КРУПНОМАСШТАБНЫЕ СТРУКТУРЫ В ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ

С.В. Алексеенко, А.В. Бильский, В.Н.Васечкин, В.М.Дулин, Д.М. Маркович, С.М. Харламов

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

Аннотация

В работе рассмотрен широкий класс сдвиговых течений – турбулентных струй и волновых пленок жидкости с точки зрения развития крупномасштабных структур – вихревых образований и солитонообразных нелинейных волн, приведены результаты экспериментального исследования структуры данных потоков при помощи методов количественной визуализации – PIV (Particle Image Velocimetry) и LIF (Laser Induced Fluorescence). Работа содержит результаты, полученные при частичной поддержке Программы ОЭММПУ РАН «Интегрированные проблемы физической механики».

LARGE-SCALE STRUCTURES IN MULTIPHASE FLOWS

The wide class of multiphase shear flows including turbulent jets and wavy liquid films is considered in the paper from the point of view of large-scale structures development – coherent vortices and solitary nonlinear waves. The results of the experimental study of considered flows structure with the aid of PIV (Particle Image Velocimetry) and LIF (Laser Induced Fluorescence) are presented. The paper contains results obtained in the frame of RAS research program "Integrated models of physical mechanics".

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к струйным течениям обусловлен их широким распространением в различных технических приложениях: системы охлаждения, химические реакторы, горелки и т.п. Многообразие различных приложений порождает большой интерес к изучению струйных течений с различными конфигурациями и граничными условиями: свободные, импактные, пристенные струи, струйные течения с различными конструкциями сопел и т.п. Для управления интенсивностью тепломассопереноса на практике применяются методы активного и пассивного влияния на структуру потока: внесение внешних возмущений, внешняя закрутка потока на начальном участке и др. Одной из особенностей сильно закрученных потоков является возникновение зоны рециркуляции вблизи сопла, что может быть использовано для стабилизации пламени. Применение внешней закрутки потока в химических реакторах, например, приводит к более интенсивному тепломассобмену и, следовательно, к росту производительности таких устройств. Использование активных методов управления закрученными струями, таких как внешнее возмущение потока, позволяет контролировать интенсивность процессов перемешивания и переноса. Для понимания механизмов такого воздействия и адекватного описания необходимы детальные научные исследования с использованием современных полевых методов [1-10]. Применение современных методов диагностики позволяет получать новые результаты и для традиционных задач, таких теплообмен при взаимодействии струй с препятствиями. Одновременное использование полевых методов, позволяющих измерять мгновенные поля скорости (PIV) и мгновенные поля температуры (PLIF) дает возможность получать новые данные для понимания механизмов нестационарного теплообмена, значительную роль в котором играют крупномасштабные вихревые структуры.

Трехмерное волновое движение является последней и, во многих отношениях, наиболее значимой стадией волновой эволюции на стекающих пленках жидкости. На этой стадии поверхность пленки покрыта многочисленными трехмерными волнами, взаимодействующими друг с другом случайным образом, что дает основания ряду авторов уже при малых числах Рейнольдса пленочного течения применять при описании таких режимов термин «поверхностная турбулентность». Близким и практически значимым классом течений со свободной поверхностью являются дисперсно-кольцевые потоки, характеристики которых во многом определяются трехмерными волнами большой амплитуды, развивающимися на поверхности жидкой пленки. Еще одним важным классом гравитационного пленочного течения вязкой жидкости является ривулетное (ручейковое) течение. При течении ривулетов по наклонной плоскости кроме неустойчивости, приводящей к развитию сильно нелинейных трехмерных волн, реализуются и другие типы трехмерной неустойчивости, приводящие к меандрированию, или блужданию ривулета по плоскости. Нерегулярность и трехмерный характер движения жидкости существенно осложняют как теоретическое, так и экспериментальное исследование указанных типов течения, вследствие чего их описание в настоящее время носит во многом качественный характер. Исправление указанной ситуации, по всей видимости, невозможно без привлечения к исследованиям полевых методов диагностики.

Использованный для измерений метод Stereo PIV (Particle Image Velocimetry) (рис.1.1) обладает рядом преимуществ – бесконтактность, широкий динамический диапазон и др. В отличие от традиционных методов исследования потоков метод PIV позволяет измерять пространственные распределения мгновенной скорости течения [11]. Это, несомненно, дает возможность исследовать пространственную структуру сложнейших гидродинамических объектов и рассчитывать широкий спектр физических величин: пространственные корреляции, дифференциальные характеристики, спектры.



Рис.1.1. Стерео-PIV система ИТ СО РАН

Необходимость углубленной диагностики неизотермических многофазных реагирующих потоков требует разработки новых подходов для измерения мгновенных полей температуры и концентрации. Одним из наиболее перспективных методов в настоящее время признан метод флуоресцентной визуализации (LIF -Laser Induced Fluorescence), различные модификации которого позволяют измерять как поля температуры, так и концентрации дисперсной фазы (например, пузырьков в газожидкостных потоках). Для получения высокоточной экспериментальной информации необходимо развитие алгоритмов и аппаратуры для данного метода, это является наиболее доминирующей сейчас общемировой тенденцией в плане развития оптических методов диагностики [1]. Развитие данного метода является также одной из целей данной работы.

Основные **цели работы**: проведение комплекса исследований по диагностике и развитию методов управления крупномасштабными структурами в нескольких типах многофазных потоков – ограниченных турбулентных струях и стекающих пленках жидкости на основе низко- и высокоэнергетичного воздействия. Разработка и испытание новых экспериментальных методов для диагностики многофазных потоков на основе PIV и LIF. В работе представлены новые методы исследования газожидкостных и пленочных потоков и ряд полученных с их помощью результатов.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

2.1. Разработка метода плоскостной лазерноиндуцированной флуоресценции и диагностика осесимметричной газонасыщенной струи

Разработка новых методов диагностики пузырьковых потоков является в настоящее время одной наиболее актуальных проблем, поскольку большинство из известных традиционных подходов обладает рядом ограничений (теневой метод, ЛДА, GPD), и, в частности, позволяет работать только при малых значениях газосодержания. Кроме того, традиционные методики является, как правило, одноточечными. Предложенный авторами метод позволяет проводить измерения мгновенных полей скорости и локального газосодержания, в том числе и для потоков с высокими значениями объемного содержания газовой фазы.

Суть предложенного LIF подхода заключается в добавлении флуоресцентного красителя (например, Rhodamine) в рабочую жидкость. Выбранное сечение

потока освещается лазерным "ножом", при этом краситель переизлучает поглощенный свет как плоскость определенной толщины. Цифровая камера с оптическим фильтром, отсекающим излучение лазера, регистрирует излучение красителя. Пузыри, находящиеся в непосредственной близости от плоскости лазерного ножа, отражают и преломляют излученный красителем свет, формируя яркое кольцо на изображении. Анализ распределения интенсивности излучения в кольцах на последовательно экспонированных кадрах позволяет определить положение, размер и скорость отдельно взятых пузырей (см. Рис.2.1.1).

Калибровка предложенного метода проводилась на базе сравнения с результатами, полученными при помощи теневого (back-light) метода, имеющего высокую точность, но низкую локальность (близкую к значениям глубины резкости используемых оптических элементов). В качестве тестового объекта использовался генератор единичных пузырей.



Рис. 2.1.1. (*a*) Калибровочные изображения пузырей в теневом методе (слева) и методе LIF (справа). (*б*) PIV-LIF диагностика ближнего поля газонасыщенной осесимметричной струи. Изображение пузырей и трассеров в методе LIF (слева). Справа – мгновенное поле скорости несущей и дисперсной фазы, рассчитанное по изображению



Рис. 2.1.2. Сравнение глубины осреднения LIF и теневого метода

Метод LIF обладает несколькими существенными преимуществами по сравнению с теневым методом:

1. Высокая локальность – область осреднения практически не зависит от расстояния до объекта, если глубина резкости объектива достаточно велика (см. Рис. 2.1.2).

2. Максимальные значения объемного содержания газа, при которых может применяться LIF подход, существенно выше по сравнению с теневым методом.

3. LIF метод может быть использован одновременно с PIV в тех случаях, когда размер наименьших по размеру пузырей значительно превосходит размер трассеров, либо при использовании различных флуоресцентных красителей.

При использовании измерительной системы «ПОЛИС» разработанной в институте теплофизики СО РАН, предложенный метод применен для исследования гидродинамической структуры газонасыщенных свободных струй при Re=12000 и различных объемных содержаниях газа (β=0÷5 %). В результате измерены пространственные распределения статистических моментов пульсаций скорости жидкости, скорости пузырей и объемного газосодержания (до третьих моментов включительно), в том числе и смешанные корреляции. Проведено исследование влияния параметров газовой фазы (средний размер пузырей и газосодержание) на структуру потока. На рис. 2.1.3 представлены распределения третьих моментов для выбранного сечения однофазной и газонасыщенной импактных струй, показано существенное подавление интенсивности турбулентных пульсаций для данных условий. Основные результаты опубликованы в работах [12–17].



Рис. 2.1.3. Поток радиальной компоненты ТКЕ в радиальном направлении для свободной струи. Средний диаметр пузырей - $D_g = 0.85$ мм, газосодержание (слева-направо) $\beta = 0$ %, 2.4 %, 4.2 %

2.2. Метод PLIF для исследования теплообмена в жидкостях

Метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) — это полевой бесконтактный оптический метод измерения температуры и концентрации в потоках жидкости и газа, основывающийся на естественной флуоресценции молекул органического красителя. Интенсивность *I* излученного красителем света на единицу объема зависит от энергии лазера I_0 , квантового выхода ϕ , коэффициента абсорбции света красителем ε и его концентрации *C*:

$I = I_0 C \phi \varepsilon$.

Концентрация красителя предполагается достаточно малой, и ослаблением света при его распространении в растворе можно пренебречь. Для ряда красителей квантовый выход зависит от температуры, что позволяет измерять мгновенные распределения температуры в потоке. При полевых измерениях используется импульсный лазер, из луча которого формируется световой нож, и цифровая камера, регистрирующая излученный красителем свет. Дополнив установку второй камерой и добавив в поток отражающие свет частицы (трассеры), можно одновременно с полями температуры измерять поля скорости методом PIV в том же сечении потока.

Схема измерений. Объект исследования схематично изображен на рис. 2.2.1. Круглая струя, направленная вверх, натекает на горизонтальную электрически нагреваемую поверхность. Измерения проводились в пристенной части струи (выделенная область) при помощи комбинации методик PIV/PLIF. Сечение потока освещалось импульсным Nd:YAG лазером (532 нм), излучение от трассеров и флуорофора (Rhodamine B) разделялось при помощи дихроичного зеркала и регистрировалось цифровыми камерами с соответствующими светофильтрами. Для сопоставления изображений с двух камер применялась программная калибровка по изображениям мишени с приведением изображений к системе координат мишени. Использованные при этом процедуры обработки изображений аналогичны тем, что применяются для калибровки камер при Stereo PIV измерениях.

Обработка изображений в данном методе предполагает выполнение ряда операций по калибровке, реконструкции изображения и последующей коррекции.



Рис. 2.2.1. Схема потока и измерительная область. Тепловой поток Q = 5 BT/см². Re = 6000, H/d = 3



Рис. 2.2.2. Наложенные поля скорости и температуры вблизи импактной поверхности. Фрагмент течения выделен на рис. 2.2.1

<u>Результаты.</u> На рис. 2.2.2 приведен пример мгновенного поля температуры для следующих условий: $\text{Re} = U_0 d/v = 6000$, где d = 15мм – диаметр струи и U_0 – среднерасходная скорость. С учетом разработанных процедур коррекции суммарная погрешность метода в его настоящей реализации составила $0.24\div0.37^{\circ}$ С. Снижение пространственного разрешения поля температуры позволяет еще более снизить погрешность за счет шума камеры. Разброс результирующей погрешности в зависимости от положения на изображении связан с неоднородной освещенностью потока (особенности используемых лазеров), что приводит к различному вкладу шума камеры в сигнал для различных областей потока, а также с погрешностью процедур коррекции. Для анализа данных разрешение поля температуры снижалось до разрешения поля скорости осреднением по ячейкам 8×8.

В результате проведенных экспериментов получены ансамбли мгновенных полей скорости и температуры, а также распределения их взаимных корреляций. Показано, что для условий эксперимента около половины тепла отводится от нагреваемой поверхности за счет турбулентного механизма переноса. Основные результаты опубликованы в работах [18, 19].

2.3. Влияние внешнего периодического возмущения на структуру турбулентной закрученной струи

Среди активных методов управления структурой турбулентных потоков, наложение внешних периодических возмущений продольной скорости потока является одним из наиболее эффективных низко- и среднеэнергетичных методов активного управления интенсивностью турбулентного тепло- и массопереноса на начальном участке струи. Известно, что если для незакрученных и слабо закрученных струй внешнее возмущение приводит к увеличению интенсивности генерации осесимметричных (и спиралевидных в случае наличия азимутальной моды) крупномасштабных вихревых структур, то для сильно закрученных струй (являющихся наиболее выгодными с позиции интенсивности турбулентного перемешивания) данный эффект не наблюдается.

Целью данной части работы являлось экспериментальное исследование влияния внешнего периодического возмущения (с различной амплитудой) продольной скорости потока на выходе из сопла на гидродинамическую структуру свободных закрученных струй. Для измерений использовалась стерео PIV система "ПОЛИС". По сравнению с традиционными методами исследования потоков, использованный для измерения оптический метод PIV обладает существенным преимуществом – возможностью измерения мгновенных распределений скорости потока, и, как следствие, расчета пространственных характеристик (производные скорости и др.), а также анализа пространственной структуры потока в выбранный момент времени.

Число Рейнольдса, определенное по среднерасходной скорости U_0 , диаметру сопла d и кинематической вязкости воды v, равнялось 8.9×10^3 . Параметр закрутки S, определяемый геометрией завихрителей, монтировавшихся в предвключенный участок сопла, варьировался от нулевых до сравнительно больших значений ($S = 0 \div 1.0$). Внешнее периодическое возмущение потока осуществлялось на частотах St = 0.5 и 1.2 с различной амплитудой. Максимальная интенсивность флуктуаций продольной скорости потока соответствовала 27 % от U_0 , при этом в отсутствие возмущений она составляла 3.3 %.

В качестве примера, на Рис. 2.3.1. представлены пространственные распределения азимутальной компоненты кинетической энергии турбулентности для случая сильно закрученной струи как в отсутствие, так и при наложении внешних возмущений. Видно, что имеет место существенное увеличение интенсивности турбулентных пульсаций и, следовательно, интенсивности турбулентного перемешивания в струе.

Анализ пространственной структуры сильно закрученной струи (являющейся наиболее выгодной с позиции турбулентного перемешивания, что важно, например, в горелочных устройствах) показал, что при достаточно большой амплитуде возмущения (>5%) имеет место значительное увеличение интенсивности турбулентности за счет генерации крупномасштабных вихревых структур, вращающихся в обратном направлении по отношению к основной закрутке потока (см. Рис. 2.3.2).



Рис. 2.3.1. Пространственное распределение азимутальной компоненты кинетической энергии турбулентности для закрученной струи, S = 1.0. a) St = 0; б) St = 1.2 $u'_0/U_0 = 5\%$



Рис. 2.3.2. Пространственное распределение азимутальной компоненты мгновенной скорости для закрученной струи, S = 1.0. a) St = 0; б) St = 1.2 $u'_0/U_0 = 5\%$

Такая информация является принципиально новой, поскольку предыдущие исследования предсказывали отсутствие реакции сильно закрученного потока на возмущения (со сравнительно малой амплитудой).

2.4. Экспериментальное исследование структуры пламени при обедненном предварительно перемешанном горении

Ужесточение экологических требований обуславливает необходимость проектированияе новых камер сгорания, работающих при минимальных выбросах вредных веществ. К настоящему времени, обедненное предварительное перемешивание компонент топлива и воздуха обладает самым высоким потенциалом сокращения выбросов NOx среди всех известных технологий сжигания. Практическое применение этой технологии затруднено тем, что обеднённое горение подвержено влиянию неустойчивостей, вызванных различными факторами. Одним из источников неустойчивости, ограничивающих диапазон параметров при работе камер обедненного сгорания, является гидродинамическая неустойчивость сдвигового потока, сопровождающаяся образованием крупномасштабных вихревых структур (КВС). Известно, что наложение внешних периодических возмущений начальной скорости потока приводит к интенсификации процесса генерации КВС и, как следствие, стабилизации пламени за счет более интенсивного турбулентного перемешивания, что может быть использовано для увеличения эффективности камер сгорания.

Данная часть работы направлена на детальное экспериментальное исследование роли крупномасштабных вихревых структур в стабилизации пламени при горении предварительно перемешанных компонент топлива и воздуха (стехиометрически обедненная смесь).

Измерения проводились при использовании бесконтактного метода PIV. В работе использовалась описанная выше PIV система "ПОЛИС" (см. Рис. 1). Поток засевался частицами оксида алюминия (средний диаметр 3 мкм). Для регистрации частиц, рассеивающих лазерное излучение (532 нм) использовались узкополосные оптические фильтры.

Получены ансамбли полей мгновенной скорости для ряда режимов, характеризующихся различными степенями закрутки, числами Рейнольдса, стехиометрическим составом.

На Рис. 2.4.1 представлены различные режимы горения для слабозакрученной струи с предварительноым перемешиванием компонент. Рисунок 2.4.2. показывает мгновенное распределение скорости в пламени, измеренное методом PIV. Можно надежно идентифицировать крупномасштабные вихревые структуры в пламени, наличие которых открывает дополнительные возможности по управлению структурой потока, в частности, при помощи внешних наложенных колебаний. Это может являться базой для оптимизации по повышению устойчивости пламени в условиях сжигания обедненных смесей.



Рис. 2.4.1. Различные режимы горения в закрученной струе с S = 0,41, d = 15 мм. (*a*) – Re = 1900, $\Phi = 1.3$; (*б*) – Re = 2000, $\Phi = 3.2$; (*в*) – Re = 3500, $\Phi = 3.1$



Рис. 2.4.2. Мгновенное поле скорости в пламени без закрутки. S = 0, d = 15 мм, Re = 3200, $\Phi = 2.2$

3. ТРЕХМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКАЮЩИХ ПЛЕНОК ЖИДКОСТИ

3.1 Эволюция трехмерных волн на поверхности стекающих пленок жидкости

В данной части работы представлено продолжение экспериментального поиска стационарных уединенных волн на поверхности вертикально стекающих пленок жидкости. Интерес к стационарным уединенным трехмерным волнам связан как с тем, что их существование для относительно больших чисел Рейнольдса пленочного течения предсказывается существующими теориями так и с тем, что по современным представлениям именно через взаимодействие таких волн происходит переход к «поверхностной турбулентности» в пленочных течениях при малых и умеренных расходах жидкости. Эксперименты проводились с использованием метода LIF на пленках, стекающих по вертикальной стеклянной пластине при умеренных числах Рейнольдса. В результате экспериментов зарегистрирована стационарная уединенная волна при числе Рейнольдса пленочного течения Re = 10 (Рис. 3.1.1).



Рис. 3.1.1. Вид трехмерной стационарной волны при Re = 10. а) пространственная форма; б), в) –форма в сечениях, проходящих через вершину волны в продольном и поперечном направлениях

Волна имеет такую же подковообразную форму, как и стационарные волны, зарегистрированные ранее при малых числах Рейнольдса (Re < 5), но, в отличие от случая малых Re ее амплитуда и скорость существенно отличаются от предсказываемых теорией значений [20–22]. Последний факт требует дальнейшей проверки и проведения дополнительных исследований по поиску трехмерных стационарных волн при умеренных числах Рейнольдса с использованием рабочих жидкостей с существенно разными физическими свойствами.

3.2 Волновые структуры на поверхности ривулетов стекающих по вертикальной пластине

Ривулетное течение жидкости имеет ряд отличительных особенностей по сравнению с течениями неограниченных пленок, что связано с наличием контактного угла смачивания [23].

С использованием метода LIF проведено экспериментальное исследование частотной восприимчивости прямых ривулетов, стекающих по вертикальной пластине, к внешним возмущениям, создаваемым малыми пульсациями расхода [204–246]. В качестве рабочей жидкости использовался 25 % водоглицериновый раствор. Расход жидкости Q менялся от 0.2 до 4.8 мл/с, а соответствующие числа Рейнольдса, $\text{Re} = Q/(b_0 v)$ от 10.4 до 87, где b_0 – измеренное значение ширины установившегося гладкого ривулета; v – кинематическая вязкость жидкости.

Диапазон частот возбуждения составлял от 0.5 Гц до 50 Гц, что позволило реализовать режимы как с крупными солитонообразными волнами, так и с высокочастотными волнами малой амплитуды при одних и тех же расходах жидкости. Измерения мгновенного распределения поля толщин позволили получить детальные картины волновой поверхности ривулета для различных волновых режимов и чисел Рейнольдса. Для всех расходов наблюдается область частот, когда амплитуда возбуждённых волн максимальна и сравнима с толщиной ривулета (Рис 3.2.1). При более высоких частотах возбуждения, реализуются режимы с небольшой относительно средней толщины амплитудой, по форме близкие к синусоидальным, а в области низких частот возбуждения форма развитых волн близка к ступенчатой (Рис 3.2.2).



Рис 3.2.1. Регулярные волны большой амплитуды при ривулетном течении жидкости



Рис 3.2.2. Форма развитой волны в виде «ступеньки» при низкой частоте возбуждения

Обнаружено, что при определённых частотах возбуждения имеет место существенное увеличение площади поверхности, смачиваемой ривулетом (Рис. 3.2.3), при этом контактный угол смачивания остается постоянным для всех частот возбуждения.

3.3 Характеристики волн ряби на поверхности пленки жидкости при опускном дисперснокольцевом течении

При помощи метода LIF проведены измерения характеристик волн ряби на поверхности пленки жидкости при опускном кольцевом течении жидкости и турбулентного газа в вертикальном канале цилиндрической формы. Измерения проведены в диапазоне среднерасходных скоростей газа 10÷60 м/с при докритических (безуносных) числах Рейнольдса пленочного течения (16<Re<40). Показано, что амплитуда волн ряби, измеренная методом LIF, значительно превышает амплитуду, измеренную методом электропроводности (Рис. 3.3.1), поскольку низкое пространственное разрешение последнего приводит к осреднению мелкомасштабных структур на поверхности пленки [27–29].

Указанное ограничение метода электропроводности является принципиальным и его необходимо учитывать при интерпретации полученных с его помощью результатов. Сделанное замечание имеет важное значение, поскольку практически вся представленная в литературе информация о волновой структуре пленок в дисперсно-кольцевых потоках получена с использованием метода электропроводности.



Рис. 3.2.3. Зависимость относительной ширины ривулета от частоты возбуждения. Ширина безволнового ривулета принята за 100%



Рис. 3.3.1. Зависимость средней амплитуды волн ряби от скорости газа при разных числах Рейнольдса (Re) пленочного течения. Проводимость I - датчики с вделанными заподлицо со стенкой канала электродами. Проводимость II – датчики с вынесенными в поток электродами

Определены основные характеристики волн ряби – средняя амплитуда, средняя длина волны, средняя скорость. Выявлены режимы, где свойства волн слабо меняются с расстоянием вниз по потоку и волновую каартину можно считать установившейся (при скоростях газа 20 м/с и более). На этих режимах предполагается провести исследование сценариев взаимодействия волн.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты развития и применения к исследованию структуры многофазных течений новых полевых методов диагностики на основе PIV и LIF. Показана эффективность этих методов для решения задач гидродинамики, требующих детального представления тонкой структуры течений.

Разработан новый LIF-метод измерения характеристик газонасыщенных потоков, с использованием которого проведено исследование влияния параметров газовой фазы (средний размер пузырей и газосодержание) на структуру турбулентной пузырьковой струи.

С одновременным использованием систем PIV и PLIF диагностики проведено исследование локального теплообмена в пристенной области импактной струи.

С использованием метода стерео PIV исследовано влияние внешнего периодического возмущения на структуру турбулентной закрученной струи. Анализ пространственной структуры струи с высокой степенью закрутки струи показал, что при достаточно большой амплитуде возмущения имеет место значительное увеличение интенсивности турбулентности за счет генерации крупномасштабных вихревых структур, вращающихся в направлении, обратном к основной закрутке потока. Такая информация является принципиально новой, поскольку предыдущие исследования предсказывали отсутствие реакции сильно закрученного потока на внешние возмущения.

Разработаны подходы для диагностики ламинарных и турбулентных пламен. Развитие методов управления устойчивостью струйного сжигания предварительно перемешанных смесей, в том числе с использованием закрутки и внешнего возбуждения потока, является необходимым при разработке подходов для низкоэмиссионного сжигания топлив.

Метод LIF использован для детального исследования структуры и характеристик волн, возникающих на межфазной поверхности при различных типах пленочного течения жидкости. С его помощью получены новые данные о характеристиках уединенных трехмерных волн при умеренных числах Рейнольдса пленочного течения; получена информация о типах и форме регулярных волн, развивающихся на ривулетах, стекающих по вертикальной плоскости. Проведенные с использованием метода LIF измерения характеристик волн ряби в дисперсно-кольцевом течении показали, что их амплитуда значительно превышает значения, представленные в литературе, что связано с принципиальными ограничениями применявшихся ранее методов измерения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа выполнена при поддержке Программы ОЭММПУ РАН «Интегрированные модели физической механики», а также грантов РФФИ №№ 07-08-00213, 06-01-00762, 06-08-01418, 07-08-01501, 07-08-12254-офи.

Соавторами данной работы являются все исполнители по данным программам, которым авторы статьи выражают благодарность: Е.К. Ахметбеков, В.А. Антипин, А.В. Бобылев, В.В. Гузанов, Д.В. Крей, Ю.А. Ложкин, Ю.С. Козорезов, А.С. Небучинов, М.П. Токарев, А.В. Черданцев, С.И. Шторк и др.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

d – диаметр сопла, м;

- *D*_g средний диаметр пузырей, м;
- Н-толщина пленки жидкости, м;
- p давление, H/M^2 ;
- Q объемный расход жидкости, м³/с;
- $q_{\rm c}$ плотность теплового потока на стенке; Вт/м²;

и – продольная компонента скорости, м/с;

- *v* поперечная компонента скорости, м/с;
- *w* азимутальная компонента скорости, м/с;
- β объемное газосодержание, %;
- v −кинематическая вязкость, м²/с;

Индексы:

- θ относящиеся к срезу сопла;
- *i* порядковый номер орта системы координат;
- *k* номер экспериментальной точки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sergey V. Alekseenko, Artur V. Bilsky, Vladimir M. Dulin and Dmitriy M. Markovich Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // Int J Heat Fluid Flow, 2007, v.28, pp.1340-1359
- Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., and Markovich D.M. Experimental Investigation of Free and Impinging Swirling Turbulent Jets with Different Inflow Conditions // Proc 5th Int. Symp. On Turbulence and Shear Flow Phenomena, Garching, Germany, 27-29 august 2007, v.3, pp. 1311-1317
- Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M. and Markovich D.M. Experimental study of hydrodynamic structure of free and impinging turbulent jets using Stereo PIV // Proc. 7th Int. Symp. On Particle Image Velocymetry, Rome, Italy, 11-14 Sept 2007, on CD, p.12
- Алексеенко С.В., Бильский А.В., Дулин В.М., Маркович Д.М. Экспериментальное исследование турбулентной структуры ограниченных и свободных закрученных струйных течений методом стерео PIV // Тезисы докладов XXI Всероссийского семинара «Струйные, отрывные и нестационарные течения», 15-18 августа 2007г., Новосибирск, стр.4–6
- Алексеенко С.В., Маркович Д.М., Количественная визуализация сдвиговых течений//Тезисы докладов XXI всероссийского семинара «Струйные, отрывные и нестационарные течения», Новосибирск, 15-18 августа 2007 г., С. 6–8
- Дулин В.М., Козорезов Ю.С. (2007) Влияние внешнего периодического возмущения на структуру турбулентной закрученной струи. //Всероссийская школа-семинар молодых ученых "Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии", ИТ СО РАН, Новосибирск, 8-12 октября

- Алексеенко С.В., Бильский А.В., Дулин В.М., Маркович Д.М. Экспериментальное исследование турбулентной структуры струйных течений методом PIV // Сборник докладов Международной конференции Потоки и структуры в жидкостях, 02-05 июля 2007г., Санкт-Петербург, стр. 149–151
- Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M. Hydrodynamic structure of swirling free and impinging jets. // Experiments in Fluids (2008), направлена в печать
- Alekseenko S.V., Dulin V.M., Kozorezov Yu.S., Markovich D.M. Experimental study of swirling turbulent jets with different inflow conditions. // Int. J. Heat and Fluid Flow (2008), подана в печать
- Маркович Д.М. «Многофазные потоки в энергетических приложениях. Управление и диагностика» // Материалы III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики», 21-23 ноября 2007 г. Екатеринбург, с. 265-267 с.
- Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии, 2007, том 12, №3, стр.109–131
- Akhmetbekov Ye.K., Alekseenko S.V., Dulin V.M., Markovich D.M., Pervunin K.S. (2007) Application of novel PLIF technique combined with PIV and PTV to bubble turbulent jets study. //Proc. of 7th Int. Symp. on Particle Image Velocimetry, Rome, Italy, 11-14 September 2007, on CD, p.12
- Маркович Д.М., Первунин К.С. Исследование структуры газонасыщенной импактной струи методом лазерноиндуцированной флуоресценции // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2007, т.2, в.3, с.16–20
- 14. Ахметбеков Е.К., Дулин В.М., Первунин К.С. Экспериментальное исследование турбулентной структуры газонасыщенной осесимметричной струи // Труды V научной школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», 24-30 сентября 2007, Алушта, Украина, с.12, на CD
- 15. Первунин К.С. Исследование структуры газонасыщенной импактной струи методом лазерно-индуцированной флуоресценции // Тезисы докладов XLV международной научной студенческой конференции, с.40–41, 10–12 апреля 2007, Новосибирск, НГУ
- 16. Ахметбеков Е.К., Дулин В.М., Первунин К.С. Экспериментальное исследование турбулентной структуры газонасыщенной осесимметричной струи//Тезисы докладов всероссийской школы-семинара молодых ученых «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии», посвященная 50-летию ин-та теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, с.15-16, 8-12 октября 2007, Новосибирск
- 17. Ахметбеков Е.К., Дулин В.М., Первунин К.С. (2007) Исследование структуры газонасыщенной импактной струи методом лазерно-индуцированной флуоресценции. // Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках", Санкт-Петербург, СПбГПУ, 21-25 мая 2007, Т.2, стр. 455–458
- Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Небучинов А.С. Исследование теплообмена в импактной струе методом PLIF в комбинации с PIV // Труды V научной школы-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», 24-30 сентября 2007, Алушта, Украина, с.12, на CD

- Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. Метод plif для исследования теплообмена в жидкостях // Материалы IX Международной научно-техническая конференция "Оптические методы исследования потоков" Москва, 26 - 29 июня 2007 г., стр. 406-409
- 20. Гузанов В.В., Харламов С.М. Экспериментальное исследование эволюции трехмерных волн на поверхности вертикально стекающих пленок жидкости./ Вестник НГУ. Серия : Физика.2007 Т. 2, Вып.3, С. 3 – 7.
- Alekseenko S., Antipin V., Guzanov V., Kharlamov S., Markovich D. Evolution of solitary three-dimensional waves on vertically falling liquid films// DVD-ROM Proceedings of 6th International Conference on Multiphase Flow. Leipzig, Germany, July 9-13, 2007. S5_Wed_C_37, 4 p
- 22. Гузанов В.В. Экспериментальное исследование эволюции трёхмерных волн на поверхности вертикально стекающих плёнок жидкости // Материалы XLV Международной Научной Студенческой Конференции «Студент и научно-технический прогресс.».Россия, Новосибирск, 10 - 12 апреля 2007, с. 22–23
- Alekseenko S.V., Antipin V.A., Bobylev A.V., Markovich D.M., 2007. Application of PIV to Velocity Measurements in a Liquid Film Flowing Down an Inclined Cylinder // Exp. Fluids. Vol. 43, № 2 3, Pp. 197–207
- 24. Бобылев А.В., Гузанов В.В., Харламов С.М., Маркович Д.М., Антипин В.А., Волновое течение ривулетов по вертикальной пластине // Труды IX межд. науч.-техн. конф. ОМИП - 2007, Москва, 26 июня - 29 июня, 2007. С. 354 -357
- 25. Бобылев А.В, Гузанов В.В., Волновое течение ривулетов по вертикальной пластине // Труды V межд. научной школы - конф. Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики, Алушта, 24 сентября - 30 сентября, 2007. С. 53–57
- 26. Бобылев А.В, Гузанов В.В., Волновое течение ривулетов по вертикальной пластине // Труды научной школысеминара Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии, Новосибирск, 8 октября - 12 октября, 2007. С. 27 – 28
- 27. Черданцев А.В. Исследование свойств волн возмущения в дисперсно-кольцевом течении методом условного фазового осреднения. XVI школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», Санкт-Петербург, Россия, 21-25 мая 2007 г. Т.1., с. 298–301.
- Alekseenko S.V., Cherdantsev A.V., Kharlamov S.M., Markovich D.M. Experimental Study of Liquid Film Wavy Structure in Annular Two-Phase Flow. 6th International Conference on Multiphase Flow, Leipzig, Germany, July 9 – 13, 2007, DVD-ROM Proceedings, PS5_2
- 29. Черданцев А.В., Крей Д.В. Исследование эволюции волн ряби на начальном участке дисперсно-кольцевого течения методом флуоресцентной визуализации. Всероссийская школа-семинар молодых ученых «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии», Новосибирск, 8-12 ноября 2007 г., с. 135–136