. е. там, где рассматриваемые векторы скорости направлены в разные стороны, на поверхности вращающегося цилиндра пленка утолщается, появляются жидкостные перемычки и соответственно обнаруживается понижение потери статического давления (фиг. 4, б).

При  $w_0'' > 20$  м/сек жидкостных перемычек не появлялось.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Хозе А. Н.* Результаты изучения и применения организованного движения двухфазных потоков в трубах и каналах при создании эффективных теплообменных устройств. V Всесоюзная конференция по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов. Тез. докл. Секция 2. Л., 1974.
2. *Бейнусов А. Г., Хозе А. Н.* Измерение толщин жидкостной пленки на поверхности вращающегося цилиндра. Изв. вузов, Приборостроение, 1972, т. 15, № 8.
3. *Кутателадзе С. С., Сорокин Ю. Л.* О гидродинамической устойчивости некоторых газожидкостных систем. В сб. «Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред». М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
4. *Сорокин Ю. Л., Пушкина О. Л.* О режимах течения газожидкостных смесей. Тр. Центр. науч.-исслед. и проект.-констр. котлотурб. ин-та, 1964, вып. 47.
5. *Семенов П. А. и др.* Гидравлическое сопротивление при восходящем пленочном течении жидкости в плоской щели. В сб. «Массообменные процессы химической технологии». Л., 1972.
6. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. М., «Мир», 1972.
7. *Oya Takio.* Upward liquid flow in small tube into which air streams. (3 report, pipe friction, 1.) Bull. ISME, 1972, vol. 15, No. 90.
8. *Соо К. М., Сийрде Э. К.* О перепаде давления при восходящем течении жидкостной пленки в вертикальной трубе. Тр. Таллинск. политехн. ин-та, Сер. А., 1971, № 303.

УДК 532.529.6

### ОТРАЖЕНИЕ ПЛОСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН ОТ ТВЕРДОЙ СТЕНКИ В СИСТЕМЕ ПУЗЫРЬКИ ГАЗА — ЖИДКОСТЬ

Б. Е. ГЕЛЬФАНД, С. А. ГУБИН, Е. И. ТИМОФЕЕВ

(Москва)

В работе [1] впервые высказано предположение о неакустическом отражении ударных волн на границах раздела в системе пузырьки газа — жидкость. Наибольшее увеличение давления за фронтом отраженной волны ожидается по [1] при падении плоской волны на жесткую стенку. Явное количественное подтверждение неакустического отражения волн в системе пузырьки газа — жидкость получено в [2, 3], где выполнены измерения параметров отраженных волн при прохождении возмущений давления через границу раздела.

В [1] не рассматривался вопрос о влиянии начального давления  $P_0$  на отражение от жесткой стенки, хотя ряд рассматриваемых примеров касался явления отражения на границе раздела, находящейся на глубине  $\sim 20$  м, где гидростатическое давление достигало  $p=2$  бар. Представленные в [1] расчеты показывают близкое сходство давлений в отраженной волне в двухфазной среде как в изотермическом, так и в адиабатическом случаях. Отражение слабых квазиакустических волн давления изучалось экспериментально в [4] и теоретически в [5]. В [4] двухфазная среда рассматривалась как изотермическая. В [4, 5] изменения параметров отраженной волны при различных величинах начального давления, объемного содержания газа в жидкости и интенсивности волны не анализировались.

С целью дополнения известных данных о процессе отражения и уточнения существующих зависимостей приведены описанные ниже экспериментальные исследования.

1. **Основные результаты опытов.** Приведены прямые опытные данные, демонстрирующие зависимость давления за фронтом отраженной волны от концентрации газа в жидкости, интенсивности падающей ударной волны и от начального давления в среде. Все эксперименты проведены на установке, описанной в [3]. На фиг. 1, а показана регистрируемая изменения давления в падающей (обозначена цифрой 1 на пояснительном рисунке) и отраженной волнах (обозначена цифрой 2) для  $\beta=2.4\%$ ,  $\Delta p_1=12$  бар,  $p_0=1$  бар при размере пузырьков азота в воде  $d_0=3$  мм. Отношение  $\Delta p_2 \Delta p_1^{-1} \sim 5 \div 6$  по показаниям ближнего к торцу датчика согласуется с [1]. На фиг. 1, б показана регистрируемая для  $\beta=1\%$ ,  $\Delta p_1=11$  бар,  $d_0=3$  мм и