УДК 532.517.4 + 532.529.7

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ НА ТУРБУЛЕНТНУЮ СТРУКТУРУ СВОБОДНЫХ И ОГРАНИЧЕННЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Алексеенко С.В., Дулин В.М., Маркович Д.М., Первунин К.С.

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

Работа поддержана интеграционными исследовательскими проектами РАН, СО РАН и РФФИ (грант 10-08-01304-а).

АННОТАЦИЯ

Данная работа направлена на экспериментальное исследование газонасыщенных свободных и импактных турбулентных струй (Re = 12,000) с помощью оптических методов измерений, таких как Planar Fluorescence for Bubble Imaging (PFBI), детальное описание которого дано в работе [1], совместно с подходами PIV и PTV для измерения скоростей обеих фаз, что в результате позволило одновременно измерить мгновенные пространственные распределения скоростей обеих фаз и локального газосодержания. Для каждого режима течения были рассчитаны средние значения скорости обеих фаз и локального газосодержания, а также полный набор статистических моментов пульсаций скоростей обеих фаз и локального газосодержания, включая смешанные одноточечные корреляции. В работе показано влияние объемного содержания газа на турбулентную структуру течений.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес в изучении двухфазных пузырьковых течений связан как с их широким распространением в природе, так и с множеством приложений в промышленности, например, пузырьковые колонны в химических, биохимических и нефтехимических реакторах. На практике жидкости часто насыщаются газовыми пузырями для интенсификации массопереноса между фазами посредством большой межфазной поверхности (даже для относительно малых объемных содержаний) и для увеличения скорости перемешивания благодаря вихрям, индуцируемым в следе пузырей. Также двухфазные среды преобладают в абсорбционных аппаратах, испарителях, скрубберах, воздушных подъемных насосах и множестве других устройств. Наличие дисперсной фазы в процессах кавитации, аэрации и флотации, как известно, играет определяющую роль на структуру течений. Кроме того, введение малых газовых пузырей в пристенную область течений используется в качестве метода снижения трения.

В настоящий момент благодаря многим экспериментальным и численным работам уже является общепризнанным тот факт, что взаимодействие непрерывной и дисперсной фаз является взаимным. В зависимости от размеров пузырей и характерных масштабов турбулентности происходят разнообразные процессы. На траектории пузырей могут оказывать влияние турбулентные пульсации в жидкости (турбулентная дисперсия), тогда как движение пузырей и их скоплений может изменять свойства турбулентных пульсаций в несущей фазе (модуляция турбулентности) посредством некоторых физических механизмов.

В виду своей сложности двухфазные турбулентные потоки часто описываются и моделируются с использованием методов осреднения (по пространству или по ансамблю). Однако осредненные уравнения движения остаются незамкнутыми, что делает необходимым использование моделей замыкания. Таким образом, развитие и верификация современных подходов для моделирования анизотропных турбулентных многофазных потоков требуют наличия комплексных экспериментальных данных. В этом случае наибольший интерес представляют смешанные корреляции скорости жидкости и локального газосодержания (включая моменты третьего порядка). При этом существует необходимость в одновременном измерении пространственных распределений мгновенных скоростей жидкости и газа, а также локального газосодержания. Однако получение таких данных представляет собой очень трудоемкую экспериментальную задачу.

Начиная с работы [9] и некоторых последующих (например, [3] и [6]), на сегодняшний день в литературе представлено большое количество экспериментов по изучению подавления и усиления турбулентности пузырями. Однако в большинстве из них рассматриваются потоки в трубах и пузырьковые колонны, а измерения зачастую ограничены распределениями средней

скорости и пульсаций скорости обеих фаз, среднего содержания частиц дисперсной фазы и их размеров.

В свободных сдвиговых течениях, таких как струи, обоюдное взаимодействие частиц дисперсной фазы и крупномасштабных вихрей, развивающихся в слоях смешения, может значительно влиять на турбулентную структуру всего потока. Например, на основе измерений пристенных сдвиговых напряжений, в работе [2] было обнаружено сильное подавление крупномасштабных вихревых структур (КВС) в пузырьковой струе, натекающей на плоскую поверхность. В работе [8] авторы изучали плоский слой смешения, насыщенный пузырями, используя оптоволоконный зонд, и представили распределения газосодержания, средней скорости обеих фаз и среднеквадратичных отклонений пульсаций скорости. Было показано, что эволюция средних скоростей фаз является автомодельной, а также было обнаружено усиление турбулентных пульсаций при добавлении относительно малых пузырей (с диаметром близким к микромасштабу турбулентности). Авторы работы предположили, что пульсации скорости пузырей обусловлены механизмом турбулентной дисперсии и колебательными движениями самих пузырей. Одной из последних работ по изучению пузырьковых слоев смешения является [7], в которой был тщательно исследован перенос энергии между фазами в плоском свободном сдвиговом слое, содержащем пузыри. Для того чтобы изучить роль КВС в механизме перераспределения энергии в несущей фазе были выполнены одноточечные измерения с применением метода условного осреднения. Среди первых трудов, указывающих на влияние пузырей на дальнюю область турбулентных свободных струй, стоит упомянуть работы [10] и [11], где авторы использовали ЛДИС для измерения скорости пузырей и жидкости. Для определения размеров и положений пузырей в пространстве был использован метод стробоскопической фотографии. Кроме того, на основе вычислений по k-ε модели и с использованием некоторых допущений были получены результаты обмена импульсом между фазами. Авторы зафиксировали небольшое увеличение кинетической энергии турбулентности (КЭТ) вблизи оси струи на расстоянии порядка восьми калибров от кромки сопла при добавлении пузырей (диаметром около 1 мм, что примерно в пять раз меньше диаметра сопла) в турбулентный поток (Re ≈ 9,000). Однако эффект модуляции турбулентности не был значительным, так как объемное содержание газа было достаточно низким. Недавно в работах [4] и [5] изучался процесс захвата пузырей внутрь КВС, развивающихся в ближней области пузырьковой струи в условиях внешнего периодического воздействия. Для этого была использована методика PIV совместно с подходом условного осреднения для того, чтобы определить среднюю скорость и завихренность жидкости. Для измерения газосодержания и скорости пузырей был использован двойной оптический датчик. В результате авторам работы удалось зарегистрировать большие значения концентрации пузырей в центрах КВС.

Однако, не смотря на большой интерес с точки зрения развития методов CFD (Computational Fluid Dynamics), в настоящее время в литературе практически отсутствует экспериментальная информация по взаимной статистике фаз (то есть одноточечные корреляции), например корреляции пульсаций скорости фаз и локального газосодержания, для пузырьковых турбулентных струйных течений. Таким образом, цель данной работы – экспериментальное исследование турбулентной структуры газонасыщенных свободных и импактных турбулентных струй с помощью оптических методов измерений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Экспериментальная установка представляла собой замкнутый гидродинамический контур, оснащенный насосом, компрессором, расходомерами, манометром и термостатом. Расход жидкости поддерживался на постоянном уровне благодаря тому, что скорость вращения насоса контролировалась посредством датчика расхода с обратной связью от расходомера. Измерения проводились в рабочем объеме, изготовленном из оргстекла, со следующими размерами: высота – 400 мм, ширина – 200 мм, длина – 200 мм. Струйный поток с ударным профилем формировался при помощи осесимметричного сопла Витошинского с выходным диаметром d = 15 мм. В случае импактной струи поверхность размещалась нормально к направлению потока на расстоянии $H = 3d$ от среза сопла. В качестве рабочей жидкости был использован 10%-раствор этилового спирта в воде. Температура жидкости поддерживалась постоянной 30±0,5°C. Число Рейнольдса, построенное по среднерасходной скорости жидкости U_0 = 0,93 м/с и диаметру сопла d, составляло 12 000. Для внесения в поток квазимонодисперсных пузырей заданного размера использовался смеситель специальной конструкции. Посредством компрессора воздух подавался в смеситель при фиксированном уровне давления и заданном расходе газа. Объемное содержание газа составляло $\beta = Q_g/(Q_g + Q_l)\cdot 100\%$ = 0%; 1,2%; 2,4% и 4,2%, где Q_g и Q_l – объемные расходы газа и жидкости, соответственно. Средний размер пузырей для всех случаев был фиксированным и равен D_b = 0,85 мм.

В измерениях использовалась PIV-система «ПОЛИС», состоящая из двойного импульсного Nd:YAG лазера (длина волны излучения 532 нм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе 50 мДж), CCD-камеры (глубина цвета 8

бит, разрешение матрицы 1280×1024 пикс.), а также синхронизирующего процессора. Измерительная система управлялась с компьютера посредством программного пакета «ActualFlow». Толщина лазерного "ножа", сформированного фокусирующей и цилиндрической линзами, составляла около 0,8 мм в измерительной области. Расстояние от камеры до лазерного "ножа" было около 215 мм.

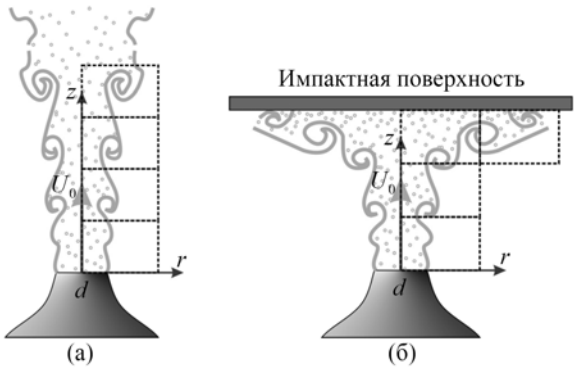

Рис.1. Схемы расположения элементарных измерительных зон для (а) свободной и (б) импактной струй.

Для того чтобы избежать паразитных бликов на изображениях, возникающих в результате отражения прямого света лазера границами раздела пузырей, были использованы флуоресцентные трассеры (средний размер 20 мкм, диапазон длин волн излучения 550÷700 нм) для проведения PIV измерений. На камеру был установлен объектив AF Micro Nikkor 60 мм f/2.8D с оптическим высокочастотным фильтром (край полосы пропускания на 560 нм). В качестве красителя для применения методики PFBI (см. следующий раздел) в рабочую жидкость был добавлен Rhodamine B, концентрация которого составляла примерно 90 мкг/л.

Измерения проводились в центральном сечении течений. Для того чтобы достичь достаточно высокого пространственного разрешения (конечный размер измерительной ячейки для метода PIV составлял 0,576 мм), вся измерительная область была разделена на четыре элементарных зоны, в которых измерения проводились независимо друг от друга (см. рис.1). Для каждой зоны и режима течения была набрана статистика из 10 000 двойных мгновенных изображений для того, чтобы с достаточно хорошей точностью рассчитать скорость дисперсной фазы и локальное газосодержание.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Как упоминалось ранее, в измерениях использовалась методика PFBI, которая основана на регистрации излучения флуоресцентного красителя, растворенного в рабочей жидкости, при освещении потока лазерным "ножом". Пузыри, находящиеся в непосредственной близости от центральной плоскости "ножа" (измерительной плоскости) отражают и преломляют диффузное излучение красителя и образуют яркие кольца на изображении камеры. Одним из преимуществ данного метода является его высокая локальность, что позволяет регистрировать только те пузыри, которые находятся в некотором сечении малой толщины, примерно совпадающим с сечением лазерного "ножа", и применять данную методику к потокам с объемным содержанием газа до 5%.

Для идентификации на изображении резких колец, то есть фокусированных образов пузырей, был применен алгоритм, основанный на расчете коэффициентов корреляции между исходными изображениями и маской в виде кольца с гауссовым распределением интенсивности вдоль его обода. Этот алгоритм позволяет определять размеры пузырей (с точностью порядка 0,5 пикс.) и их положения (с подпиксельной точностью – примерно 0,1 пикс.). Далее, когда выполнена процедура идентификации пузырей для обоих кадров двойного изображения, применялся алгоритм поиска пары (то есть подход PTV), что в результате позволило измерить мгновенную скорость пузырей. Причем алгоритм поиска пары использует критерий корреляционного подобия образов пузырей на первом и втором кадрах изображения с учетом того, что размеры образов близки. Это позволяет увеличить точность определения вектора смещения пузырей до 0,05 пикс. После того, как все пузыри на двойном изображении были идентифицированы, проводился анализ резкости колец, и только фокусированные образы пузырей использовались на дальнейших этапах обработки. Более подробную информацию как о самом методе PFBI, так и об использованных алгоритмах можно найти в [1].

Для определения мгновенной скорости непрерывной фазы был использован адаптивный итерационный кросскорреляционный PIV алгоритм с деформацией измерительной области. Размер конечной расчетной области был 32×32 пикс. (0.576×0.576 мм) при перекрытии областей 50%. К полученным векторным полям скорости были применены процедуры валидации данных для удаления "неверных" векторов. Кроме того, на начальном этапе валидации был использован критерий по соотношению сигнал/шум: если максимальный кросскорреляционный пик выше, чем следующий, менее чем в два раза, то такой вектор рассматривался как "неверный". На последнем этапе валидации применялся адаптационный медианный фильтр с размером области 7×7 ([0]).

На последнем этапе обработки после того, как

были рассчитаны векторные поля мгновенной скорости для обеих фаз, а также положения и размеры пузырей для всех мгновенных изображений, рассчитывались средние характеристики течений и статистические моменты. В процессе вычисления статистики было выполнено пространственное осреднение данных по дисперсной фазе, причем положения и размеры ячеек осреднения и их перекрытие совпадали с положениями, размерами и перекрытием элементарных расчетных ячеек для PIV. В тех расчетных областях, которые не принадлежат пузырю и которым не соответствует вектор скорости жидкости, прошедший валидацию, газосодержание считается неопределенным, и эти области не учитывались при расчете статистики. Иначе, если вектор скорости жидкости прошел валидацию, мгновенное локальное газосодержание χ_b считается равным нулю в случае отсутствия пузыря в этой области или больше нуля, но меньше единицы, в противном случае. Причем, если одна расчетная область принадлежит одновременно двум или большему количеству перекрывающихся пузырей, то максимальное значение мгновенного локального газосодержания ограничено количеством пузырей, которым принадлежит эта расчетная область.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Свободная струя

На Рис.2а можно видеть, что в ближней области течения в ядре струи распределение $\alpha = \langle \chi_b \rangle$ является достаточно однородным. Однако при $r/d \approx 0{,}5$ и $z/d \approx 0{,}2$ можно наблюдать локально большие значения $\alpha \approx 0{,}02$. Похожий локальный максимум был обнаружен в работе [8]. В данной работе этот максимум также наблюдался и для других значений β, и, по-видимому, вызван как неоднородным распределением пузырей внутри трубы, предшествующей соплу, так и влиянием зоны попутного потока за кромкой сопла. Как и в работе [8] вниз по течению максимум α быстро исчезает, а распределение становится более однородным. После того, как пространственное распределение α известно, можно рассчитать расход газа Q_g через поперечное сечение струи, используя формулу (1). В качестве проверки для случая, представленного на рис.2, были рассчитаны значения Q_g для двух сечений z/d = 0,2 and 0,8, и было показано совпадение с точностью 2% рассчитанных значений со значениями, измеренными расходомером в эксперименте Q_g = 0,018 л/с.

$$Q_g = 2\pi \int_0^\infty \alpha U_b r dr \qquad (1)$$

Для всех исследованных режимов пространственные распределения U_b (рис.2б), как было обнаружено, в значительной степени совпадают с пространственными распределениями U_l (не приведено). Основное отличие состоит в том, что из-за действия силы плавучести значения U_b немного больше значений U_l в ядре струи и в слое смешения. В качестве примера, на рис.3 представлено сравнение профилей продольных компонент средней скорости пузырей и жидкости для двух сечений. Первое из них (z/d = 0,5) соответствует ближней области струи, второе (z/d = 3,5) – краю измерительной области. Заметим, что для обоих представленных сечений, как и для любых других, разница скоростей при r/d = 0,5 практически отсутствует. Таким образом, можно ожидать, что в этой области течения генерации турбулентности пузырями почти не происходит. В общем можно заключить, что влияние дисперсной фазы на среднюю скорость жидкости незначительно: увеличение β приводит к небольшому росту U_l в ядре струи, тогда как форма распределения не испытывает практически никаких изменений. Напротив, влияние пузырей на турбулентные пульсации в жидкости выражено гораздо сильнее.

Как можно видеть на рис.4, в ближней области струи (при $z/d > 0{,}5$) значения $\langle \upsilon_l^2 \rangle$ уменьшаются с увеличением β, а максимум смещается вверх по течению (к соплу). Однако вблизи кромки сопла ($z/d < 0{,}5$) увеличение β приводит к более быстрому росту пульсаций $\langle \upsilon_l^2 \rangle$ (см. также рис.7а для случая

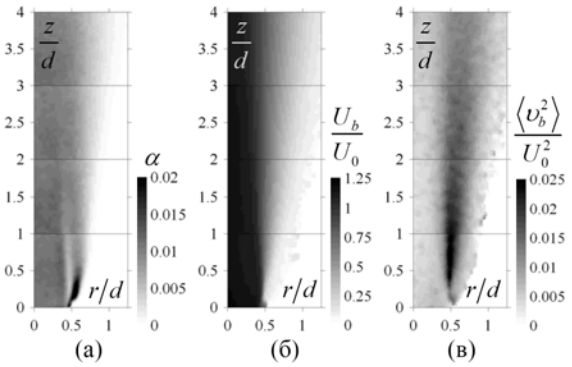

Рис.2. Пространственные распределения (а) среднего локального газосодержания, (б) продольной компоненты средней скорости пузырей и (в) момент второго порядка пульсаций радиальной компоненты скорости пузырей при β = 1,2%.

импактной струи). В то же время на границе измерительной области ($z/d \sim 4$) нельзя выделить сколько-нибудь заметного различия. Кроме того, распределения $\langle \upsilon_b^2 \rangle$ и $\langle \upsilon_l^2 \rangle$ очень схожи друг с другом (ср. рис.2в и рис.4б), а именно обе величины достигают

своих локальных максимумов в слое смешения струи (около r/d = 0,5 и $z/d \approx 0.6$): примерно $0{,}027 \cdot U_0^2$ для $\langle \upsilon_b^2 \rangle$, что очень близко к максималь-

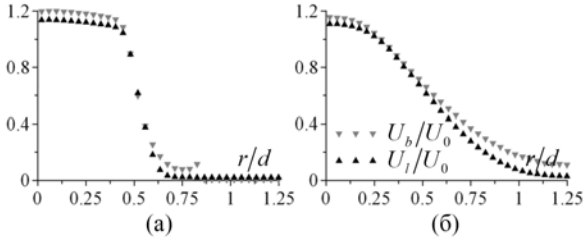

Рис.3. Профили продольной компоненты средней скорости пузырей и жидкости при β = 1,2% в двух поперечных сечениях: (а) z/d = 0,5 и (б) z/d = 3,5.

ным значениям $\langle \upsilon_l^2 \rangle$.

На рис.5а и б можно видеть, что между пульсациями скорости пузырей и жидкости существует сильная корреляция. Следовательно, можно сделать вывод, что для исследованных режимов пульсации скорости пузырей в основном вызваны турбулент-

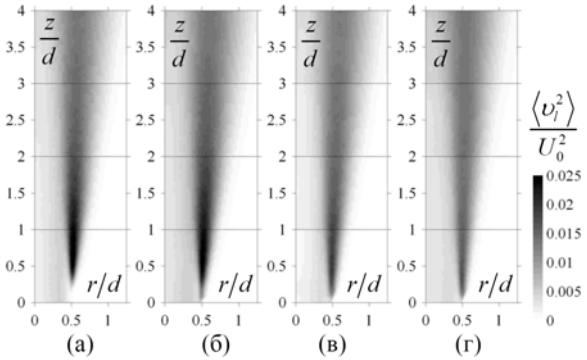

Рис.4. Пространственные распределения поперечной компоненты КЭТ при (а) β = 0%, (б) 1,2%, (в) 2,4% и (г) 4,2%.

ными пульсациями в жидкости. Величины, представленные на рис.5в и г, соответствуют корреляциям между пульсациями скорости жидкости и локального газосодержания, так как $\chi_b' = -\chi_l'$. Фактически они также представляют собой разности продольной и поперечной компонент КЭТ, осредненных по фазе и по ансамблю, то есть $\langle \chi_l' \upsilon_l^2 \rangle = \langle \chi_l \upsilon_l^2 \rangle - \langle \chi_l \rangle \langle \upsilon_l^2 \rangle$ и $\langle \chi_l' u_l^2 \rangle = \langle \chi_l u_l^2 \rangle - \langle \chi_l \rangle \langle u_l^2 \rangle$. Эта разность очень небольшая по сравнению с абсолютными значениями этих величин, поскольку локальное содержание жидкости $\langle \chi_l \rangle = 1 - \alpha$ составляет примерно 0,99 в ядре струи и, таким образом, мало отличается от единицы.

Импактная струя

В ближней области импактной струи пространственные распределения модуля средней скорости пузырей и жидкости (рис.5) очень схожи со случаем свободной струи. Однако в некоторой окрестности области лобовой точки (z/d = 3, r/d = 0) импактной поверхности разница скоростей фаз становится более выраженной. При z/d > 2,5 наблюдается бо-

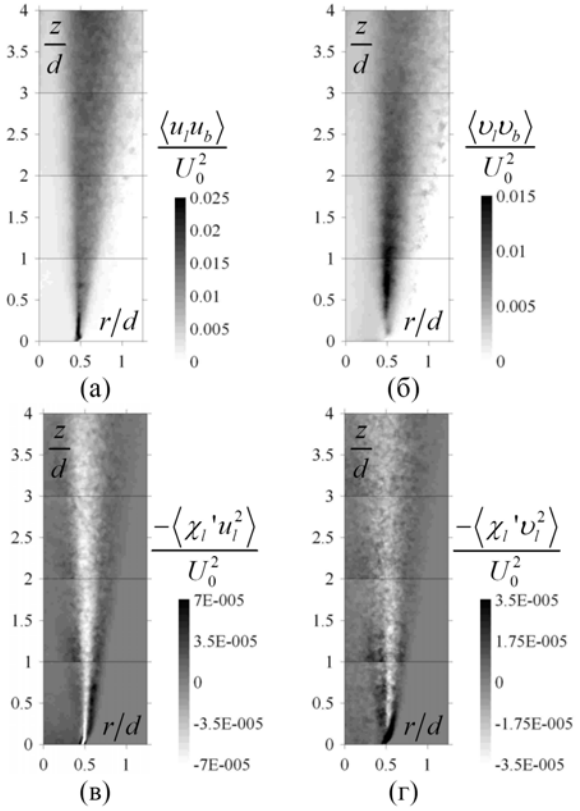

Рис.5. Пространственные распределения (а, б) корреляций пульсаций скорости пузырей и жидкости и (в, г) моментов третьего порядка пульсаций скорости и локального содержания непрерывной фазы при β = 1,2%.

лее быстрое замедление U_b перед импактной поверхностью по сравнению с U_l из-за локального увеличения статического давления вблизи лобовой точки поверхности (рис.7б). В то же самое время градиент давления, действующий в поперечном направлении, приводит к более быстрому росту радиальной компоненты скорости пузырей по сравнению со скоростью жидкости.

Вблизи кромки сопла влияние пузырей на турбулентные пульсации в жидкости имеет тот же характер, как и в случае свободной струи (рис.6). На рис.7а представлены профили $\langle \upsilon_l^2 \rangle$ вдоль сдвигового слоя импактной струи (r/d = 0,5) для различных β (для свободной струи распределения имеют схожий вид, и поэтому не представлены). Для всех β

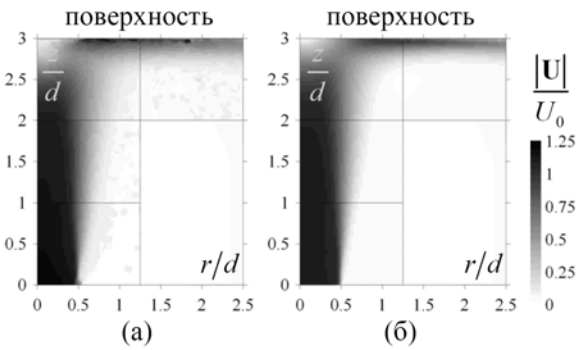

Рис.6. Пространственные распределения модуля средней скорости (а) пузырей и (б) жидкости при $\beta = 1{,}2\%$.

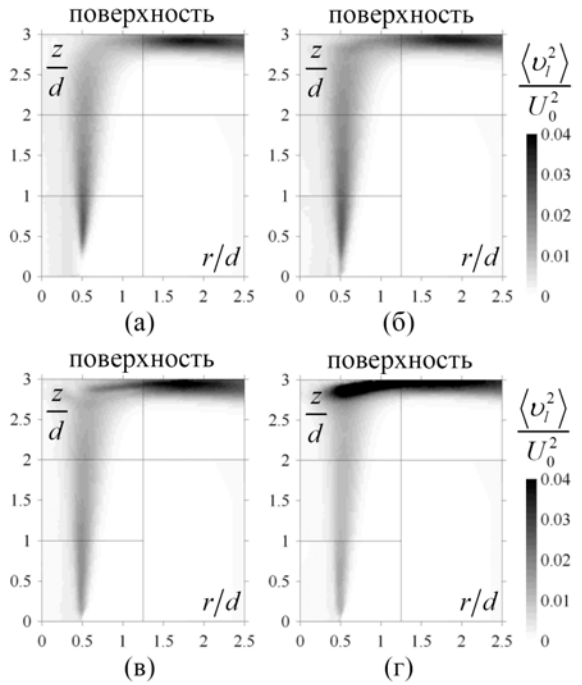

Рис.7. Пространственные распределения поперечной компоненты КЭТ при (а) $\beta = 0\%$, (б) 1,2%, (в) 2,4%, и (г) 4,2%.

наблюдается экспоненциальный рост $\langle \upsilon_l^2 \rangle$ с увеличением z. Присутствие пузырей в потоке приводит к более быстрому увеличению $\langle \upsilon_l^2 \rangle$ вблизи кромки сопла ($z/d < 0{,}15$). Как для свободной, так и для импактной струй, если аппроксимировать $\langle \upsilon_l^2 \rangle$ функцией $A \cdot \exp(B \times z/d)$, скорость роста B увеличивается в три раза для двухфазного потока ($\beta = 1{,}2\%$) по сравнению с однофазным. Для больших значений объемного содержания газа ($\beta = 2{,}4\%$ и 4,2%) этот эффект выражен еще сильнее.

Однако разница между профилями U_l и U_b, а, следовательно, и скорость сдвига между фазами, пренебрежимо мала. Более того, как было указано выше, разница ($U_l - U_b$) практически равна нулю в сдвиговом слое течений ($r/d = 0{,}5$) для всей измерительной области, и в связи с этим можно предполагать, что уровень индуцируемой пузырями турбулентности в этой области пренебрежимо мал и не может отвечать за увеличение скорости роста. Более быстрый рост $\langle \upsilon_l^2 \rangle$, по-видимому, вызван пульсационными движениями пузырей вблизи сопла. Анализ начальных распределений интенсивности пульсаций скорости жидкости вблизи кромки сопла показал, что интенсивность пульсаций в продольном направлении увеличивается в ядре струи (с 4,4% до 6% U_0).

Вблизи импактной поверхности, как можно видеть на рис.6, наличие в потоке пузырей приводит к значительному увеличению интенсивности турбулентных пульсаций в непрерывной фазе. Для $\beta = 1{,}2\%$ локальный максимум $\langle \upsilon_l^2 \rangle_{\max} = 0{,}036 \cdot U_0^2$ и расположен примерно при $z/d = 2{,}9$ и $r/d = 1{,}9$, и

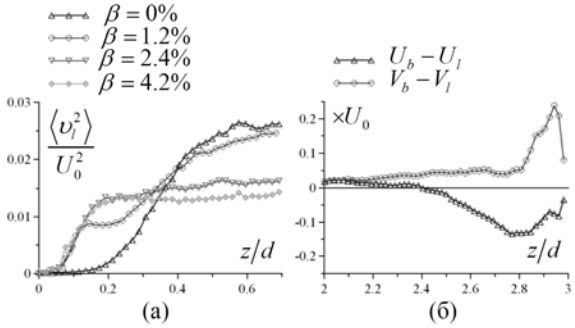

Рис.8. Профили (а) поперечной компоненты КЭТ для различных объемных содержаний газа и (б) разница продольной и поперечной компонент средней скорости пузырей и жидкости вдоль $r/d = 0{,}5$ при $\beta = 1{,}2\%$.

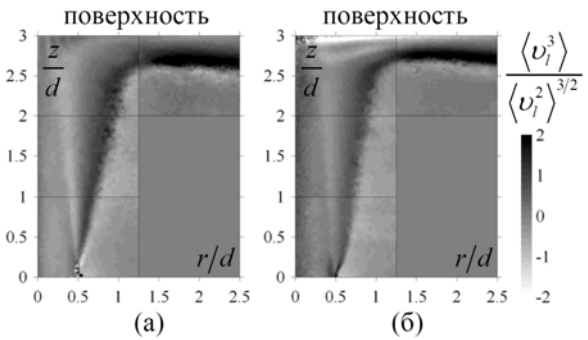

Рис.9. Пространственные распределения коэффициента асимметрии радиальной компоненты пульсаций скорости жидкости при (а) $\beta = 0\%$ and (б) 4,2%.

для $\beta = 4{,}2\%\langle v_l^2\rangle_{\max} = 0{,}09\cdot U_0^2$ при $r/d = 0{,}67$. Кроме того, с увеличением β происходит рост $\langle v_l^2\rangle$. На рис.7б можно видеть, что в области повышенного давления вблизи импактной поверхности существует значительная разница между средними скоростями фаз. Таким образом, можно заключить, что для пузырьковой импактной струи большие значения $\langle v_l^2\rangle$ вдоль поверхности вызваны в основном турбулентностью, индуцируемой пузырями в области повышенного давления, которые затем переносятся в радиальном направлении. При этом на рис.8 можно видеть, что при $r/d < 1$ вблизи импактной поверхности асимметрия пульсаций скорости жидкости, нормированный момент третьего порядка, достигает своего локального минимума.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния дисперсной газовой фазы на турбулентную структуру двухфазных свободных и импактных струй при Re = 12 000 и объемных содержаниях газа до 4,2% включительно. Благодаря применению современных оптических методов исследования двухфазных течений были одновременно измерены пространственные распределения мгновенных скоростей дисперсной и непрерывной фаз и локального газосодержания, а также был рассчитан полный набор статистических моментов, включая смешанные корреляции третьего порядка.

Было обнаружено, что для исследованных значений объемного газосодержания пузыри в основном изменяют турбулентную структуру течений, тогда как распределения средней скорости остаются практически неизменными по сравнению с однофазным потоком. Было показано, что в начальной области сдвигового слоя добавление пузырей приводит к более быстрому росту пульсаций скорости жидкости. Вниз по течению ($z/d > 0{,}3$) наличие пузырей в потоке приводит к подавлению амплитуды пульсаций скорости непрерывной фазы, причем различие в амплитуде пульсаций одно- и двухфазного течений наблюдается вплоть до $z/d < 3{,}5$. Для импактной струи область течения вблизи сопла имеет схожие характеристики со случаем свободной струи. Однако вдоль импактной поверхности пульсации скорости жидкости значительно увеличиваются с ростом объемного содержания газа благодаря индуцируемой пузырями турбулентности в области повышенного давления (окрестность лобовой точки поверхности), где наблюдается сильная асимметрия пульсаций скорости жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ye.K.Akhmetbekov, S.V.Alekseenko, V.M.Dulin, D.M.Markovich, K.S.Pervunin (2010) Planar fluorescence for round bubble imaging and its application for the study of an axisymmetric two-phase jet // *Exp. Fluids*, Vol. 48, I. 4, pp. 615-629.
2. S.V.Alekseenko, D.M.Markovich, V.I.Semenov (1999) Suppression of large-scale structures in a gas-saturated impact jet // *Tech. Phys. Lett.*, Vol. 25, pp. 374-376.
3. M.Lance, J.Bataille (1991) Turbulence in the liquid phase of a uniform bubbly air-water flow // *J. Fluid Mech.*, Vol. 222, pp. 95-118.
4. R.Z.Milenkovic, B.Sigg, G.Yadigaroglu (2007a) Bubble clustering and trapping in large vortices. Part 1: Triggered bubbly jets investigated by phase-averaging // *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 33, pp. 1088-1110.
5. R.Z.Milenkovic, B.Sigg, G.Yadigaroglu (2007b) Bubble clustering and trapping in large vortices. Part 2: Time-dependent trapping conditions // *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 33, pp. 1111-1125.
6. V.E.Nakoryakov, O.N.Kashinsky, V.V.Randin, L.S.Timkin (1996) Gas-liquid bubbly flow in vertical pipes (Data Bank contribution) // *J. Fluids Eng.*, Vol. 118, pp. 377-382.
7. P.M.Rightley, J.C.Lasheras (2000) Bubble dispersion and interphase coupling in a free shear flow // *J. Fluid Mech.*, Vol. 412, pp. 21-59.
8. V.Roig, C.Suzanne, I.Masbernat (1998) Experimental investigation of a turbulent bubbly mixing layer // *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 24, pp. 35-54.
9. A.Serizava, I.Kataoka, I.Michigoshi (1975) Turbulence structure of air-water bubbly flow – II. Local properties // *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2, pp. 235-246.
10. T.Y.Sun, G.M.Faeth (1986a) Structure of turbulent bubbly jets – I. Methods and centerline properties // *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 12, pp. 99-114.
11. T.Y.Sun, G.M.Faeth (1986b) Structure of turbulent bubbly jets – II. Phase property profiles // *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 12, pp. 115-126.
12. J.Westerweel, F.Scarano (2005) Universal outlier detection for PIV data // *Exp. Fluids*, Vol. 39, pp. 1096-1100