

Наконец, на фиг. 5 показаны типичные распределения энтальпии (сплошные линии 1—4) и проводимости (штриховые линии 5—8) поперек теплового слоя для различных значений x ($\mathcal{P} = 1$, $G = 10^{-2}$, $\Lambda = 0$, кривым 1, 5 соответствует $x = 13,5$; 2, 6 — $x = 24,7$; 3, 7 — $x = 61,7$; 4, 8 — $x = 87,7$). Толщина токового слоя составляет приблизительно половину толщины теплового слоя, несколько увеличиваясь с ростом x . Из графиков виден быстрый по сравнению с энтальпией рост проводимости на начальном участке и вытягивание ее профиля, характерные для слабоионизованной плазмы.

В заключение остановимся кратко на характере изменения электромагнитных величин. Осевое электрическое поле максимально в начале слоя и монотонно убывает с ростом x . Его спад скоррелирован с ростом проводимости и толщины теплового слоя условием постоянства тока (3.12). Средние величины магнитного и радиального электрического полей уменьшаются в соответствии с ростом толщины токового слоя. Средняя плотность обратного тока убывает с ростом x быстрее, чем увеличивается толщина токового слоя.

Авторы благодарят М. А. Власова, С. И. Выборнова и А. В. Жаринова за обсуждения.

Поступила 16 VII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Савочкин Ю. В. Тепловой пограничный слой на цилиндрическом столбе газа с распределенными источниками тепла. — ПМТФ, 1982, № 3.
2. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. М.: Наука, 1972.
3. Урюков Б. А. Продольно обдуваемая электрическая дуга в цилиндрическом канале. — Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, 1968, вып. 1, № 3.
4. Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975.
5. Шлихтин Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.

УДК 532.529.5

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕНИЯ НА СТЕНКЕ В ВОСХОДЯЩЕМ СНАРЯДНОМ ТЕЧЕНИИ

*О. Н. Кашинский, Б. К. Козьменко, С. С. Кутателадзе,
В. Е. Накоряков
(Новосибирск)*

Проведенные в последнее время подробные исследования локальных характеристик газожидкостного потока [1, 2] показали сильную зависимость распределения газосодержаний, скоростей жидкой и газовой фазы, интенсивности пульсаций скорости и т. д. от режима течения двухфазной смеси.

Наряду с осредненными по времени величинами для выяснения механизма течения представляет интерес измерение непосредственно поведения во времени гидродинамических характеристик в данной точке. Это особенно важно при изучении снарядного режима течения, структура которого в жидких перемычках и в газовых снарядах существенно различается. Использование для расчета снарядного режима простых моделей, не учитывающих реальной структуры потока, является весьма грубым приближением и не может обеспечить во всех случаях приемлемой точности определения характеристик течения.

В [3] проведено исследование напряжения трения на стенке и газосодержания в восходящем потоке в различных режимах течения. В задачу данной работы входило одновременное измерение мгновенных значений напряжения трения на стенке и скорости жидкости на оси при восходящем снарядном течении газожидкостного потока в вертикальной трубе. Эксперименты проводились на установке, описанной в [4].

Рабочим участком служила вертикальная труба внутренним диаметром 15 мм, длиной 4,5 м. Измерения проводились с помощью электрохимического метода [2, 3]. В качестве жидкости использовался электролит, содержащий раствор 0,005 N ферри- и ферроцианида

калия и 0,5 N едкого натра в дистиллированной воде. Двухфазное течение создавалось путем ввода в поток жидкости воздуха через смеситель на входе рабочего участка.

Как показано в [2], наибольшие отклонения экспериментальных значений напряжений трения на стенке от рассчитанных по известным зависимостям наблюдаются при малых приведенных скоростях жидкости.

Поэтому в данной работе измерения проведены при значениях приведенной скорости жидкости W'_0 от 0,12 до 1,2 м/с. Предварительные измерения показали, что в момент прохождения газового снаряда происходит значительное падение напряжения трения на стенке. Кроме того, как показано в [2], снарядный режим течения при малых W'_0 характеризуется высокими значениями относительной интенсивности пульсаций касательного напряжения на стенке. Это делает естественным предположение о возможности существования в таких режимах в определенные моменты времени обратных течений вблизи стенки. Вследствие этого в работе применена специальная методика [5], позволившая определять величину и направление мгновенного значения напряжения трения на стенке.

Схема измерений приведена на фиг. 1. Для определения касательного напряжения на стенке использовался двойной датчик 1, изготовленный из двух платиновых пластинок сечением $0,02 \times 0,3$ мм², заделанных заподлицо со стенкой трубы. Расстояние между электродами двойного датчика около 0,03 мм. Токи электродов датчика усиливаются усилителями постоянного тока 3 и 4, затем подаются на схему первичной обработки сигнала 5. Принцип работы системы следующий. При подаче напряжения на оба электрода двойного датчика электрод, расположенный ниже по потоку, находится в диффузионном следе первого электрода, в результате значение тока второго электрода меньше, чем первого, хотя они и находятся в идентичных гидродинамических условиях. При перемене направления потока меньшее значение тока соответствует первому электроду. Схема первичной обработки 5 производит сравнение сигналов усилителей 3 и 4 и выдает на выход тот сигнал, значение которого больше, при этом выходное напряжение усилителя 3 инвертируется. В качестве датчика скорости 2 использовался датчик типа «лобовая точка» [2] с диаметром 0,04 мм. Ток датчика скорости усиливался с помощью усилителя 6. Затем сигналы схемы 5 и усилителя 6 записывались на магнитофон 7. При воспроизведении сигнала проводилась его цифровая обработка на электронно-вычислительной машине 8 типа М-6000. Вычислялись следующие характеристики течения: локальное газосодержание на оси φ_1 ; коэффициент обратного течения f_b ; среднее касательное напряжение на стенке τ_w ; средние интенсивности положительной и отрицательной составляющих касательного напряжения на стенке τ_+ , τ_- ; средняя скорость жидкости на оси трубы u_1 .

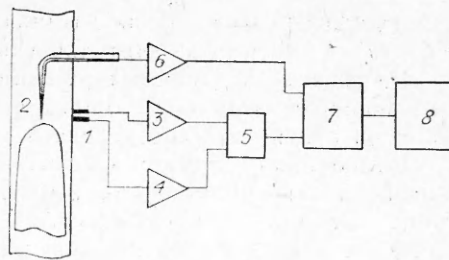
Указанные характеристики определялись в виде

$$\varphi_1 = \frac{1}{T} \sum_i T_i, \quad f_b = T_-/T,$$

$$\tau_+ = \frac{1}{T_+} \int_{T_+} \tau(t) dt, \quad \tau_- = \frac{1}{T_-} \int_{T_-} \tau(t) dt,$$

$$\tau_w = \frac{1}{T} \int_T \tau(t) dt, \quad u_1 = \frac{1}{T(1-\varphi_1)} \int_T u(t) dt,$$

где $\tau(t)$, $u(t)$ — мгновенные значения касательного напряжения на стенке и скорости на оси в момент времени t ; T — время измерения; T_+ , T_- — вре-



Ф и г. 1

мена существования вблизи датчика трения прямого и обратного течения ($T_+ + T_- = T$); T_i — длительность i -го пузыря.

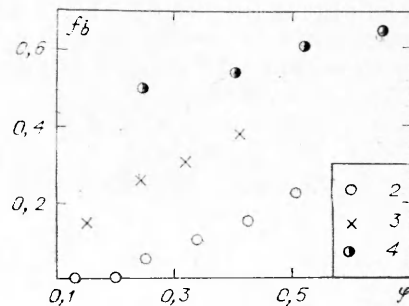
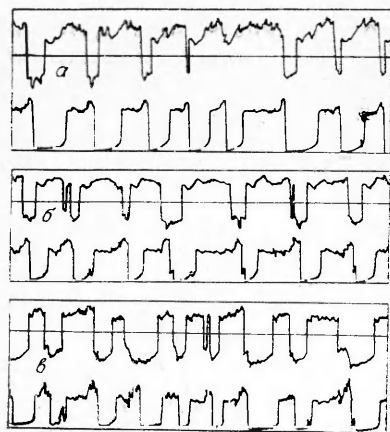
Во всех исследованных режимах проводилось фотографирование потока непосредственно за измерительным сечением. По фотографиям определялась средняя длина газового снаряда l .

Калибровка датчиков касательного напряжения на стенке и скорости производилась при однофазном течении в трубе, при этом датчик скорости располагался на оси. Для датчика касательного напряжения на стенке определялись две калибровочные зависимости соответственно для первого и второго электродов при независимой работе. В процессе измерения одновременно подключались оба электрода, однако, как указывалось выше, показание снималось всегда с того электрода, который был первым по потоку, т. е. экранирующее влияние другого электрода было исключено.

Для определения истинного газосодержания φ проводилось измерение профилей локального газосодержания с помощью описанного выше датчика скорости. Полученные значения локального газосодержания интегрировались по сечению трубы.

Примеры одновременных записей на шлейфовом осциллографе токов датчиков трения и скорости приведены на фиг. 2 ($a - W'_0 = 0,6$ м/с, $\varphi = 0,36$; $b - W'_0 = 0,3$ м/с, $\varphi = 0,24$; $c - W'_0 = 0,12$ м/с, $\varphi = 0,25$). Для каждого режима верхняя осциллограмма соответствует сигналу датчика трения, нижняя — датчика скорости. Когда сигнал датчика трения выше нулевой линии, мгновенное значение трения на стенке положительно, что соответствует движению жидкости вблизи стенки вверх. Расположенные ниже нулевой линии отрезки сигнала датчика трения соответствуют моментам обратного течения (жидкость вблизи стенки движется вниз). Сигнал датчика скорости имеет провалы вниз, соответствующие моментам нахождения датчика в газе. Ось времени направлена справа налево. Деления на нижней нулевой линии соответствуют отрезкам времени 0,2 с. Масштабы сигналов по вертикальной оси выбраны произвольно.

В моменты нахождения газовых снарядов, как правило, напряжение трения на стенке меняет знак. Длительность обратных течений и интенсивность сигнала датчика трения сильно зависят от приведенной скорости жидкости. Если при $W'_0 = 0,6$ м/с обратные течения имеют место лишь при прохождении самых длинных снарядов, то при $W'_0 = 0,3$ и $0,12$ м/с каждый снаряд сопровождается появлением обратных течений. В то же время при $W'_0 = 1,2$ м/с до $\varphi = 0,33$ обратные течения практически отсутствуют. Как видно из осциллограмм, перемена направления течения происходит через некоторое время после прохождения переднего фронта снаряда, причем это время уменьшается с уменьшением приведенной скорости жидкости. Обратный переброс течения происходит на некотором расстоянии за задним фронтом снаряда.



Ф и г . 3

Ф и г . 2

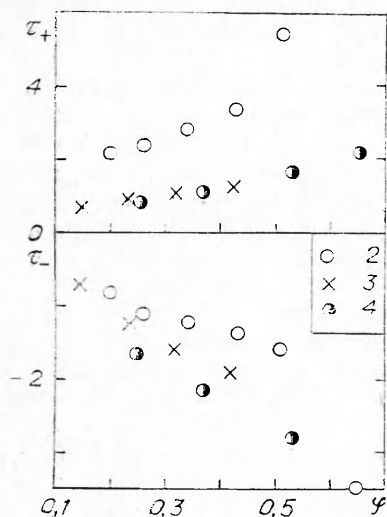
При $W'_0 = 0,3$ и $0,6$ м/с интенсивности сигналов прямого и обратного течений примерно одинаковы, в то же время при $W'_0 = 0,12$ м/с имеет место явное преобладание интенсивности обратных течений.

На фиг. 3 приведен коэффициент обратного течения f_b , определенный выше, в зависимости от истинного газосодержания. С ростом газосодержания происходит естественное увеличение f_b , поскольку возрастает длина снарядов. Величина f_b очень сильно зависит от \bar{W}'_0 , уменьшаясь с увеличением последней. Обозначения на фиг. 3—5: 1 — $W'_0 = 1,2$ м/с; 2 — $W'_0 = 0,6$ м/с; 3 — $W'_0 = 0,3$ м/с; 4 — $W'_0 = 0,12$ м/с.

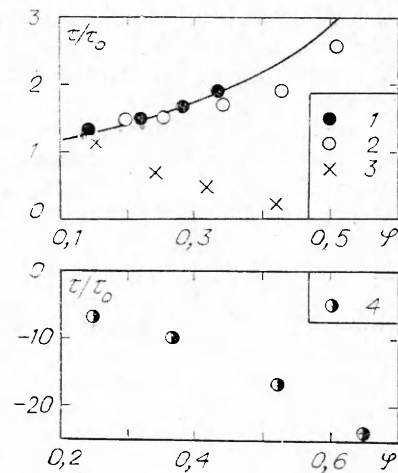
Интенсивности прямой и обратной составляющих напряжения трения на стенке приведены на фиг. 4. С увеличением φ происходит возрастание абсолютных значений τ_+ и τ_- . Наблюдается также сильная зависимость этих величин от приведенной скорости жидкости: если τ_+ растет с ростом W'_0 , то τ_- уменьшается (по абсолютной величине).

На фиг. 5 приведены результаты измерения среднего по времени значения напряжения трения на стенке τ_w в стандартных координатах τ_w/τ_0 (τ_0 — напряжение трения на стенке в однофазном потоке при том же значении W'_0) от φ . Здесь же нанесена зависимость работы [6] $\tau_w/\tau_0 = (1 - \varphi)^{-1,53}$. Имеет место удовлетворительное совпадение результатов измерений с этой зависимостью только при $W'_0 = 1,2$ м/с, при меньших значениях приведенной скорости жидкости экспериментальные точки располагаются ниже. Если при $W'_0 = 0,6$ м/с качественно зависимость $\tau_w(\varphi)$ имеет такой же вид, то при меньших значениях W'_0 имеет место падение τ_w с ростом φ . Следует отметить, что аналогичная тенденция в поведении $\tau_w(\varphi)$ при малых W'_0 наблюдается в [7], там же качественно показано наличие обратных течений при малых значениях скорости жидкости в двухфазном потоке в вертикальной трубе. Отметим, что при $W'_0 = 0,12$ м/с напряжение трения на стенке во всех режимах имеет отрицательное значение и большую абсолютную величину по сравнению с τ_0 .

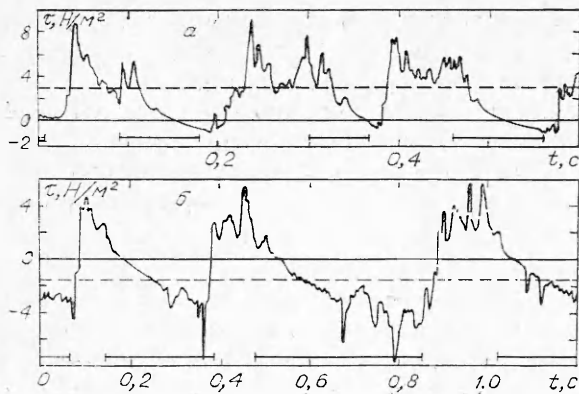
Проведем качественное сопоставление приведенных выше результатов с картиной течения при движении газового снаряда, поднимающегося в вертикальной трубе [8]. В системе координат, связанной с передней частью пузыря, происходит стационарное течение жидкости, образующей кольцевую пленку на внутренней поверхности трубы. Если в первом приближении пренебречь силами трения на стенке и на границе раздела жидкость — газ, происходит течение жидкости только под действием силы тяжести. Обратное течение возникнет, когда скорость свободного падения



Фиг. 4



Фиг. 5



Ф и г. 6

нения, поскольку до этой точки сила, действующая со стороны стенки на пленку жидкости, направлена вниз.

При $W_0' = 0,12$ м/с снаряды имеют большую длину, напряжение трения на стенке быстро меняет знак и далее стекающая по стенке трубы пленка должна стабилизироваться по толщине и скорости под действием силы трения на стенке. Тенденция к стабилизации значения τ_w видна на фиг. 2, в.

Приведенные на фиг. 2 осциллограммы лишь качественно дают представление о поведении $\tau(t)$ вследствие сильно нелинейной зависимости тока датчика от напряжения трения. На фиг. 6 приведены примеры восстановленных с помощью тарировочных зависимостей записей τ от времени для режимов: а — $W_0' = 0,6$ м/с, $\varphi = 0,34$; б — $W_0' = 0,12$ м/с, $\varphi = 0,65$ (τ , Н/м²; t , с). Ось времени направлена слева направо. Штриховыми линиями обозначены средние значения τ_w в этих экспериментах. Отрезками сплошных линий показаны моменты прохождения в данном сечении газовых снарядов. После прохождения головной части снаряда происходит монотонное падение напряжения трения на стенке, которое может сопровождаться изменением знака τ . Это падение является достаточно плавным, что соответствует изменению скорости движения пленки жидкости под действием силы тяжести, и продолжается до прохождения хвостовой части снаряда. Затем следует очень резкое возрастание трения с соответственным изменением на положительное. Даже после прохождения снаряда в течение некоторого промежутка времени может существовать обратное направление течения вблизи стенки. В то же время сразу за снарядом имеется заметное возрастание скорости жидкости, как видно из фиг. 2. Это, по всей видимости, связано с наличием за снарядом вихря тороидальной формы, который, как правило, содержит захваченные пузырьки газа.

Интересной особенностью течения в моменты времени перед прохождением хвостовой части снаряда являются достаточно большие отрицательные выбросы τ . Эти выбросы существуют только в области отрицательных значений τ и свидетельствуют о неустойчивости течения в пленке вблизи хвоста снаряда, причина этой неустойчивости пока остается неясной.

Сложная структура газожидкостного потока в снарядном режиме требует при создании более совершенных методов расчета течений раздельного анализа течения в жидкой перемычке и в моменты прохождения газовых снарядов, так как последние, как показано выше, могут вносить существенный вклад в средние значения коэффициентов трения на стенке.

пленки жидкости станет больше скорости движения системы координат (или скорости снаряда). При скорости снаряда 1 м/с (что примерно соответствует режиму фиг. 2, б) получаем длину участка ускорения 0,05 м; на таком расстоянии от начала снаряда напряжение трения на стенке сменит знак. Учет напряжения трения на стенке может только уменьшить приведенную оценку расстояния до точки переброса тече-

Поступила 30 IX 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I. Turbulence structure of air-water bubbly flow.— Int. J. Multiphase Flow, 1975, vol. 2, p. 235.
2. Nakorvakov V. E. et al. Local characteristics of upward gas-liquid flows.— Int. J. Multiphase Flow, 1981, vol. 7, p. 63.
3. Исследование турбулентных течений двухфазных сред/Под ред. С. С. Кутателадзе. Новосибирск: изд. ИТФ СО АН СССР, 1973.
4. Бурдуков А. П., Валукина Н. В., Накоряков В. Е. Особенности течения газожидкостной пузырьковой смеси при малых числах Рейнольдса.— ПМТФ, 1975, № 4.
5. Кашинский О. Н., Малков В. А., Мухин В. А. Исследование начальной стадии отрыва пограничного слоя электродиффузионным методом.— Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук, 1976, № 8, вып. 2.
6. Арманд А. А. Сопротивление при движении двухфазной системы по горизонтальным трубам.— Изв. ВТИ, 1946, № 1.
7. Cognet G., Lebouche M., Souhar M. Utilisation des techniques electrochimiques pour la mesure de frottement parietal dans les ecoulements diphasiques.— Houille blanche, 1978, N 5.
8. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.

УДК 517.946

МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕНОСА, ОПИСЫВАЕМЫХ КВАЗИЛИНЕЙНЫМ ПАРАБОЛИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЕМ

*К. А. Волосов, К. Б. Павлов, А. С. Романов,
И. А. Федотов*

(Москва)

1. В настоящее время широко обсуждаются решения квазилинейного параболического уравнения вида

$$(1.1) \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left| \frac{\partial u}{\partial x} \right|^{n-1} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \gamma u^m \equiv Lu, \quad k, \gamma > 0, m \geq 0, kn > 1,$$

применяемого для описания различных нелинейных процессов переноса. Зависимость коэффициентов переноса и поглощения от переносимой величины u и ее градиента $\partial u/\partial x$ аппроксимируется здесь степенной функцией. В частности, при $n = 1$, $k \neq 1$ уравнение (1.1) совпадает с уравнением нелинейной теплопроводности, рассмотренным в [1]; при $k = 1$, $n \neq 1$ оно является уравнением переноса импульса в неньютоновской нелинейно вязкой жидкости [2], случай $k = 2$, $m = 0$ соответствует движению указанной электропроводной жидкости в ламинарном пограничном слое в поперечном магнитном поле [3]. В общем случае произвольных значений n , k , m уравнение (1.1) известно как уравнение турбулентной фильтрации [1, 4] с нелинейным стоком.

Существенной особенностью процессов переноса, описываемых уравнением (1.1), является возможность существования фронтальной поверхности $S(x, t) = 0$, которая разделяет область с $u(x, t) = 0$ и область пространственной локализации переносимой величины $u(x, t) > 0$ (см., например, [1—4]). Вид функции $S = S(x, t)$ в случае задачи Коши для уравнения (1.1) исследовался в работе [5], где вслед за [6, 7] показана возможность метастабильных состояний решения. При таком состоянии функция $S(x, t)$ в течение конечного промежутка времени $t \in [0, T]$ зависит только от координаты x , $S(x, t) \equiv S(x)$.

Метастабильные состояния возможны, в частности, при переходе с одного стационарного решения на другое стационарное решение. В этой связи показана возможность существования метастабильных состояний краевой задачи для уравнения (1.1) и даны оценки времени метастабильного состояния, которые подтверждены прямыми численными расчетами.