

при учете температурной зависимости вязкости все эти три эффекта дают аддитивный вклад в U . Относительный вклад каждого определяется параметрами U_T/U_η , U_d/U_η . Для первого из них, согласно (3.8), (3.9),

$$U_T/U_\eta \sim \left(\frac{\omega_\alpha}{\gamma_\alpha} \right)^2 \frac{\text{Pr}}{b} \frac{d \ln \alpha}{d \ln \eta},$$

где ω_α , γ_α — частота и затухание капиллярной волны с $k \sim h^{-1}$. Отсюда видно, что это отношение за счет множителя $(\omega_\alpha/\gamma_\alpha)^2 \text{Pr}$ может быть больше единицы. Например, для воды с $h = 1$ см $U_T/U_\eta \sim 10^4/b$, т. е. оба эти эффекта сравниваются при неизотермичности $b \sim 10^4$. Следует подчеркнуть, что термокапиллярный эффект, характеризующийся параметром B , влияет на конвективную неустойчивость. В очень узких слоях $h \ll h_c = (\sigma/\rho g \beta)^{1/2}$ эта неустойчивость перестраивается и переходит в термокапиллярную [9]. Поэтому наше рассмотрение справедливо при $h \gg h_c$.

Что касается эффектов деформации, то они существенны при $\Delta \ln \rho/d \ln \eta \sim 1$. Однако практически для всех жидкостей этот параметр мал $\sim 10^{-1}$, 10^{-2} . Он становится порядка единицы в окрестности точки инверсии T_c , где $\partial \eta / \partial T = 0$. Например, для серы $T_c = 153^\circ \text{C}$.

Поступила 25 I 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Palm E. On the tendency towards hexagonal cells in steady convection.— J. Fluid Mech., 1960, vol. 8, N 2.
2. Busse F. H. The stability of finite amplitude cellular convection and its relation to an extremum principle.— J. Fluid Mech., 1967, vol. 30, N 4.
3. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М., Наука, 1972.
4. Berge P., Dubois M. Convective velocity field in the Rayleigh — Benard instability: experimental results.— Phys. Rev. Lett., 1974, vol. 32, p. 1041.
5. Ландау Л. Д. Собрание трудов. Т. 1. М., Наука, 1969.
6. Scanlon J. W., Segel L. A. Finite amplitude cellular convection induced by surface tension.— J. Fluid Mech., 1967, vol. 30, N 1.
7. Кузнецов Е. А., Спектор М. Д. О существовании гексагонального рельефа на поверхности жидкого диэлектрика во внешнем электрическом поле.— ЖЭТФ, 1976, т. 71, № 1.
8. Pearson J. K. A. On convective cells induced by surface tension.— J. Fluid Mech., 1958, vol. 4, N 5.
9. Горьков Л. П. Стационарная конвекция в плоском слое жидкости вблизи критического режима теплопередачи.— ЖЭТФ, 1957, т. 33, № 2.
10. Newell A. C., Whitehead J. A. Finite bandwidth, finite amplitude convection.— J. Fluid Mech., 1969, vol. 38, N 2.

УДК 536.25

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА

В. А. Беляков, П. М. Брдлик, Ю. П. Семенов

(Москва)

Теплообмен при смешанной конвекции около горизонтального цилиндра играет существенную роль в ряде технологических процессов. Кроме того, цилиндр является удобной моделью для фундаментального исследования процесса. К настоящему времени опубликовано несколько работ по этой задаче. Выполнены численные решения уравнений пограничного слоя, записанных в приближении Буссинеска, для области цилиндра, где возможно применение

теории пограничного слоя [1—3]. Наиболее полно численное исследование выполнено в работе [1], где наряду с результатами по теплообмену и трению получены данные о влиянии гравитационных сил на отрыв пограничного слоя. Во всех работах распределение скорости на внешней границе пограничного слоя принимается либо по экспериментальным данным для чисто вынужденного движения, либо как для обтекания идеальной жидкостью, поскольку данных для смешанной конвекции нет. В экспериментальных работах [4—7] в основном рассматривается средняя теплоотдача при постоянной температуре стенки или при постоянном тепловом потоке. Лишь в работе [7] исследуется локальный теплообмен горизонтального цилиндра с постоянным тепловым потоком при поперечном обтекании. Данные о гидродинамической обстановке по всему периметру цилиндра в условиях смешанной конвекции отсутствуют.

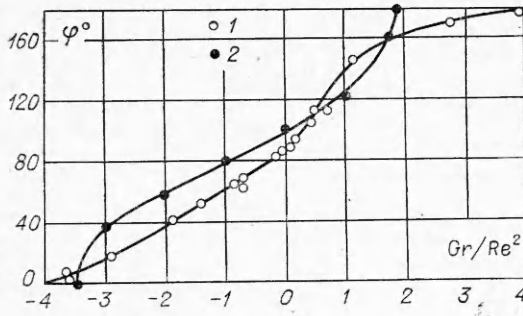
В настоящей работе проведено экспериментальное исследование обтекания горизонтального изотермического цилиндра вертикальным потоком воздуха при совпадающем и несовпадающем направлении вынужденного движения и гравитационных сил. Исследовано влияние естественной конвекции на положение точки отрыва пограничного слоя. Измерено распределение скорости и температуры. Определены локальные и средние тепловые потоки. Измерения проведены при $Gr \approx 10^5$, $Re = 40-4000$, $Gr/Re^2 = 0,01-20$.

Исследования проводились в рабочей камере вертикальной малоскоростной аэродинамической трубы, которая могла работать по замкнутой и разомкнутой схемам. Скорость потока варьировалась в пределах 0—1 м/с, температура потока изменялась от 20 до 50°C. Степень турбулентности потока в рабочей камере не превышала 0,3%. В качестве рабочего тела использовался цилиндр, выполненный из медной трубы диаметром 60 мм и длиной 200 мм. Степень загромождения потока цилиндром составляла 0,12. Как известно, такой уровень турбулентности и загромождения потока не оказывает влияния на теплоотдачу при ламинарном обтекании цилиндра. Цилиндр охлаждался или нагревался в зависимости от требуемого направления естественной конвекции.

Точка отрыва пограничного слоя определялась с помощью визуализации течения методом светового лазерного «ножа». В плоскости «ножа» в окрестностях верхней или нижней критической точки цилиндра подавалась тонкая струйка табачного дыма, которая двигалась по линии тока в пограничном слое. Место отрыва точно фиксировалось визуально и по фотографиям по резкому изменению направления движения струи дыма. Точность определения угловой координаты точки отрыва не хуже 2°. Измерение скорости выполнено лазерным анемометром типа 55L фирмы DISA. Измерение проводилось в дифференциальном доплеровском режиме с прямым отражением. Измерительный объем имел диаметр 0,235 мм. В качестве светорассеивающих частиц применялся древесный дым с размерами частиц 0,4—1 мкм. Положение измерительного объема определялось с помощью специального координатного устройства с погрешностью $\approx 0,05$ мм. Изменение положения центра измерительного объема за счет градиента температуры в пограничном слое при $\max \Delta t = 50^\circ\text{C}$ составляет $\pm 3\%$ от величины его диаметра.

Локальный коэффициент теплоотдачи определялся по профилю температуры, измеряемой микротермопарой диаметром 0,05 мм. Координата датчика температуры определялась с погрешностью $\approx 0,05$ мм в радиальном направлении и $\approx 0,5^\circ$ по окружности. Средний коэффициент теплоотдачи определялся интегрированием значений локального коэффициента теплоотдачи по окружности и методом теплового баланса. Подробное описание экспериментальной установки и методики проведения исследования приведено в работах [8, 9].

В результате визуальных наблюдений и измерения распределения скорости установлен характер движения воздуха в окрестностях цилиндра. Известно, что при чисто вынужденном обтекании цилиндра с докритическими числами Re происходит отрыв пограничного слоя при $\varphi \approx 86^\circ$



Фиг. 1

денной и естественной конвекций представлено на фиг. 1 (точки 1). Положительное значение параметра Gr/Re^2 соответствует совпадающему направлению вынужденного движения и гравитационных сил, отрицательное — их противоположному действию. При совпадающей смешанной конвекции увеличение параметра Gr/Re^2 приводит к смещению точки отрыва вниз по течению, а при $Gr/Re^2 \geq 2$ отрыва практически не происходит, т. е. пограничный слой сохраняется почти по всей окружности цилиндра. Исключение составляет окрестность кормовой точки цилиндра.

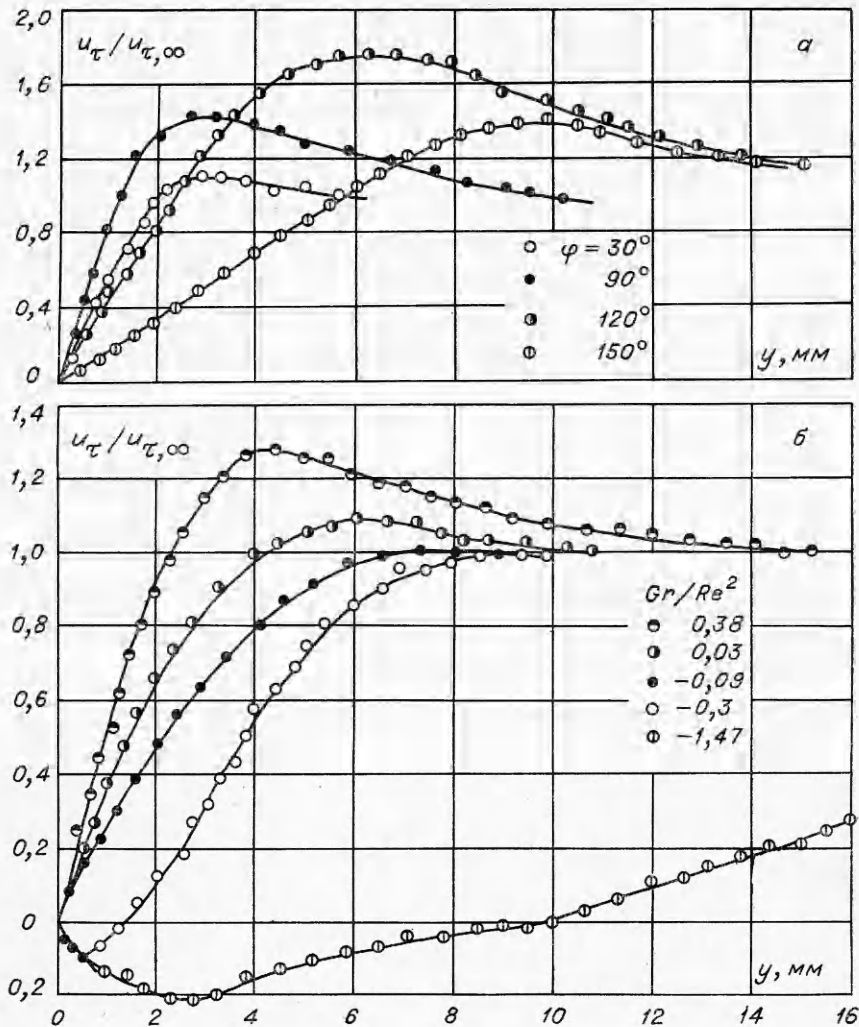
Для несовпадающей конвекции увеличение абсолютной величины Gr/Re^2 смещает точку отрыва ближе к лобовой точке вынужденного течения. Как показала визуализация течения, при $Gr/Re^2 > 0,1$ в нижней части цилиндра формируется встречное движение, область распространения которого увеличивается по мере смещения точки отрыва ближе к лобовой точке. Встречное движение, взаимодействуя с внешним потоком и стенкой, образует пограничный слой с переменным по толщине направлением скорости. Поскольку внешнее течение здесь образуется после отрыва пограничного слоя в верхней области цилиндра, скорость и температура во внешней части слоя пульсируют. Толщина слоя значительно больше, чем при чисто естественной конвекции. По мере увеличения Gr/Re^2 встречное, возникающее под действием свободной конвекции движение становится более устойчивым и при $Gr/Re^2 > 4$ распространяется по всей окружности цилиндра. Восходящая струя нагретого воздуха перемешивается с вынужденным потоком, создавая дополнительные температурные и динамические возмущения, которые приводят к повышению пульсации скорости и температуры во внешней области пограничного слоя.

На фиг. 1 (точки 2) приведены также результаты численного решения уравнений пограничного слоя [1]. Для решения задачи было принято распределение скорости внешнего потока, как для идеальной жидкости. Это явилось одной из причин расхождения расчета и эксперимента, хотя в области совпадающей конвекции оно не столь значительно.

Примеры распределения тангенциальной составляющей скорости в пограничном слое приведены на фиг. 2. Надо отметить, что эти результаты могли быть получены только с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости, позволяющего вести измерения локальной скорости до 0,01 м/с.

На фиг. 2,а представлены профили скорости для различных углов по окружности при $Gr/Re^2 = 1,28$. В этом случае влияние сил свободной и вынужденной конвекций имеет один порядок. Профили скорости имеют максимум, характерный для естественной конвекции. Максимальное значение скорости в этом случае достигается при $\varphi \approx 120^\circ$. Вплоть

с образованием вихревой области движения в кормовой зоне цилиндра. В области отрыва тепловой поток минимальный. При естественной конвекции с числами $Gr = 10^3 - 10^9$ пограничный слой сохраняется, по существу, по всей окружности и тепловой поток монотонно уменьшается в направлении движения. Изменение положения точки отрыва вследствие взаимодействия вынуж-

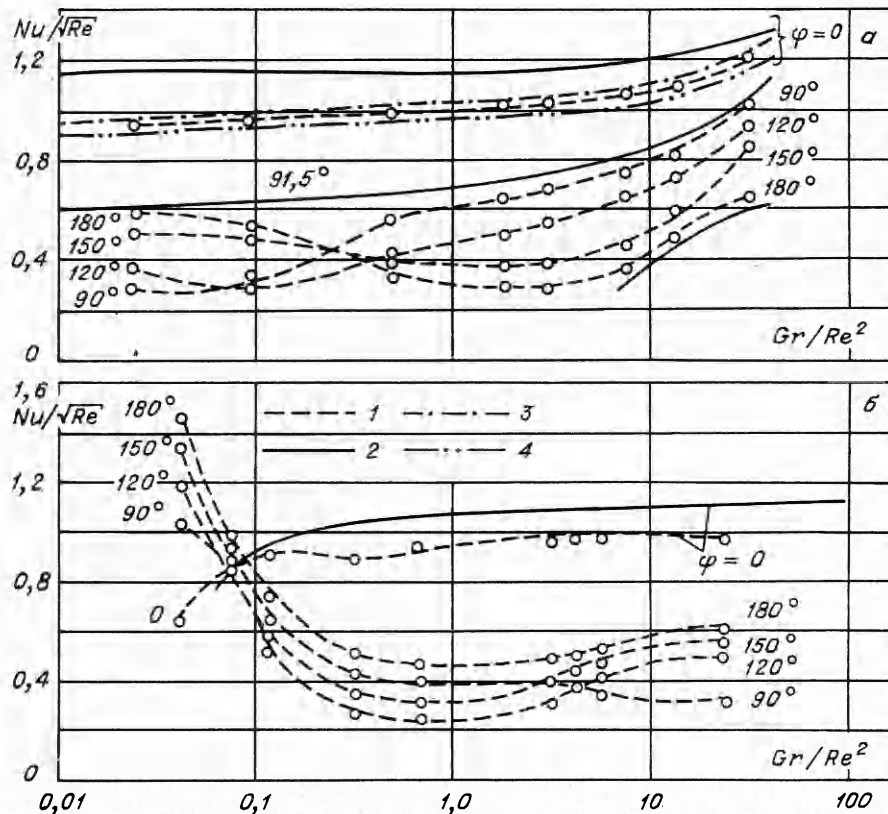


Фиг. 2

до $\varphi \leq 150^\circ$ отрыва пограничного слоя не наблюдается, что соответствует данным, приведенным на фиг. 1.

Профили скорости для различных значений параметра Gr/Re^2 и $\varphi = 90^\circ$ приведены на фиг. 2, б. Здесь рассматривается как совпадающая, так и несовпадающая смешанная конвекция. Для совпадающей конвекции при увеличении Gr/Re^2 профиль скорости становится более заполненным с образованием характерного максимума. При несовпадающей конвекции с увеличением Gr/Re^2 профили скорости деформируются в обратном направлении, приближаясь по форме к отрывным. При $Gr/Re^2 \approx 0,3$ появляется область с возвратным течением. Толщина пограничного слоя существенно возрастает.

Результаты определения локального коэффициента теплоотдачи показаны на фиг. 3 (линии 1). Характер изменения теплоотдачи по окружности полностью соответствует особенностям течения в пристенной области. Для совпадающей конвекции (фиг. 3, а) при $Gr/Re^2 \leq 0,02$ распределение коэффициента теплоотдачи соответствует вынужденному обтека-

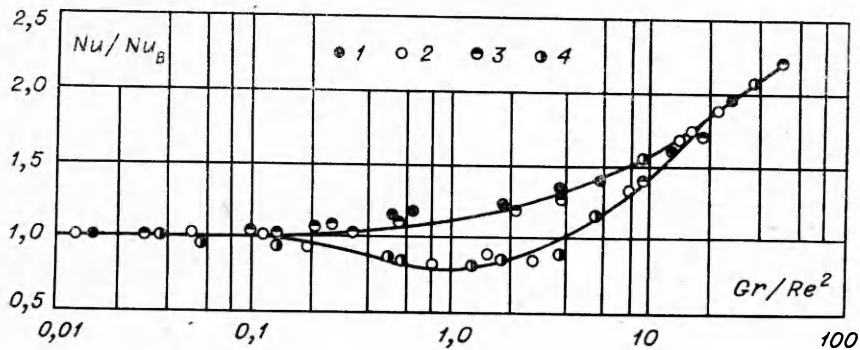


Ф и г. 3

нию с минимумом в области $\varphi \approx 90^\circ$. С увеличением Gr/Re^2 происходит перераспределение величины коэффициента теплоотдачи, связанное со смещением точки отрыва вниз по потоку. При $Gr/Re^2 \geq 2$ изменение теплоотдачи во всех точках с увеличением этого параметра происходит монотонно, приближаясь к значениям, характерным для естественной конвекции.

На фиг. 3 приведены также результаты численных решений уравнений пограничного слоя (линии 2—4), выполненных соответственно в [1—3]. Удовлетворительное совпадение с экспериментом лишь в окрестности лобовой точки при совпадающей конвекции дают решения [2, 3]. Результаты работы [1] большей частью с экспериментом существенно расходятся. Очевидно, решение задачи в приближении пограничного слоя для рассматриваемых условий не может дать корректного результата.

Совсем другой вид имеет изменение локальной теплоотдачи для несовпадающей конвекции (фиг. 3,б). Если при малой величине Gr/Re^2 распределение теплоотдачи по окружности соответствует вынужденному обтеканию, т. е. имеются минимум при $\varphi = 90^\circ$ и максимум теплоотдачи при $\varphi = 0$, то с достижением параметра $Gr/Re^2 = 20$ распределение теплоотдачи по окружности монотонно и соответствует естественной конвекции, а в результате изменения направления движения в пристенной области теплоотдача становится максимальной при $\varphi = 180^\circ$, а минимальной при $\varphi = 0$. При совпадающей конвекции влияние на теплообмен вынужденного течения мало заметно при $Gr/Re^2 > 10$, при несовпадающей это влияние существенно до $Gr/Re^2 = 15$. Это объясняется особенностями взаимо-



Фиг. 4

действия пристенного течения и внешнего потока, которые были описаны ранее. Интересно отметить, что в этих условиях существует режим $Gr/Re^2 = 12-15$, при котором интенсивность теплоотдачи по окружности остается постоянной.

На фиг. 4 точки 1, 2 — данные о средней теплоотдаче для совпадающей и несовпадающей конвекций соответственно, полученные методом теплового баланса; 3, 4 — данные для совпадающей и несовпадающей конвекций соответственно, полученные осреднением данных о локальной теплоотдаче. Критерий Nu_B соответствует теплоотдаче при чисто вынужденной конвекции. Он определялся по формуле $Nu_B = 0,3737 + 0,37Re^{0,5} + 0,057Re^{0,67}$ [10], которая была апробирована исследованием теплоотдачи в соответствующем режиме на экспериментальной установке авторов.

На основании проведенного исследования можно отметить следующее.

1. При поперечном обтекании цилиндра воздухом область собственно смешанной конвекции, определяемая измерениями теплообмена, находится в пределах изменения параметра $0,01 \leq Gr/Re^2 \leq 15,0$.

2. При совпадающем действии свободного и вынужденного движения смешанная конвекция приводит к интенсификации теплообмена. В области изменения параметра $0,01 \leq Gr/Re^2 \leq 10$ теплообмен выше, чем при чисто вынужденной и чисто свободной конвекции.

3. При противоположном направлении свободного и вынужденного движения интенсивность теплоотдачи уменьшается на 40% по сравнению с совпадающим течением.

4. Получены критериальные зависимости для расчета среднего теплообмена в области $0,01 \leq Gr/Re^2 \leq 15$

а) для совпадающей смешанной конвекции

$$(1) \quad \frac{Nu}{Nu_B} = \left[0,74 + 0,07 \left(1 - \lg \frac{Gr}{Re^2} \right) \right] \left[1 + \left(\frac{Gr}{Re^2} \right)^{0,5} \right]^{0,5};$$

б) для противоположной смешанной конвекции

$$(2) \quad \frac{Nu}{Nu_B} = \left[0,74 + 0,07 \left(\lg \frac{Gr}{Re^2} - 0,3 \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{Gr}{Re^2} - 2 \right)^2 \right]^{0,0625};$$

5. При совпадающем действии смешанной конвекции при $Gr/Re^2 \geq 2$ отрыв пограничного слоя практически отсутствует.

6. При противоположной смешанной конвекции для $12 \leq Gr/Re^2 \leq 15$ коэффициент теплоотдачи сохраняет постоянное значение по окружности цилиндра.

В уравнениях (1), (2) за характерные параметры приняты диаметр цилиндра и температура набегающего потока.

Поступила 4 V 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Merkin I. H. Mixed convection from a horizontal circular cylinder.— Int. J. Heat Mass Transfer, 1977, vol. 20, p. 73—77.
2. Sparrow E. H., Lee L. Analysis of mixed convection about a horizontal cylinder.— Int. J. Heat Mass Transfer, 1976, vol. 19, p. 229—231.
3. Joshi N. D., Sukhatme S. P. An analysis of combined free and forced convection heat transfer from a horizontal circular cylinder.— J. Heat Transfer, 1971, vol. 11, p. 441—448.
4. Hatton A. P., James D. D., Seville H. W. Combined forced and natural convection with low speed air flow over horizontal cylinders.— J. Fluid Mech., 1970, vol. 42, pt 1, p. 17—31.
5. Fand R. M., Keswani R. Combined natural and forced convection heat transfer from horizontal cylinders to water.— Int. J. Heat Mass Transfer, 1973, vol. 16, p. 1175—1191.
6. Остьюзен П. Х., Медэн С. Смешанная конвективная теплоотдача от горизонтальных цилиндров в воздухе.— Теплопередача, сер. С, 1971, № 2.
7. Sarma T. S., Sukhatme S. P. Local heat transfer from a horizontal cylinder to air in cross flow: influence of free convection and free stream turbulence.— Int. J. Heat Mass Transfer, 1977, vol. 20, p. 51—56.
8. Семенов Ю. П., Беляков В. А., Грудников Л. В., Дмитроц В. А., Левин А. Б. Экспериментальное исследование теплообмена на горизонтальных цилиндрах в условиях смешанной конвекции воздуха.— В кн.: Вопросы теплопередачи. М., МЛТИ, 1976.
9. Семенов Ю. П., Беляков В. А., Левин А. Б. Измерение скорости в пограничном слое при естественной и смешанной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра с помощью ЛДИС.— В кн.: Методы лазерной диагностики в гидроаэродинамике. Материалы международной школы-семинара. Минск, 1978.
10. Richardson P. C. Convection from heated wires at moderate and low Reynolds numbers.— AIAA J., 1965, N 3.

УДК 532.529.

СТРУКТУРА ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ГАЗОЖИДКОСТНОМ ПОТОКЕ

Н. Н. Елин, О. В. Клапчук

(Москва)

Постоянно изменяющаяся в пространстве поверхность раздела между жидкостью и газом в двухфазном потоке приводит к тому, что локальные значения скоростей фаз, давления, газосодержания и другие характеристики находятся в существенной зависимости от пространственных переменных и времени. В этой связи весьма важно исследовать статистическую структуру двухфазного потока как в пространстве, так и во времени. Важной частью таких исследований является изучение пространственных и временных корреляций пульсаций давления. Корреляционные и спектральные функции позволяют определить частоту пульсаций скорости, оценить связь между пульсациями в различные моменты времени в разных сечениях трубы, по ним можно определить масштабы турбулентных возмущений в газожидкостном потоке, несущих большую часть энергии пульсационного движения.

Измерения пульсирующего давления в газожидкостном потоке [1] показали, что амплитуда и частота пульсаций давления меняются с изменением скорости потока, газосодержания и зависят от режима течения смеси. В работе [2] сделана попытка создать метод классификации режимов течения двухфазных смесей на основе распределения спектральной плотности пульсаций давления на стенке. Измерению скорости распространения и интенсивности пульсаций давления в восходящем пузырьковом потоке фреона-12 посвящена работа