

УДК 535.8

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАТОПЛЕННОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

А. П. Белоусов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск  
E-mail: abelousov@gorodok.net

С помощью метода PIV/LIF получены экспериментальные данные о пространственном распределении газовой фазы в осесимметричной импактной струе. Показано, что распределение пузырьков в потоке определяется динамикой вихревых образований.

Ключевые слова: многофазные потоки, струйные течения, динамика дисперсной фазы.

Пространственное распределение газовой фазы в двухфазных газожидкостных потоках — важная характеристика, во многом определяющая гидродинамическую структуру течения. Это обусловлено тем, что наличие пузырьков газа приводит к изменению таких свойств среды, как плотность и вязкость. Очевидно, что в данном случае определяющими параметрами являются объем и распределение дисперсной фазы в изучаемой области потока.

На основе экспериментальных данных о распределении локального газосодержания и скоростей фаз в газожидкостном потоке, полученных в работах [1–8], построены различные теоретические модели, в которых неравномерность распределения дисперсной фазы в потоке определяется неоднородностью градиента давления и дрейфом пузырьков газа к точке минимума давления.

В работе [9] для объяснения миграции газовой фазы вводится сила, действующая на пузырек, всплывающий в потоке жидкости, имеющей градиент скорости. В модели используется модифицированное решение задачи о движении вращающейся сферы. Предполагается, что угловая скорость пузырька пропорциональна градиенту скорости жидкости.

В [10] предложено описание структуры зоны турбулентного течения в виде вихрей, движущихся в потоке. Взаимодействие таких вихрей и пузырьков газа приводит к увеличению концентрации газовой фазы в местах локализации вихревых структур.

Целью данной работы является экспериментальное исследование пространственного распределения газовой фазы в осесимметричной затопленной импактной (натекающей на плоскую поверхность под углом  $90^\circ$ ) струе методом PIV/LIF [11].

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Газожидкостная смесь циркулировала в замкнутом гидродинамическом контуре, который состоял из бака с жидкостью, насоса, резервуара, системы соединительных труб и датчиков для контроля параметров эксперимента. В прямоугольный бак с размерами  $200 \times 200 \times 300$  мм, изготовленный из органического стекла, через дно вертикально вводится сопло ( $d = 15$  мм), так чтобы газожидкостный поток натекал на импактную поверхность под углом  $90^\circ$ . Для создания периодического возмущения потока используется стандартный электродинамический вибратор ESE-201, соединенный с успокоительной камерой через сильфон.

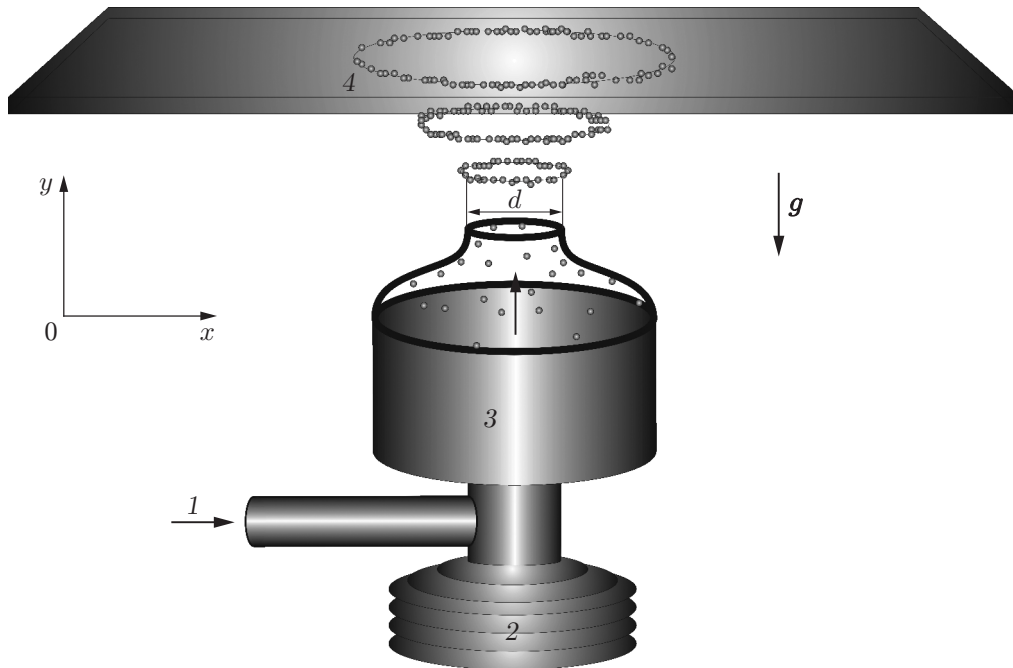


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — газожижидкостная смесь; 2 — электродинамический вибратор ESE-201; 3 — сопло; 4 — импактная поверхность

В качестве метода измерения использовался метод PIV/LIF. Схема измерительной системы приведена на рис. 2. Излучение импульсного лазера Nd:YAG (вторая гармоника) преобразовывалось аноморфной оптической системой в лазерный нож, который выделял в потоке исследуемое сечение. Лазер давал две последовательные вспышки. Вторичное излучение трассеров и пузырьков проходило через световые фильтры. Поскольку в качестве трассеров использовались флуоресцентные частицы, излучение, рассеянное ими, имело меньшую частоту по сравнению с частотой излучения лазера. Таким образом, одна из камер фиксировала изображения трассеров, другая — изображения пузырьков. Полученные фотографии анализировались с помощью системы обработки.

Для получения поля скорости проводилась корреляционная обработка изображений трассеров [11]. Изображения пузырьков использовались для построения пространственного распределения газовой фазы.

На фотографии пузырек, попадающий в лазерный нож, имеет серповидную форму. Согласно [12] радиус внешней границы изображения светящегося объема равен радиусу пузырька, следовательно, реальная форма пузырька и его положение в пространстве легко восстанавливаются.

Локальная концентрация газовой фазы в плоскости изображения определяется отношением площадей

$$\varphi_S = S_b/S_A,$$

где  $S_A$  — площадь исследуемой области;  $S_b$  — площадь находящихся в ней пузырьков.

Объемная концентрация определяется с помощью нормировочных коэффициентов, которые вычисляются следующим образом. Обозначим ширину лазерного ножа  $h$ . Предположим, что пузырьки представляют собой сферы радиусом  $R_j$  и их изображения не

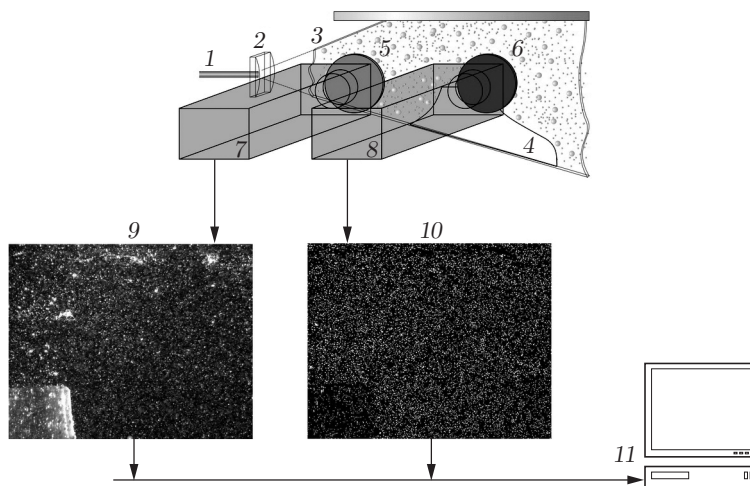


Рис. 2. Схема измерительной системы:

1 — лазерный пучок; 2 — анаморфотный преобразователь; 3 — лазерный нож; 4 — сопло; 5 — светофильтр с максимумом пропускания в зеленой области спектра; 6 — светофильтр с максимумом пропускания в красной области спектра; 7, 8 — CCD-камеры; 9 — фотография пузырьков; 10 — фотография трассеров; 11 — система обработки фотографий

перекрываются. Тогда отношение концентраций  $\varphi_V$  и  $\varphi_S$  можно записать в виде

$$\frac{\varphi_V}{\varphi_S} = \frac{4\pi}{3} S_A \sum_{j=1}^n R_j^3 / \left( \pi S_A h \sum_{j=1}^n R_j^2 \right) = \frac{4}{3h} \sum_{j=1}^n R_j^3 / \sum_{j=1}^n R_j^2,$$

где  $n$  — число пузырьков, принадлежащих исследуемой области. Из данного соотношения следует, что нормировочный коэффициент определяется шириной лазерного ножа и дисперсным составом газовой фазы.

Рассмотренные выше методики использовались при изучении пространственного распределения газовой фазы в газонасыщенной импактной струе. Измерения проводились при числе Рейнольдса  $Re = 25\,000$ , которое определялось по формуле

$$Re = U_0 d / \nu$$

( $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости;  $U_0 = 1,4$  м/с — среднерасходная скорость потока;  $d$  — диаметр выходного отверстия сопла). В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Расстояние между срезом сопла и импактной поверхностью  $H = 30$  мм ( $H/d = 2$ ). Параметры PIV-системы следующие: время между последовательными вспышками лазера 20 мс, физический размер области измерения  $53 \times 30$  мм, разрешение 0,67 мм между соседними векторами скорости, размер расчетной области  $32 \times 32$  пикселя ( $1,34 \times 1,34$  мм), ширина лазерного ножа 1 мм. Согласно [11] погрешность измерения скорости не превышала 5 %. Газ инжестировался перед сопловым блоком. Объемная доля газа на срезе сопла 1,8 %. Средний диаметр пузырьков приблизительно равен 100 мкм. Характерное распределение пузырьков (приблизительно 150 000) по размерам представлено на рис. 3 ( $\omega$  — относительная частота). Измерения проводились при упорядоченной генерации вихревых образований путем внешнего периодического воздействия, позволяющего создавать в потоке когерентные структуры. Частота воздействия определялась оптимальным для данной системы значением числа Струхала  $Sh = 0,5$ .

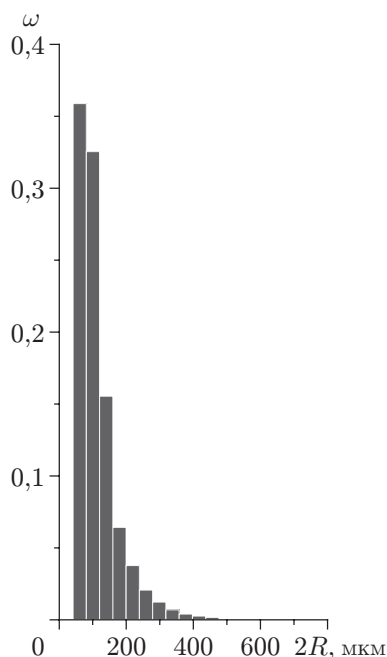


Рис. 3. Распределение пузырьков по размерам

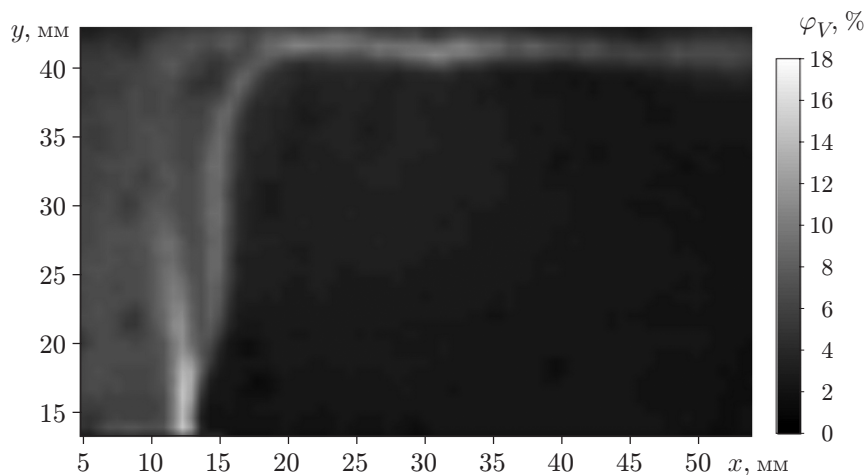


Рис. 4. Пространственное распределение газовой фазы

На рис. 4 приведено среднее по 3000 реализациям пространственное распределение газовой фазы. Вследствие симметрии струи рассматривается только ее правая половина. Положение центра струи соответствует координате  $x = 4,77$  мм. Верхняя граница рис. 4 совпадает с импактной поверхностью. Видно, что распределение газовой фазы по сечению струи неравномерно. Максимальные значения наблюдаются в слое смешения и вблизи импактной поверхности.

Согласно [10] распределение газовой фазы существенно зависит от динамики вихревых образований. Определим величину завихренности векторного поля скорости  $\mathbf{V}(x, y)$ . В декартовой системе координат

$$\text{rot } \mathbf{V} = \left( \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \mathbf{k} \quad (1)$$

( $V_x, V_y$  — проекции вектора скорости на оси  $x$  и  $y$  соответственно).

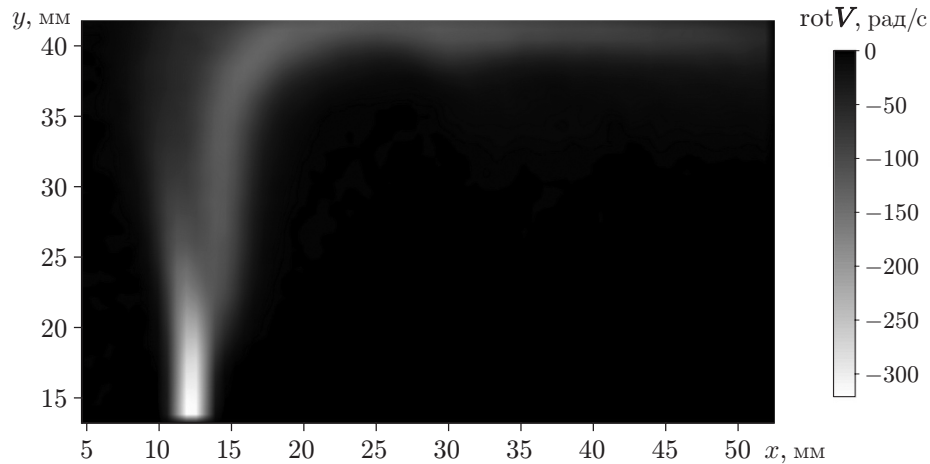


Рис. 5. Завихренность поля средней скорости

На рис. 5 приведено поле завихренности, рассчитанное по формуле (1) с помощью метода конечных разностей. Для анализа использовалось среднее по 3000 реализациям поле скорости. Видно, что максимум объемной концентрации газа соответствует максимальному значению завихренности.

Рассмотрим еще одну характеристику, подтверждающую важную роль вихревых структур в гидродинамике многофазных смесей. Построим суммарное по 3000 мгновенным полям скорости распределение центров вихревых образований в пространстве. Для этого проанализируем мгновенные поля скоростей  $\mathbf{V}(x_i, y_i)$  ( $x_i, y_i$  — дискретные координаты точек пространства, задаваемые системой PIV). Значение завихренности для точек  $(x_i, y_i)$  вычисляется по формуле (1). Для определения границ области, занятой вихревым образованием, выбирается некоторое пороговое значение завихренности (выше уровня шума)  $I_{tr} = 0,2I_{\max}$ , позволяющее четко идентифицировать вихри. Форма вихревых торoidalных структур в плоскости лазерного ножа близка к круговой ( $d_V \approx 4$  мм). Положение

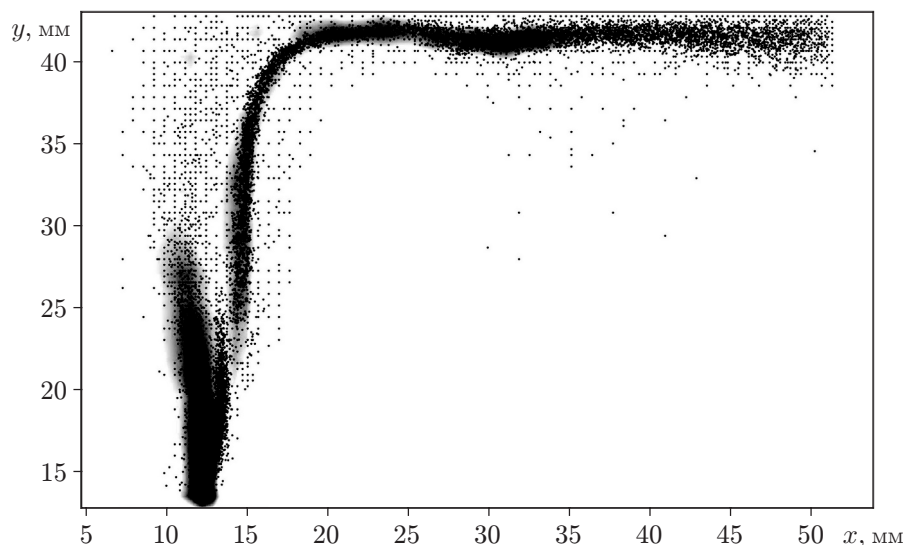


Рис. 6. Пространственное распределение центров вихревых образований

центров определяется по формулам

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \quad Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i,$$

где  $X$ ,  $Y$  — координаты центра;  $N$  — число точек вихревого образования;  $X_i$ ,  $Y_i$  — текущие координаты точки. На рис. 6 видно, что центры вихрей находятся в областях повышенной концентрации дисперсной фазы.

Таким образом, анализ пространственных распределений газовой фазы, поля завихренности средней скорости и распределения центров вихрей (см. рис. 4–6) позволяет сделать вывод, что определяющее воздействие на распределение газовой фазы в импактной струе оказывает динамика вихревых структур. Полученный результат подтверждает обоснованность применения современных моделей [7–10] для расчета двухфазных потоков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Neal L. G., Bankoff S. G.** A high-resolution resistivity probe for determination of local void properties in gas-liquid flow // *AICHE. J.* 1963. V. 9, N 4. P. 490–494.
2. **Delhaye J. M.** Anemometrie a fil chaud dans les ecoulements diphasiques // *C. r. Acad. sci.* 1968. V. 266, N 6. P. 370–373.
3. **Delhaye J. M.** Hot-film anemometry in two-phase flow. Two-phase flow instrumentation // *Trans. ASME.* 1969. N 3–6. P. 58–69.
4. **Delhaye J. M.** Mesure de taux de vide local en ecoulement diphasique eau-air par un anemometrie a fil chaud: Rapp. TT / Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, Service des Transferts Thermiques. N 79. Grenoble, 1967.
5. **Delhaye J. M.** Two-phase pipe flow // *Intern. J. Chem. Engng.* 1983. V. 23, N 3. P. 385–410.
6. **Delhaye J. M., Semeria R., Flamand J. C.** Void fraction, vapor, and liquid temperatures local measurements in two-phase flow using a microthermocouple // *J. Heat Transfer.* 1973. V. 95, N 3. P. 365–370.
7. **Ибрагимов М. Х., Бобков В. П., Тычинский Н. А.** Исследование поведения газовой фазы в турбулентном потоке смеси воды и газа в каналах // *Теплофизика высоких температур.* 1973. Т. 11, № 5. С. 1051–1061.
8. **Serizawa A., Kataoka I., Michiyoshi I.** Turbulence structure of air-water bubbly flow // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1975. V. 2, N 1. P. 235–246.
9. **Zun I.** The traverse migration of bubbles influenced by walls in vertical bubbly flow // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1980. V. 6, N 4. P. 583–588.
10. **Rouhani Z.** Effect of wall friction and vortex generation on the radial distribution of different phases // *Intern. J. Multiphase Flow.* 1976. V. 3, N 1. P. 35–50.
11. **Raffel M.** Particle image velocimetry. A practical guide / M. Raffel, C. Willert, Y. Kompenhans. Berlin: Springer-Verlag, 1998.
12. **Белоусов А. П., Белоусов П. Я.** Метод измерения дисперсного состава и локального газосодержания газожидкостных потоков // *Автоматрия.* 2008. Т. 44, № 2. С. 50–55.

*Поступила в редакцию 9/XI 2007 г.,  
в окончательном варианте — 23/VI 2008 г.*