

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Э. А., Харченко В. Н., Огородникова З. С. Течение газа с массообменом на поверхности. Обзор ОНТИ ЦАГИ, 1973, № 436.
2. Gomez A. V., Curry D. M., Johnston C. G. Radiative ablative and active cooling thermal protection studies for the leading edge of a fixed straight wing space shuttle. AIAA Paper N 71-445, 1971.
3. Scoville C. L., Gorsuch P. D. Thermal protection for the space shuttle. — «Raumfahrtforschung», 1971, Heft 2.
4. Дудин Г. Н., Нейланд В. Я. Закон поперечных сечений для трехмерного пограничного слоя на тонком крыле в гиперзвуковом потоке. — «Изв. АН СССР. МЖГ», 1976, № 2.
5. Хейз У. Д., Пробстин Р. Ф. Теория гиперзвуковых течений. М., ИЛ, 1962.
6. Дудин Г. Н. Взаимодействие гиперзвукового потока с пограничным слоем на тонком треугольном крыле. — «Труды ЦАГИ», 1978, вып. 1912.
7. Вазов В., Форсайт Дж. Разностные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. М., ИЛ, 1963.

УДК 532.529.5

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕНИЯ НА СТЕНКЕ В ВОСХОДЯЩЕМ ГАЗОЖИДКОСТНОМ ПОТОКЕ

А. П. Бурдуков, О. Н. Кашинский, В. П. Однорал

(Новосибирск)

Определение коэффициентов трения, тепло- и массопереноса в турбулентном двухфазном течении является весьма актуальной задачей как с чисто научной точки зрения, так и для многочисленных технических приложений. Основной трудностью при решении этой задачи является большое число параметров, влияющих на структуру двухфазного течения. Знание расходных скоростей жидкости и газа недостаточно для определения даже средних характеристик двухфазного течения. На структуру течения, а следовательно, на свойства турбулентного переноса влияют также распределение фаз по сечению канала, сжимаемость газовой фазы, гравитационные силы, детальная структура процессов на границе раздела газ — жидкость.

Традиционным подходом к проблеме изучения характеристик двухфазных течений является выделение определенных режимов течения [1, 2], к основным из которых в вертикальной трубе относятся пузырьковый, снарядный и дисперсно-кольцевой, с последующим расчетом по различным моделям, применимым, как правило, к одному из режимов. Данная схема дает удовлетворительные результаты только при выполнении двух условий: во-первых, если достаточно быстро устанавливается некоторая равновесная структура, во-вторых, если все течения в одном режиме подобны. Имеющийся в настоящее время экспериментальный материал свидетельствует о том, что эти условия выполняются далеко не всегда. Равновесная структура течения, не зависящая от входных условий, как показано в [3], устанавливается лишь на значительных расстояниях от входа и при больших скоростях жидкости (> 3 м/с). Проведенные в последнее время многочисленные измерения некоторых локальных характеристик [4—8] свидетельствуют о том, что качественно подобные распределения газосодержания имеют место лишь в снарядном режиме, тогда как в пузырьковом такое подобие отсутствует, и картина течения является значительно более сложной.

Для понимания механизма двухфазного потока необходимо проведение комплексных исследований, включающих измерение возможно большего числа характеристик течения, таких как локальные газосодержания, скорости жидкости и газа, касательные напряжения на стенке, пульсационные характеристики. К числу наиболее подробных работ такого рода относятся измерения [9, 10], причем первая работа носит в основном методический характер. В указанных работах не проводилось определения такой важной характеристики течения, как локальное напряжение трения на стенке; кроме того, диапазон скорости

жидкости менялся в очень узких пределах. В проведенных ранее исследованиях напряжения трения в двухфазных потоках [11—13] отсутствуют сведения о внутренней структуре течения.

В данной работе проводится детальное исследование характеристик восходящего двухфазного потока в трубе при малых скоростях течения (до 2 м/с). Напряжение трения на стенке измерялось электрохимическим методом, профили газосодержания — методом электропроводности.

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на фиг. 1. Двухфазное течение осуществлялось путем подачи в поток жидкости диспергированной газовой фазы. Циркуляция жидкости производилась центробежным насосом 1 с максимальным расходом 50 м³/ч и давлением 6 ати. Жидкость из насоса проходила через расходомерную диафрагму 2, соединенную с U-образным дифманометром 3, регулирующую задвижку 4 и поступала в рабочий участок 5. После рабочего участка газожидкостная смесь поступала в обратный канал 7, а затем в сепаратор 9. В сепараторе происходило разделение жидкости и газа, жидкость сливалась в заборный бак 10, из которого поступала обратно в насос. Газ с выхода сепаратора отводился в атмосферу. Для поддержания в измерительном сечении требуемого давления поток на выходе обратного канала дросселировался с помощью задвижки 8. Газовая система состояла из баллонов высокого давления 11, редукторов 12 и 15, фильтра 13 и расходомерной диафрагмы 14.

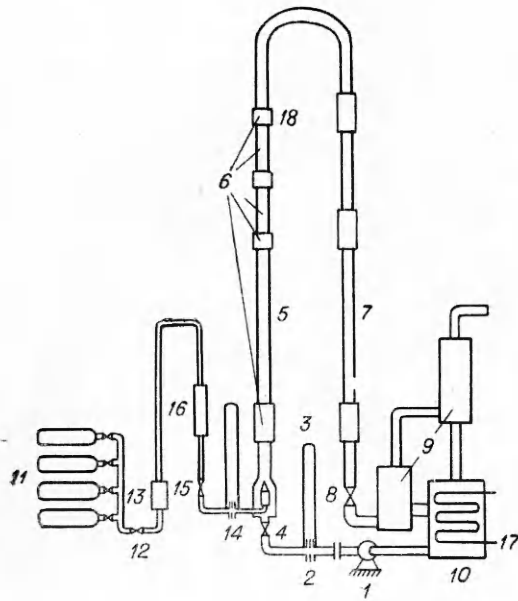
Рабочий участок представлял собой вертикальную трубу с внутренним диаметром 86,4 мм и длиной 6,5 м. Подача газа производилась через боковую поверхность пористой трубы диаметром 40 мм и длиной 80 мм, установленной на входе рабочего участка. Вследствие большого сопротивления пористой трубы использование ее для режимов с большим значением приведенной скорости газа было невозможно. В этом случае подача газа производилась через сопло с диаметром отверстия 20 мм, установленное на осп рабочего участка.

Рабочей жидкостью служил раствор 0,5N едкого натра и 0,01N ферри- и ферроцианида калия в дистиллированной воде. В качестве газа использовался азот. Температура жидкости и газа на входе поддерживалась постоянной ($24 \pm 0,5^\circ\text{C}$). Для термостатирования газа в газовой линии имелся электрический нагреватель 16 с регулируемой мощностью. Термостатирование жидкости осуществлялось с помощью теплообменника 17, помещенного в баке, через который прокачивалась охлаждающая вода (включение и выключение воды производилось автоматической схемой регулирования температуры).

Методика измерения напряжения трения на стенке, локального газосодержания и скорости жидкости описана в работе [14]. Все измерения проводились в сечении 18, отстоящем на расстоянии 4750 мм (55 калибров) от места подачи газа. Датчики трения имели размер $0,1 \times 1,5 \text{ мм}^2$ (для измерения средних величин) и $0,02 \times 0,3 \text{ мм}^2$ (для измерения пульсационных величин). Датчики локального газосодержания и скорости имели диаметр электрода 20 мкм, диаметр изоляции 40 мкм. Измерения с помощью электрохимического метода производились по схеме тарировка — измерение — повторная тарировка. Тарировка проводилась при течении в трубе чистой жидкости. Давление в измерительном сечении поддерживалось постоянным (0,5 ати).

Для визуального наблюдения картины течения в рабочем участке имелось несколько прозрачных вставок 6, изготовленных из оргстекла.

Измерения проводились при приведенных скоростях жидкости W'_0 от 0,44 до 2,05 м/с и расходных объемных газосодержаниях β от 0 до 80%. При этом в трубе имели место пузырьковый и снарядный режимы течения.



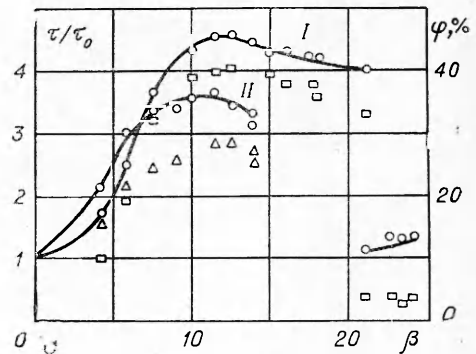
Фиг. 1

газосодержания и неизменной конструкции смесителя существовали два режима течения с сильно различающимися характеристиками. На фотографиях была четко видна различная структура течения. В одном из состояний (режим I) пузырьки были достаточно однородными по размеру и двигались преимущественно в вертикальном направлении. Другое состояние (режим II) характеризовалось большим разбросом размеров пузырьков, появлением в центре канала образований неправильной формы, представляющих начальную стадию возникновения снарядов. При этом пузырьки двигались значительно более беспорядочно, особенно при попадании в вихревую дорожку за крупными пузырями. При включении установки первоначально мог возникнуть тот или иной режим, который существовал некоторое время (от нескольких минут до 1—2 ч), затем происходила достаточно быстрая перестройка течения ко второму режиму, после чего могло произойти возвращение к первому режиму. Многочисленные повторения экспериментов показали, что процесс перехода между режимами является случайным.

На фиг. 2 приведены результаты измерения касательного напряжения на стенке в области неустойчивости течения при $W'_0 = 0,785$ м/с. Кружками обозначены значения τ/τ_0 , где τ_0 — напряжение трения на стенке при течении чистой жидкости со средней скоростью W'_0 .

Точки, лежащие на линиях I и II относятся к режимам I и II, описанным выше. Видно, что при малых значениях β (5—10%) происходит резкое возрастание касательного напряжения на стенке по сравнению с однофазным потоком, причем значения τ в двухфазном потоке, соответствующие режимам I и II при одном β , могут различаться между собой в 1,5 раза. При меньших скоростях жидкости это различие может быть еще больше. При $\beta = 21\%$ происходит срыв течения к развитому снарядному, сопровождающемуся резким падением τ .

Одновременно с измерением τ было проведено измерение локального газосодержания ϕ в точках с расстоянием от стенки $y = 0,5$ и 1 мм (фиг. 2, прямоугольники и треугольники соответственно). Выбор значений y обус-



Фиг. 2

ловлен тем, что зависимость $\varphi(y)$ имеет максимум вблизи этих точек соответственно в режимах I и II. Поведение φ при фиксированном значении y полностью аналогично поведению напряжения трения на стенке. При переходе к развитому снарядному режиму распределение локального газосодержания резко меняется, газ отходит от стенки в центральную часть трубы, что приводит к резкому падению φ вблизи стенки.

На фиг. 3—5 представлены результаты измерения величины τ/τ_0 при различных скоростях жидкости в более широком диапазоне газосодержаний, здесь же показаны данные работы [15] для трубы диаметром 15 мм и работы [16] для трубы диаметром 86,4 мм (1 — данные [15] для пузырькового режима; 2 — данные [15] для снарядного режима; 3 — данные [16]; 4 — результаты авторов). Сплошной линией обозначена зависимость работы [11]

$$(1) \quad \tau/\tau_0 = (1 - 0,833\beta)^{-1,53}.$$

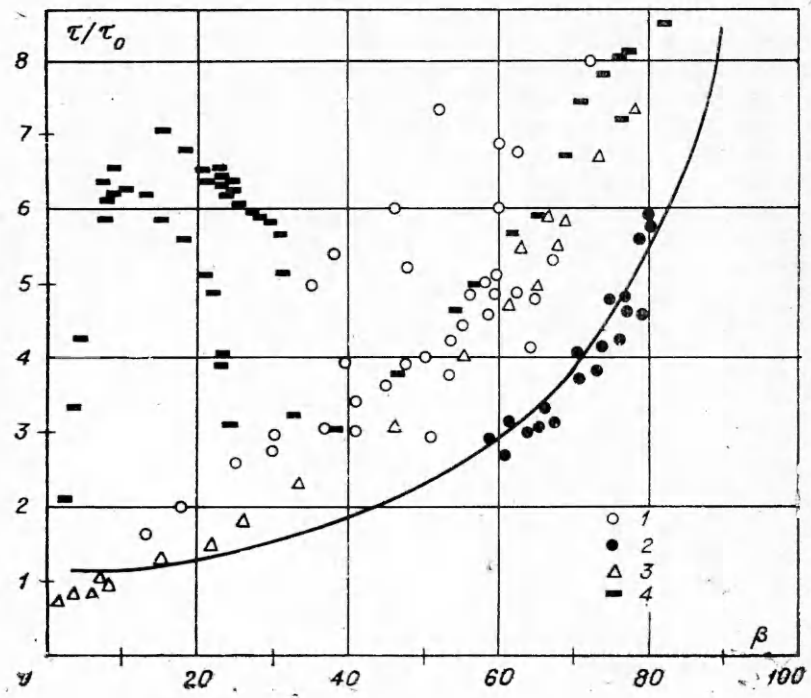
Эксперименты, результаты которых приведены на фиг. 3—5, проводились в работах [15, 16] и в работе авторов при близких значениях W'_0 (фиг. 3: [15] — $W'_0 = 0,51$ м/с, [16] — $W'_0 = 0,432$ м/с, эксперименты авторов — $W'_0 = 0,44$ м/с; фиг. 4: [15] — $W'_0 = 0,81$ м/с, эксперименты авторов — $W'_0 = 0,785$ м/с; фиг. 5: [15] — $W'_0 = 1,18$ м/с, [16] — $W'_0 = 0,956$ м/с, эксперименты авторов — $W'_0 = 1,06$ м/с). Точки 5 на фиг. 5 — данные авторов для $W'_0 = 2,05$ м/с.

Видно, что для скоростей жидкости $W'_0 \leq 1$ м/с поведение τ при малых β имеет такой же вид, как и на фиг. 2. При малых β происходит резкое возрастание τ до некоторого максимального для пузырькового режима значения τ_1 , причем τ_1 уменьшается с ростом W'_0 . Диапазон газосодержаний, при которых существует пузырьковый режим, становится более узким при увеличении W'_0 . Кроме того, зависимость $\tau(\beta)$ при малых значениях β является неоднозначной.

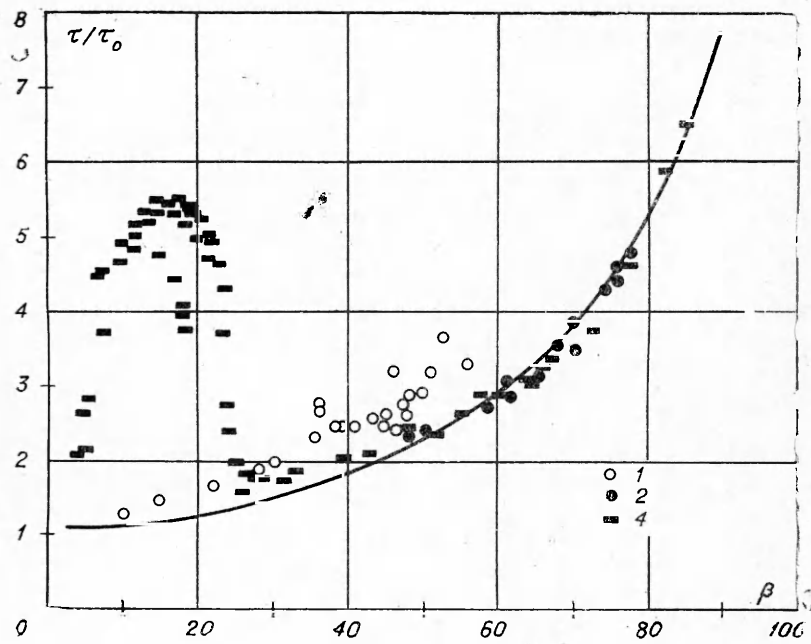
При $W'_0 = 2,05$ м/с характер изменения $\tau(\beta)$ существенно меняется. Отсутствует резкое возрастание τ при малых значениях β , дальнейший рост β сопровождается монотонным увеличением τ , причем экспериментальные точки хорошо согласуются с формулой (1). Неоднозначность $\tau(\beta)$ пропадает.

С переходом к развитому снарядному режиму происходит резкое уменьшение τ , при $W'_0 \geq 0,7$ м/с экспериментальные точки хорошо согласуются с (1). При $W'_0 = 0,44$ м/с, однако, значения τ , полученные в эксперименте, располагаются выше (1).

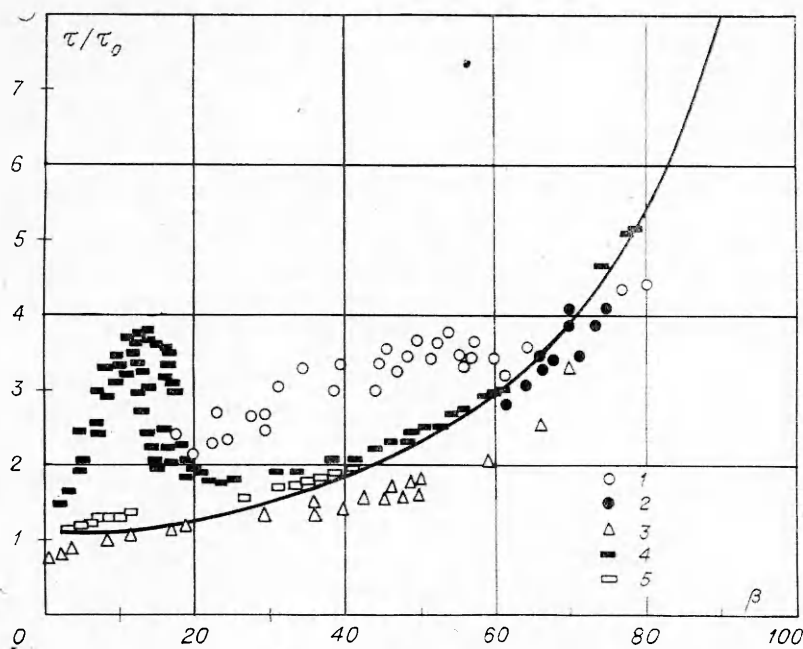
Данные работы [16], полученные в трубе такого же диаметра, удовлетворительно согласуются с данными авторов в развитом снарядном режиме. В пузырьковом же режиме такое совпадение данных отсутствует. Это связано с тем, что в [16] применен другой способ подачи газа — вдув через сопло диаметром 20 мм. При этом структура течения в пузырьковом режиме была качественно другой: газ выходил из сопла в виде больших пузырей и не происходила концентрация газа вблизи стенки. Таким образом, при $W'_0 < 1$ м/с течение существенно зависит от начальных условий. Для данных работы [15], полученных в трубе существенно меньшего диаметра, имеет место лишь качественное совпадение характера поведения $\tau(\beta)$ в пузырьковом режиме. Границы существования пузырькового режима и максимальные значения τ количественно сильно отличаются от результатов авторов. Измеренные профили локального газосодержания в различ-



Фиг. 3



Фиг. 4



Ф и г. 5

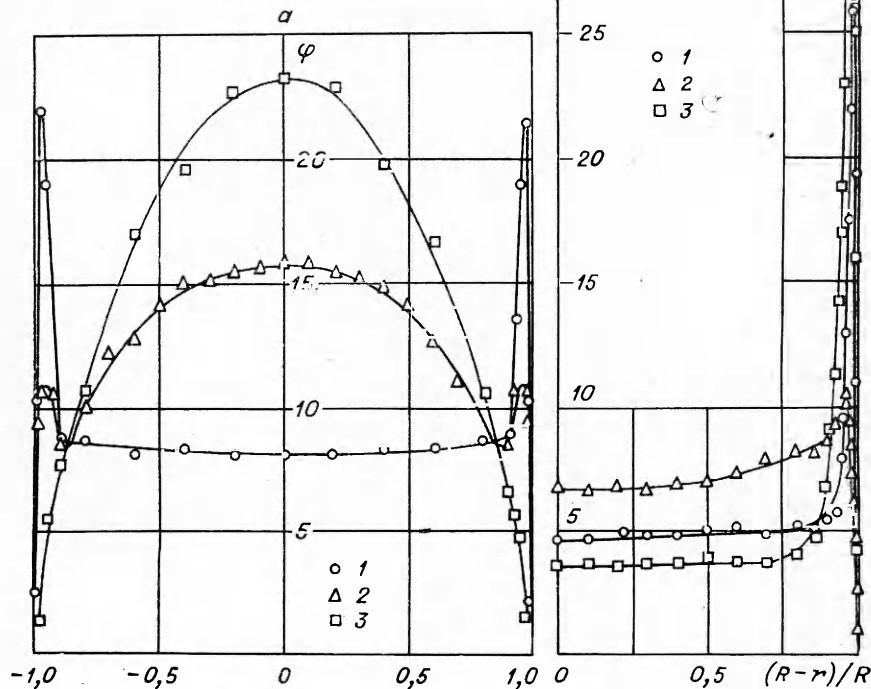
ных режимах приведены на фиг. 6. Данные на фиг. 6, а получены при одном значении приведенной скорости жидкости 0,57 м/с и различных расходных газосодержаниях: 1 — $\beta = 12,6\%$; 2 — $\beta = 16,4\%$; 3 — $\beta = 19,6\%$. Профили φ при разных β имеют существенно различный вид. При малых β имеют место резкие максимумы локального газосодержания около стенок трубы. Такое распределение φ соответствует чисто пузырьковому режиму течения. В развитом снарядном режиме ($\beta = 19,6\%$) профиль газосодержания имеет параболический вид с одним максимумом в центре трубы. В переходном из пузырькового к снарядному режиму могут наблюдаться профили φ , являющиеся как бы комбинацией первых двух, с тремя максимумами (около стенок и в центре трубы). Следует отметить, что полученные профили газосодержания качественно полностью аналогичны приведенным в работах [9, 10].

Представленные на фиг. 6, б профили локального газосодержания измерены при близких значениях β , но различных приведенных скоростях жидкости: 1 — $W'_0 = 0,44$ м/с, $\beta = 7,5\%$; 2 — $W'_0 = 2,05$ м/с, $\beta = 8,6\%$; 3 — $W'_0 = 0,79$ м/с, $\beta = 7,6\%$. Профиль, соответствующий $W'_0 = 2,05$ м/с, существенно отличается от профилей при меньших значениях W'_0 : распределение газосодержания по сечению значительно более равномерное. Максимум газосодержания вблизи стенки сохраняется, однако выражен слабо. Для меньших скоростей жидкости ($W'_0 < 1$ м/с) значения φ вблизи стенки достигают 0,3—0,4, за счет чего значительно уменьшается φ в центральной части трубы. Интересно отметить, что высота максимума φ около стенки и величина газосодержания в центре трубы зависят от скорости немонотонно.

Сравнение профилей локального газосодержания с распределениями $\tau(\beta)$ показывает, что резкое возрастание τ в пузырьковом режиме при малых газосодержаниях обусловлено наличием резких максимумов газосодержания вблизи стенки трубы. Находящиеся в пристенном слое пузырьки

имеют в данном случае скорость подъема относительно жидкости, сравнимую с локальной скоростью жидкости в данной точке, и, по-видимому, сильно деформируют профиль скорости жидкости, увеличивая градиент скорости на стенке. Имеющее место при переходе от пузырькового к снарядному режиму падение τ при увеличении β связано с уменьшением максимумов φ вблизи стенок и отходом газа в центр трубы. Модель работы [11] оказывается применимой лишь в том случае, когда распределение концентрации газа по сечению трубы близко к равномерному. К сожалению, в работах других авторов не проводилось одновременное измерение напряжения трения на стенке и структуры течения, хотя эффекты возрастания трения при малых газосодержаниях [15, 17] и возникновение максимумов φ вблизи стенки в этом режиме [3, 10] хорошо известны.

Единственная попытка описания поведения $\tau(\beta)$ в пузырьковом режиме течения при малых скоростях жидкости предпринята в работе [18]. В расчетную методику, основанную на анализе расслоенного кольцевого течения, были искусственно введены соотношения, полученные в результате анализа экспериментальных данных работы [17]. Полученная в результате методика расчета удовлетворительно описывает опытные данные [17]. Однако при применении ее к результатам авторов имеет место очень большое расхождение расчетных и экспериментальных значений τ , это можно объяснить ограниченностью возможности распространения результатов работы [18] на трубы существенно большего диаметра.



Фиг. 6

Поступила 15 V 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С., Сорокин Ю. Л. О гидравлической устойчивости некоторых газожидкостных систем. — Сб. под ред. Кутателадзе С. С. Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред. ГЭИ, 1961.
2. Baker O. Simultaneous flow of oil and gas. — «Oil and Gas J.», 1954, vol. 53, p. 185.
3. Herringe R. A., Davis M. R. Structural development of gas-liquid mixture flows. — «J. Fluid Mech.», 1976, vol. 73, pt 1.
4. Neal L. C., Bankoff S. G. A high resolution resistivity probe for determination of local void properties in gas-liquid flow. — «AIChE J.», 1963, vol. 9, N 4.
5. Delhaye J. — M. Anémométrie à fil chaud dans les écoulements diphasiques. — «C. R. Acad. Sci.», 1968, vol. 266, N 6.
6. Ибрагимов М. Х., Бобков В. П., Тычинский Н. А. Исследование поведения газовой фазы в турбулентном потоке смеси воды и газа в каналах. — ТВТ, 1973, т. 11, № 5.
7. Hinata S. A study on the measurement of the local void fraction by the optical fibre glass probe. — «Bulletin of the JSME», 1972, vol. 15, N 88.
8. Газин И. В. Радиальное распределение пара в восходящем турбулентном пароводяном потоке. — «Теплоэнергетика», 1964, т. 11, № 1.
9. Galaup G. P. Contribution a l'étude des methodes de mesure en écoulement diphasique. These, l'Université scientifique et medicale de Grenoble, 1975.
10. Serizawa A., Kataoka I., Mishiyoshi I. Turbulence structure of air-water bubbly flow. — «Intern. J. Multiphase Flow», 1975, vol. 2, N 1.
11. Арманд А. А., Невструева Е. И. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе. — «Изв. ВТИ», 1950, № 2.
12. Lockhart R. W., Martinelli R. C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component, flow in pipes. — «J. Chem. Eng. Progr.», 1949, vol. 45, N 1.
13. Kopalinsky E. M., Bryant R. A. A. Friction coefficients for bubbly two-phase flow in horizontal pipes. — «AIChE J.», 1976, vol. 22, N 1.
14. Бурдуков А. П., Кашинский О. Н., Малков В. А., Однорал В. П. Диагностика основных турбулентных характеристик двухфазных потоков. — ПМТФ, 1979, № 4.
15. Исследование турбулентных течений двухфазных сред. Под ред. Кутателадзе С. С. Новосибирск, изд. Ин-та теплофизики СО АН СССР, 1973.
16. Татевосян Ю. В. Исследование вертикального двухфазного потока электрохимическим методом. Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Новосибирск, Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1971.
17. Inoue A., Aoki S. Fundamental studies on pressure drop in an air-water two-phase flow in vertical pipes. — «Bulletin of the JSME», 1971, vol. 14, N 70.
18. Ueda T. On upward flow of gas-liquid mixtures in vertical tubes. — «Bulletin of the JSME», 1967, vol. 10, N 42.

УДК 534.833.53

**ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ СКОРОСТИ РОСТА
МИКРОПУЗЫРЬКОВ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ***В. Г. Гавриленко, А. И. Мартьянов**(Горький)*

Как известно из теоретических и экспериментальных исследований [1—3], функция распределения газовых пузырьков по размерам может претерпевать значительные изменения как в спокойной воде, так и в турбулентном потоке. Причем эти изменения часто не связаны с рождением или захлопыванием пузырьков, как это происходит в областях течения с кавитационным режимом, а вызваны относительно медленными процессами растворения или роста газовых ядер. Строгое теоретическое рассмотрение процессов роста пузырьков, особенно в турбулентном потоке, наталкивается на целый ряд трудностей, вызванных неопределенностью некоторых важных физических параметров (количество и состав растворенного газа в жидкости, окружающей пузырек, соотношение между размерами пузырька и внутреннего масштаба турбулентности, чистоты жидкости и др.). Экспериментальное определение скорости роста пузырька также встре-