

**Д. М. Маркович<sup>1,2</sup>, К. С. Первунин<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Институт теплофизики СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия  
E-mail: pervunin@itp.nsc.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГАЗОНАСЫЩЕННОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУИ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ\*

В работе предложен новый оптический метод измерения характеристик газо-жидкостных потоков, основанный на подходе лазерно-индуцированной флуоресценции. Разработаны комплексные алгоритмы анализа изображений на основе процедур фильтрации, бинаризации, идентификации границ образов пузырей и определения размеров образов. В комбинации с подходами PIV и PTV предложенный метод позволяет одновременно измерять мгновенные пространственные распределения скорости непрерывной фазы, а также размеры, положения и скорости частиц дисперсной фазы. Разработанный метод применен для исследования гидродинамической структуры газонасыщенной импактной струи. В результате рассчитаны пространственные распределения статистических моментов пульсаций скорости жидкости, скорости пузырей и локального объемного газосодержания (до третьих моментов включительно), в том числе и смешанные корреляции. Проведено сравнение пространственных распределений моментов скорости жидкости для однофазного и двухфазного потоков. Для выбранного сечения однофазной и газонасыщенной импактных струй показано, что присутствие газовой фазы оказывает существенное воздействие на турбулентную структуру импактной струи.

*Ключевые слова:* газонасыщенная струя, PIV, PLIF, PTV, лазерно-индуцированная флуоресценция.

### Введение

Двухфазные газожидкостные потоки широко распространены в промышленности и многих технологических процессах: абсорбционные аппараты, испарители, скрубберы, воздушные подъемные насосы и др. В частности, добавление мелких газовых пузырей используется в качестве метода для снижения трения. Частицы газовой фазы играют ключевую роль в процессах кавитации, флотации, аэрации.

Неравномерность поля скорости потока приводит как к турбулентной дисперсии газожидкостного потока, так и к изменению уровня флуктуаций в непрерывной фазе. Влияние несущей фазы и частиц дисперсной фазы является взаимным: на траектории частиц влияет локальная неравновесная турбулентность жидкости (турбулентная дисперсия), движение пузырей оказывает существенное влияние на турбулентную структуру потока (модуляция турбулентности).

Начиная с работ А. Serizava и др. [1] и более поздних [2] в литературе представлено большое количество исследований подавления и усиления турбулентности пузырями. Однако большинство работ посвящено изучению течений в трубах и пузырьковых колоннах, тогда как пузырьковые слои смешения изучены в гораздо меньшем объеме.

При численном моделировании многофазных турбулентных потоков осреднение уравнений движения по пространству и ансамблю приводит к необходимости использования различных моделей замыкания. Однако их развитие и верификация требуют привлечения экспериментальных данных, таких как смешанные корреляции пульсаций скорости и локальной концентрации частиц дисперсной фазы.

В настоящее время существует достаточно большое количество различных бесконтактных оптических методов измерений в двухфазных потоках (теневой метод, интерферометрические методы, фазовая и ла-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-08-00213).

зерная доплеровская анемометрия). Однако при применении таких методов к двухфазным течениям существует ряд ограничений, связанных с оптической прозрачностью потоков [3]. С увеличением объемного содержания частиц дисперсной фазы (пузырей) возрастает вероятность перекрытия образов частиц на изображении, и как следствие увеличивается погрешность определения формы, размеров и положений частиц. На данный момент в большинстве представленных в литературе работ исследуются потоки с относительно малым объемным содержанием газа ( $< 1\%$ ).

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию гидродинамической структуры газонасыщенной импактной струи с помощью новой разработанной методики PLIF.

#### Экспериментальная установка и условия проведения эксперимента

Экспериментальная установка представляла собой замкнутый гидродинамический контур, оборудованный насосом, компрессором, расходомерами, манометром и термостатом. Измерения проводились в рабочем объеме, изготовленном из оргстекла (рис. 1), с размерами: высота – 400 мм, ширина – 200 мм, длина – 200 мм. Струйный поток формировался при помощи осесимметричного сопла Витошинского с выходным диаметром  $d = 15$  мм. На расстоянии  $H = 3d$  от сопла размещалась импактная поверхность. Число Рейнольдса, построенное по среднерасходной скорости жидкости  $U_0 = 0,52$  м/с и диаметру сопла  $d$ , равнялось 8 900. В качестве рабочей жидкости был использован 10 % раствор этилового спирта в воде. Температура жидкости поддерживалась на постоянном уровне  $26 \pm 0,5$  °С. Для внесения в поток монодисперсных пузырей заданного размера использовался смеситель специальной конструкции. Интегральное объемное газосодержание составляло  $\beta = 3\%$ .

Для измерений использовалась PIV-LIF система «ПОЛИС», состоящая из двойного импульсного Nd:YAG-лазера (длина волны излучения 532 нм, длительность импульса 10 нс), CCD-камеры и синхронизирующего процессора. Толщина лазерного «ножа», сформированного цилиндрической линзой, составляла 0,8 мм в измерительной области.

В поток добавлялись флуоресцентные трассеры (средний диаметр 20 мкм, диапазон длин волн излучения  $550 \div 700$  нм) для проведения PIV измерений. Для измерений при помощи теневой методики использовался синхронизируемый стробоскоп со светодиодной матрицей (100 светодиодов с длинами волн  $475 \pm 25$  нм и углом излучения  $\approx 30^\circ$ ). Длительность импульса излучения составляла 10 мкс. Перед матрицей стробоскопа устанавливался диффузный экран для достижения равномерной фоновой интенсивности на изображениях. При проведении экспериментов измерительная система управлялась компьютером с программным обеспечением «ActualFlow», разработанным в Институте теплофизики СО РАН.

Пример изображения пузырей, полученного теневым методом при объемном газосодержании 3 % вблизи сопла, представлен на рис. 2. Видно, что образы пузырей часто перекрываются, и в данном случае применение теневой методики затруднительно.

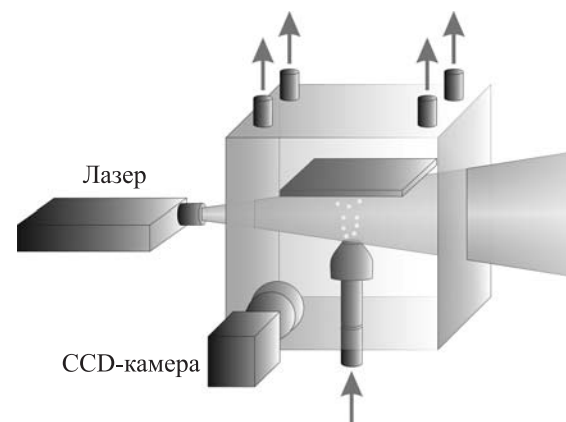


Рис. 1. Схема рабочего объема

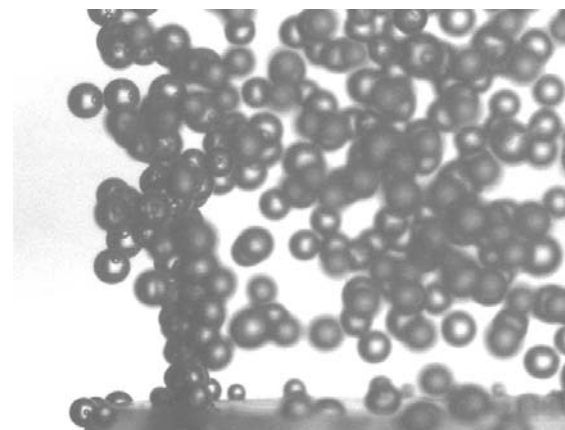


Рис. 2. Мгновенное распределение пузырей в потоке, полученное теневым методом

### Метод измерений

В работе предложен новый метод измерений в пузырьковых потоках, основанный на методике Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF). Суть подхода заключается в добавлении в жидкость флуоресцентного красителя («Rhodamine В»). Выбранное сечение потока освещается лазерным «ножом», при этом краситель переизлучает поглощенный свет как плоскость определенной толщины (см. рис. 1). С использованием оптического



Рис. 3. Схема алгоритма обработки изображений

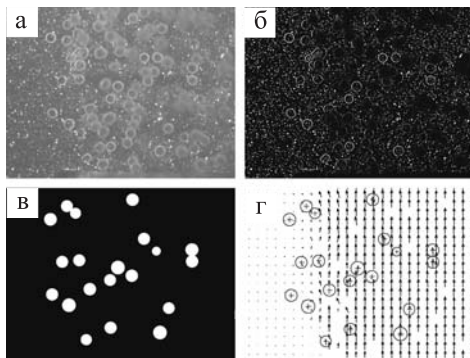


Рис. 4. Примеры данных на различных шагах обработки для PLIF подхода: *а* – исходное изображение; *б* – после применения дифференциального фильтра; *в* – восстановленные образы (маски); *г* – результат расчета

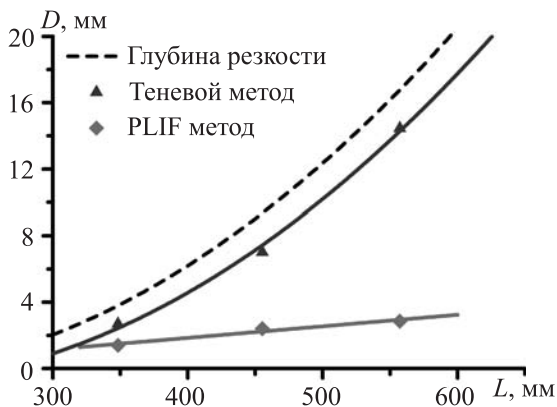


Рис. 5. Глубина осреднения для PLIF и теневых методов в сравнении с глубиной резкости объектива

фильтра, подавляющего излучение лазера, камера регистрирует излучение красителя. Пузыри, находящиеся в непосредственной близости от плоскости лазерного «ножа», отражают и преломляют свет, формируя яркое кольцо на изображении. Для измерения скорости несущей жидкости в поток добавляются флуоресцентные трассеры, при этом на изображении одновременно регистрируются как образы пузырей, так и образы трассеров. Для расчета перемещения трассеров применялся итерационный PIV алгоритм [4], а для перемещения пузырей – Particle Tracking Velocimetry (PTV).

Процесс обработки состоит из следующих стадий (рис. 3).

1. Применение фильтра для подавления высокочастотного шума.

2. Применение дифференциальных фильтров для расчета модуля градиента (теневой метод) или отрицательного значения лапласиана (PLIF метод) интенсивности на изображении (рис. 4, б).

3. Бинаризация по порогу, значение которого определяется заранее для каждого эксперимента.

4. Идентификация образов пузырей и определение их размеров и координат (рис. 4, в).

5. Расчет мгновенной скорости пузырей с использованием PTV алгоритма. Пространственное осреднение мгновенного газосодержания.

6. Устранение образов пузырей с исходного изображения для последующего расчета скорости жидкости методом PIV.

После применения процедур валидации данных на последнем шаге обработки рассчитывалась совместная статистика скорости жидкости, скорости пузырей и газосодержания.

Примеры данных на различных шагах обработки и результат вычисления размеров и скоростей пузырей и расчета поля скорости жидкости представлены на рис. 4.

В порядке отладки и калибровки предложенный PLIF метод был применен к одиночно всплывающим пузырькам в комбинации с теневым методом. Измерения проводились при различных расстояниях от объектива до исследуемого объекта. Во время тестовых измерений варьировалось положение лазерного ножа для PLIF метода и фокусная плоскость для теневой методики (далее измерительная плоскость) относительно источника

пузырей. Экспериментально установлено соотношение между размером кольца-образа, рассчитываемым при использовании PLIF метода, и действительным размером пузырей, выбран порог бинаризации. Расстояние между наиболее удаленной от объектива и самой ближней плоскостями, в которых пузыри еще идентифицируются, соответствует области осреднения метода. На рис. 5 представлена зависимость глубины осреднения для PLIF и теневого методов в сравнении с глубиной резкости объектива. Видно, что для теневого метода глубина осреднения пропорциональна глубине резкости, в то время как для PLIF метода она слабо зависит от расстояния до объекта.

Предложенный метод обладает несколькими существенными преимуществами по сравнению с теньевым: область осреднения практически не зависит от расстояния до объекта и составляет порядка 2 мм, максимальные значения объемного газосодержания, при которых может быть применен PLIF метод, существенно больше, чем для теневого метода.

### Результаты

Для газонасыщенной и однофазной струй были рассчитаны пространственные распределения средней скорости, статистических моментов пульсаций скорости жидкости, скорости пузырей и объемного газосодержания (до третьих моментов включительно), в том числе и смешанные корреляции. Для выбранного сечения на расстоянии одного калибра от импактной поверхности ( $z/d = 2$ ) приведены профили средней скорости, вторые и третьи моменты (рис. 6–8).

Из рис. 6 видно, что наличие газовой фазы несколько уширяет профиль средней продольной скорости жидкости в импактной струе, и скорость всплывания пузырей существенно выше, чем скорость жидкости. Более существенное влияние наличие газовой фазы оказывает на турбулентную структуру потока. Из рис. 7 видно, что для газонасыщенной струи максимальное значение вторых моментов уменьшается примерно в 2 раза, а третьих – в 4 раза.

На рис. 8 представлены профили совместных корреляций пульсаций газосодержания и скорости жидкости. Можно сделать вывод, что корреляции, соответствующие пульсациям продольной скорости потока  $u$ , имеют на-

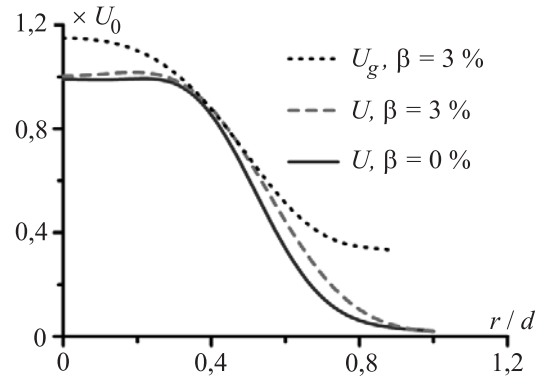


Рис. 6. Профили средней продольной скорости для одно- и двухфазной импактных струй

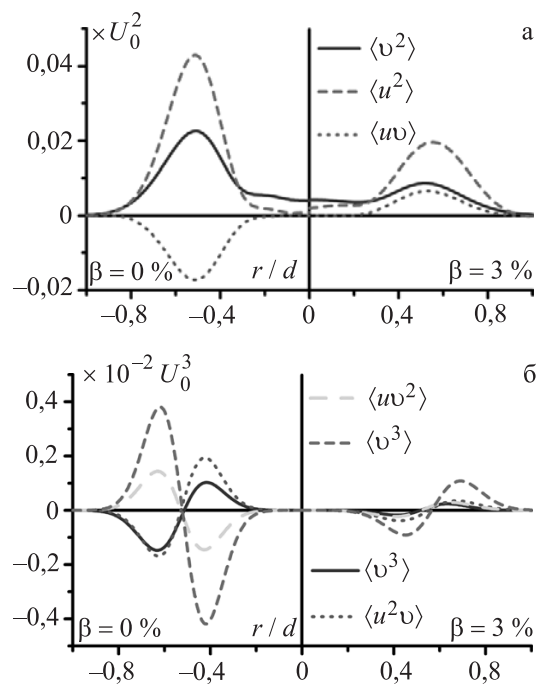


Рис. 7. Профили вторых (а) и третьих (б) моментов пульсаций скорости жидкости для одно- и двухфазной импактных струй

ибольшие значения, и в целом, пространственное распределение корреляций имеет достаточно сложную структуру.

### Заключение

В работе предложен новый оптический метод исследования пузырьковых потоков. Проведено экспериментальное исследование импактной газонасыщенной турбулентной струи при объемном содержании газа 3%. Показано, что наличие пузырей в потоке приводит к подавлению интенсивности турбулентных пульсаций, существенно уменьшая величину статистических моментов.

Впервые для данного вида течения измерены совместные корреляции пульсаций га-



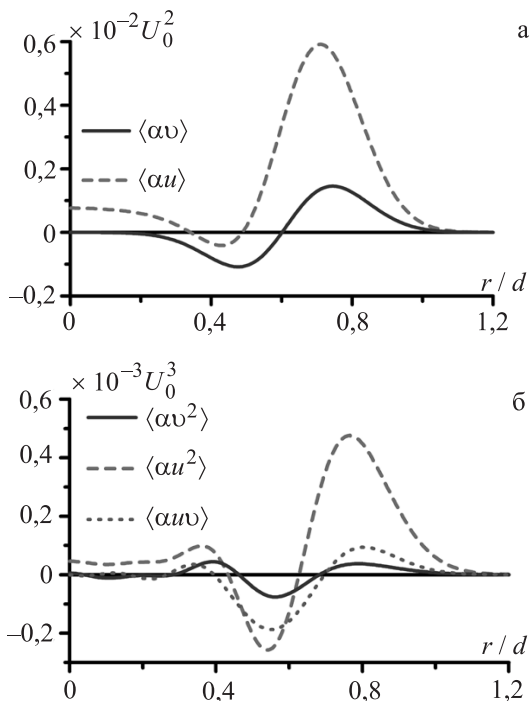


Рис. 8. Профили смешанных корреляций второго (а) третьего (б) порядка для газонасыщенной импактной струи

зосодержания и скорости потока жидкости до третьего порядка включительно, что является необходимой информацией для развития и верификации современных подходов моделирования турбулентных газожидкостных потоков.

### Список литературы

1. Serizava A., Kataoka I., Michigoshi I. Turbulence structure of air-water bubbly flow – II. Local properties // Int. J. Multiphase Flow. 1975. Vol. 2. P. 235–246.

2. Lance M., Bataille J. Turbulence in the liquid phase of a uniform bubbly air-water flow // J. Fluid Mech. 1991. Vol. 222. P. 95–118.

3. Damaschke N., Nobach H., Tropea C. Optical limits of particle concentration for multi-dimensional particle sizing techniques in fluid mechanics // Exp. Fluids. 2002. Vol. 32. P. 143–152.

4. Ахметбеков Е. К., Бильский А. В., Ложкин Ю. А. и др. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование. 2006. Т. 7. С. 79–85.

### Список обозначений

$\alpha$  – локальное значение газосодержания  
 $\beta$  – объемная доля газовой фазы  
 $d$  – выходной диаметр сопла, м  
 $H$  – расстояние от сопла до импактной поверхности  
 $L$  – расстояние от камеры до объекта, м  
 $D$  – глубина осреднения, м  
 $u, v$  – пульсации продольной и радиальной компонент скорости жидкости, м/с  
 $r, z$  – радиальная и аксиальная координаты, м  
 $U, U_g$  – продольные компоненты средней скорости жидкости и газа, м/с  
 $U_0$  – среднерасходная скорость жидкости, м/с

Материал поступил в редколлегию 15.05.2007