ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПОТОКА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Небучинов А.С.

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

АННОТАЦИЯ

Целью работы является экспериментальное исследование нестационарного теплообмена в импактной струе, натекающей на нагреваемую поверхность, с наличием крупномасштабных структур и отрывных течений, а также поиск возможных механизмов управления теплообменом путем внесения в поток внешний возмущений.

В работе проведен цикл экспериментов по исследованию осесимметричной струи, натекающей нормально на нагреваемую поверхность. Струя находилась как в естественных условиях при разных режимах истечения, так и при внешнем возбуждении на различных частотах и амплитудах. Измерены мгновенные и средние поля скорости и температуры в пристенной части струи с помощью методов PIV и PLIF. Рассчитаны корреляции пульсаций скорости и пульсаций температуры, характеризующие интенсивность турбулентного переноса тепла. Показано, что при различных частотах внешнего возбуждения струи интенсивность турбулентного переноса в области натекания струи на стенку изменяется. В области натекания струи на стенку зафиксирован отрыв потока. Показано, что взаимодействие когерентной структуры со стенкой приводит к локальному увеличению оттока тепла от нагреваемой поверхности. Также измерены распределения коэффициента теплообмена вдоль нагреваемой поверхности при помощи тепловизионной камеры при различных режимах истечения, расстояний от среза сопла до преграды, частотах и амплитудах внешнего возмущения потока. Показано, что при возбуждении струи при различных частотах возбуждения струи, происходит усиление либо ослабление теплообмена.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

PIV ..... Particle Image Velocimetry
PLIF ..... Planar Laser Induced Fluorescence
Re ..... Число Рейнольдса
Nu ..... Число Нуссельта
Sh ..... Число Струхаля
V, U ..... Радиальная и продольная компоненты средней скорости жидкости, [м/с]
U_0 ..... Среднерасходная скорость потока, [м/с]
f ..... Частота внешних возмущений [Гц]
D ..... Выходной диаметр сопла, [м]
h ..... Расстояние от сопла до импактной поверхности, [м]
r ..... Радиальная компонента системы координат
q ..... Поток тепла [Вт/см^2]
ν ..... Кинематическая вязкость жидкости, [м^2/с]

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность теплообменных процессов во многом определяет характеристики промышленных аппаратов, их надежность и долговечность, а также качество получаемого продукта. В этой связи задача исследования теплообменных процессов является одной из наиболее актуальных на сегодняшний день. Преимущества струйного охлаждения над другими способами интенсификации – это высокая интенсивность теплообмена при относительно небольших затратах энергии на создание потока, простота и гибкость управления процессом. Кроме того, коэффициент теплоотдачи струи, натекающей нормально на преграду, значительно больше, чем при продольном обтекании поверхности. Струйный нагрев и охлаждение применяются в металлургии при выплавке металлов, в энергетике в различного рода теплообменных устройствах, в электронике для охлаждения нагревающихся элементов интегральных микросхем и мощных процессоров. Широта практического применения ограниченных струйных течений обуславливает необходимость изучения фундаментальных физических эффектов и явлений, их сопровождающих. С точки зрения современной науки импактные струи являются сложным для моделирования течением. В различных областях потока присутствуют свободные и пристенные сдвиговые слои с развивающимися в них вихревыми структурами; область натекания струи с максимальными коэффициентами тепломассобмена; в пристенной части струи имеют место

локальный нестационарный отрыв потока. Все эти явления по отдельности и вместе требуют тщательного изучения.

Известно, что теплообмен в струе полностью определяется гидродинамикой. Значительный вклад в теплообмен дают вихревые когерентные структуры и отрывные течения, индуцированные этими структурами. Когерентные структуры – крупные вихри, имеющие повторяющуюся структуру и остающиеся когерентными на значительных расстояниях вниз по потоку. Замечено, что при наложении возмущения (пульсации скорости) структура потока значительно изменяется, даже если амплитуда возмущения существенно меньше амплитуды собственных пульсаций скорости в струе. Воздействуя на поток возмущениями различной частоты можно добиться как усиления когерентных структур, так и их ослабления. Вследствие изменения гидродинамики натекающей на преграду струи изменяется интенсивность теплообмена. Возбуждение струи на разных частотах приводит как к усилению интегрального теплообмена, так и к его ослаблению [1]. Это открывает возможность для создания высокоэффективных подходов к управлению интенсивностью струйного теплообмена. Однако при этом необходимо понимание процессов переноса в пристенной части струи. При всем многообразии работ, посвященных исследованию гидродинамических и теплообменных процессов, механизмы переноса тепла, роль когерентных структур и локальных отрывов в настоящий момент являются слабо изученными.

Целью данной работы является экспериментальное исследование нестационарного теплообмена в импактной струе с наличием крупномасштабных структур и отрывных течений, а также поиск возможных механизмов управления теплообменом путем внешнего возмущения потока. Для решения поставленной задачи используются оптические методы измерения мгновенных полей скорости (Particle Image Velocimetry - PIV) и мгновенных полей температуры (Planar Laser Induced Fluorescence - PLIF), а также тепловизионный метод для измерения интенсивности теплообмена на нагреваемой импактной поверхности.

МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ PIV И PLIF

Для реализации поставленных задач в работе применялись оптические методы измерения полей скоростей (PIV) и температур (PLIF).

Основа двумерной реализации метода анемометрии трассирующих частиц (PIV) заключается в измерении смещения помещённых в поток частиц (трассеров) за известный интервал времени. Результатом измерения являются мгновенные двухкомпонентные поля скорости в измерительной плоскости, создаваемой лазерным ножом [2]. Размер, плотность и объёмная концентрация частиц подбираются таким образом, чтобы влияние второй фазы на поток и влияние плавучести частиц были минимальными. Кроме этого, очень важным параметром является оптическая прозрачность среды. В потоках жидкости используются, как правило, твёрдые частицы с плотностью, близкой к плотности среды.

Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены минимум дважды. В качестве источника освещения обычно используются два импульсных Nd:YAG лазера, работающих на одной оптической оси. Это позволяет получать малую временную задержку между импульсами. Пучок света от лазера преобразуется в световое поле («нож»). Временная задержка между вспышками источника света подбирается в зависимости от скорости потока и размера измерительной области. Вспышка источника света создаёт стробоскопический эффект в измерительной плоскости потока. Свет, отражённый частицами, попавшими в освещённую область, регистрируется камерой в виде последовательности изображений. Для восстановления поля скорости использовались подробно описанные в работе [7] алгоритмы.

Метод плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) предназначен для измерения температуры и концентрации в потоках жидкости и газа. Основными преимуществами метода по сравнению с другими способами измерения температуры (термопары, ИК детекторы и др.) являются возможность регистрации мгновенных полей в выбранном внутреннем сечении потока и невозмущающий характер измерений. Еще одно достоинство метода – возможность одновременно с полями температуры измерять поля скорости методом анемометрии трассирующих частиц (PIV) в том же сечении потока. Данная информация позволяет рассчитывать корреляции между потоком тепла и потоком импульса и является важной для понимания процессов переноса, как в классических задачах тепломассопереноса, так и в реальных технологических аппаратах.

Метод PLIF основывается на естественной флуоресценции молекул органического красителя, возбуждаемой лазерным излучением. Интенсивность I излученного красителем света на единицу объема зависит от энергии возбуждающего света I_0, квантового выхода красителя ϕ, коэффициента абсорбции света красителем ε и его концентрации в растворе C [3]:

$$I = I_0 C \phi \varepsilon \qquad (1)$$

Концентрация красителя предполагается достаточно малой, и ослаблением света при его распро-

странении через раствор можно пренебречь. Для ряда красителей квантовый выход зависит от температуры, что позволяет измерять мгновенные распределения температуры в потоке. При полевых измерениях для освещения сечения потока используется импульсный лазер, из луча которого формируется световой нож. Так как флуоресценция происходит на большей длине волны, чем поглощение, то излученный красителем свет можно отделить от света лазера при помощи светофильтра и зарегистрировать цифровой камерой. Дополнив установку второй камерой и добавив в поток отражающие свет частицы, можно одновременно с полями температуры измерять поля скорости методом PIV в том же сечении потока [3, 4]. Основными источниками погрешности измерений в методе PLIF являются нестабильность энергии лазерного импульса, непостоянство ее распределения по лучу и тепловой шум камеры. Процедуры обработки мгновенных PLIF изображений должны компенсировать влияние этих факторов для снижения погрешности измерений. Подробнее метод PLIF и процедуры обработки данных описаны в работе [6].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Эксперимент с импактной струей проводился на установке, которая представляет собой замкнутый гидродинамический контур, состоящий из рабочего участка с исследуемым объектом, системы трубопроводов, расходомерной шайбы, измерителем расхода «САПФИР», термостата, насоса, вибратора (рис.1). При применении метода PIV/PLIF рабочей жидкостью являлся раствор флуоресцентного красителя Родамин B (Rhodamine B) в воде (концентрация 100 мкг/л) с добавлением отслеживающих поток полиамидных частиц (трассеров) плотность которых близка к плотности воды. Общий объём рабочей жидкости 300 литров. Внутренние геометрические размеры рабочего объема, изготовленного из оргстекла – 1×0,5×0,5 м.

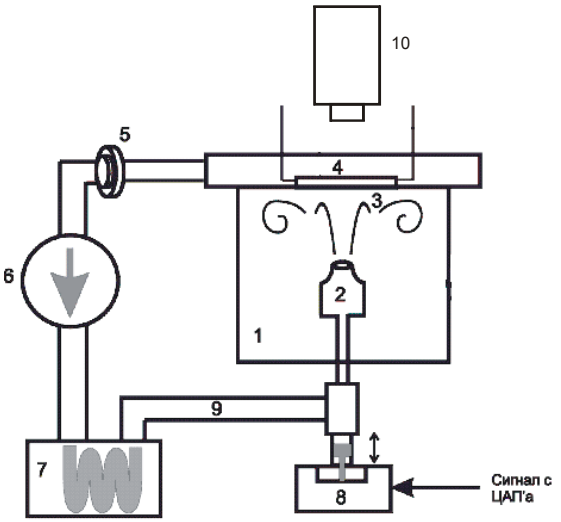

Рис.1 Схема установки с тепловизором. 1 – рабочий объём, 2 – сопло Витошинского (D = 15 мм), 3 – преграда, 4– нагревательный элемент, 5 – расходомерная шайба, 6 – насос, 7 – термостат, 8 – источник внешнего возбуждения - вибратор, 9 – трубопровод, 10 - тепловизор

Объект исследования – осесимметричная импактная затопленная струя, ориентированная вертикально. Сопло имеет форму, рассчитанную по профилю Витошинского с диаметром на срезе сопла D = 15 мм.

Для осуществления нагрева импактной поверхности был создан нагревательный элемент, представляющий собой фольгу из нержавеющей стали (толщина 0,125 мм, размер 15×3 см), приклеенную на текстолитовое основание. Нагрев фольги производился при помощи программируемого источника питания постоянного тока мощностью до 1000 Вт. Точность установки тока (в режиме стабилизации тока) ≈0,16 А. Измерения температуры на нагреваемой поверхности проводились с помощью тепловизионной камеры FLIR Titanium 550M, которая закреплялась сверху нагревателя и фиксировала температуру на внешней стороне фольги нагревательного элемента.

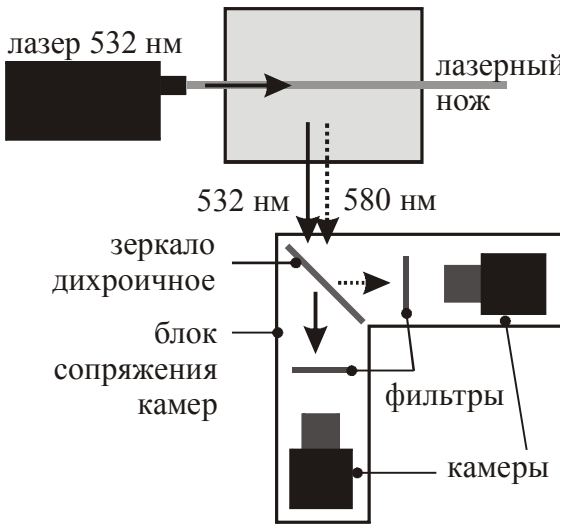

Рис.2 Схема установки оборудования PIV/PLIF системы (вид сверху).

Возмущения потока создавались при помощи электромагнитного вибратора. Вибратор создавал периодические колебания расхода на срезе сопла заданной амплитуды и частоты. Напряжение на вибраторе задавалось при помощи 12 разрядного ЦАП через делитель напряжения и усилитель. Подаваемые возмущения предполагались одномерными, так как вся механическая вибрационная система была осесимметричной.

Важным условием эксперимента является термостабилизация всего гидродинамического контура. Постоянная температура в системе поддерживалась при помощи термостата, использующего термометр сопротивления. Температура задавалась с точностью ≈ 0,1° С.

Измерения проводились в пристенной части струи при помощи комбинации методов PIV/PLIF с использованием Stereo-PIV измерительной системы «ПОЛИС». Схема установки лазера и камер приведена на рис.2. Измерительная плоскость в потоке освещается двойным импульсным Nd:YAG лазером Расстояние от ближнего края установки до лазера – $150 мм$. Угол раскрытия лазерного ножа – 3°. Толщина лазерного «ножа» – $1 мм$. Временная задержка между импульсами – 184 мкс. Интенсивность лазерного излучения составляла 50 мДж в импульсе. В качестве трассеров использовались полиамидные частицы размером 20 мкм, плотностью 1,05 гр/см^3.

Рассеянный трассерами и излученный флуорофором свет разделялся при помощи дихроичного зеркала, отражающего свет с длинами волн более 540–550 нм и пропускающего свет с меньшими длинами волн. Пропущенный и отраженный зеркалом свет регистрировался на две цифровые камеры с соответствующими светофильтрами. Для регистрации одной области пространства двумя камерами камеры устанавливались на специальное устройство сопряжения, как показано на рис.2. Камеры располагались на металлической основе перпендикулярно друг другу. PIV-камера ориентирована так, что плоскость её матрицы находится параллельно плоскости лазерного ножа. Используемые камеры (Видеоскан 205-2001) позволяют регистрировать два кадра с малой (от 20 мкс) задержкой, что необходимо для измерения скорости методом PIV. Разрядность АЦП камер составляет 10 бит.

Управление камерой и лазером осуществлялось с компьютера при помощи программного обеспечения «ActulFlow» и синхронизатора «ПОЛИС», который синхронизировал работу камер и лазера.

Динамический диапазон измеряемых скоростей зависит от размера элементарной измерительной области. В данном эксперименте использовалось разбиение на области размера $32 \times 32 пикс$, поэтому динамический диапазон равен 80 (при использовании итерационного алгоритма он расширяется до 200). Погрешность измерений мгновенного поля скорости 10%.

Точность измерений мгновенной температуры с помощью PLIF метода составляло ≈0,3° С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Работа состояла из двух частей. В первой измерялось распределение температуры на нагреваемой поверхности с помощью тепловизора, что позволило посчитать распределение числа Нуссельта на преграде при различных режимах истечения струи, расстояниях от среза сопла до импактной поверхности и при разных частотах и амплитудах внешнего возмущения потока. В данных экспериментах для каждого режима было проведено 10000 реализаций мгновенной температуры, по которым проводилось усреднение. Нагревательный элемент выделял постоянный поток тепла $q=1,1 Вт/см^2$ во всех исследованиях с применением тепловизора.

Первый эксперимент в первой части проводился в струе с расстояниями от среза сопла до стенки *h/D=1; 3*. Эксперимент проводился для различных чисел Рейнольдса (*Re=2000-17400*) без возбуждения.

На рисунке 3 (а, б) представлены распределения числа Нуссельта (*Nu*) в зависимости от числа Рейнольдса (*Re*) при расстоянии от среза сопла до преграды *h/D=1* и *3* соответственно.

Видно, что при увеличении Re коэффициент теплообмена тоже возрастает в обоих условиях. Причем в случае с *h/D=3* (Рис.3(б)) в центре струи наблюдается локальный минимум коэффициента теплообмена. В области натекания крупномасштабных вихрей на преграду (r/D≈0,8) наблюдается максимум. При больших числах Re наблюдается вторичный локальный максимум числа Нуссельта, находящийся на расстоянии порядка 2-ух калибров от оси сопла (r/D≈2), вторичный максимум тоже становится более выраженным и значительным при увеличения числа Рейнольдса. Гидродинамический пограничный слой у стенки остается ламинарным до расстояний порядка 1,5–2 калибров сопла от критической точки. На этих расстояниях происходит турбулизация пограничного слоя и, как следствие, интенсификация уноса тепла. В этой области возникает отрывное течение вблизи стенки, которое формируется из-за локальных положительных градиентов давления, индуцированных когерентными структурами. Такой механизм уноса тепла описан, например, в работе [3].

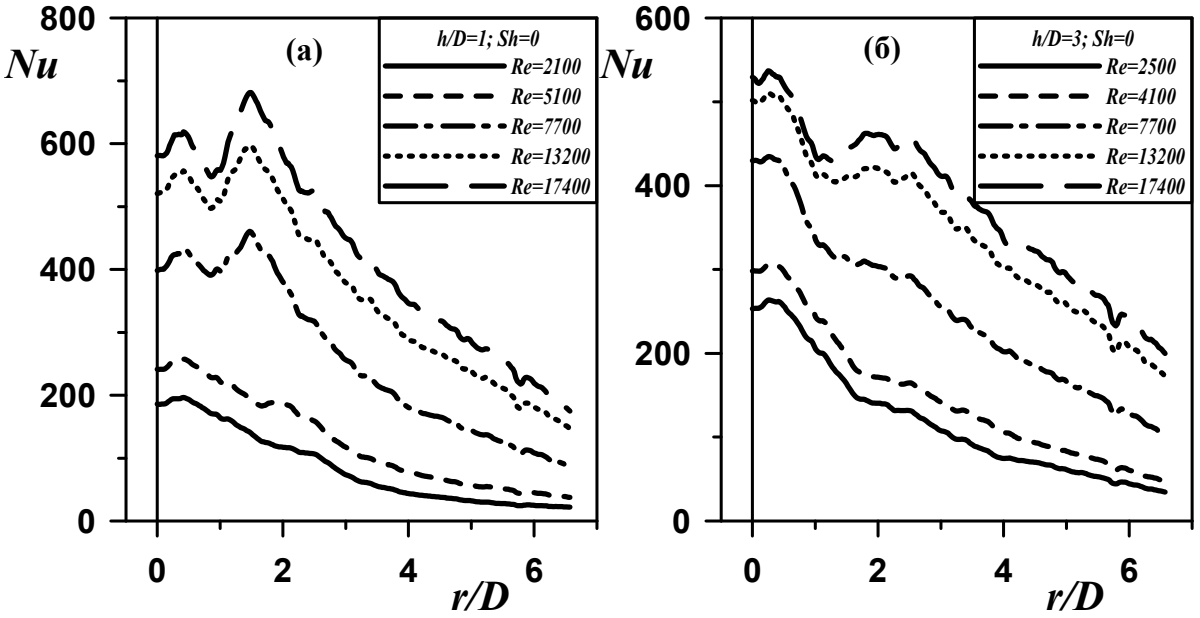

Рис.3. Распределение *Nu* в зависимости от *Re*. (а) *h/D=1;* (б) *h/D=3*

В этой работе наиболее интенсивный унос тепла наблюдался в области между крупными вихрями с противонаправленным вращением. Далее, по мере удаления от оси сопла, коэффициент теплообмена монотонно спадает.

При малых числах Рейнольдса распределение коэффициента теплообмена меняет свой характер. С уменьшением *Re* распределение коэффициента теплообмена становиться более монотонным, понижая значения по мере удаления от оси сопла. Это наблюдается в обоих случаях.

Немного другую картину видим на рис.3(а) при меньшем расстоянии от среза сопла до импактной поверхности (*h/D=1*). Характер распределения числа Нуссельта меняется. Вторичный максимум более ярко выражен и имеет большие значение, чем первичный, начиная с *Re≈6000*.

Следующий эксперимент проводился при различных расстояниях между соплом и преградой (*h/D=1-7* с шагом *h/D=1*), *Re=10000*, без внешнего возбуждения потока.

На графике (рис.4) представлены характерные распределения чисел Нуссельта в зависимости от расстояния до преграды.

Видно, что при небольших расстояниях от среза сопла до стенки (h/D≤4) в критической точке наблюдается локальный минимум. На расстояниях r/D≈0,8, в области, где крупномасштабные вихри натекают на стенку, наблюдается локальный максимум. На расстояниях r/D≈2 наблюдается вторичный максимум коэффициента теплообмена, связанный с турбулизацией пограничного слоя на пластине [5]. При увеличении расстояния от среза сопла до стенки распределения коэффициентов тепломассообмена принимают другой вид, монотонно спадая при увеличении расстояния от критической точки.

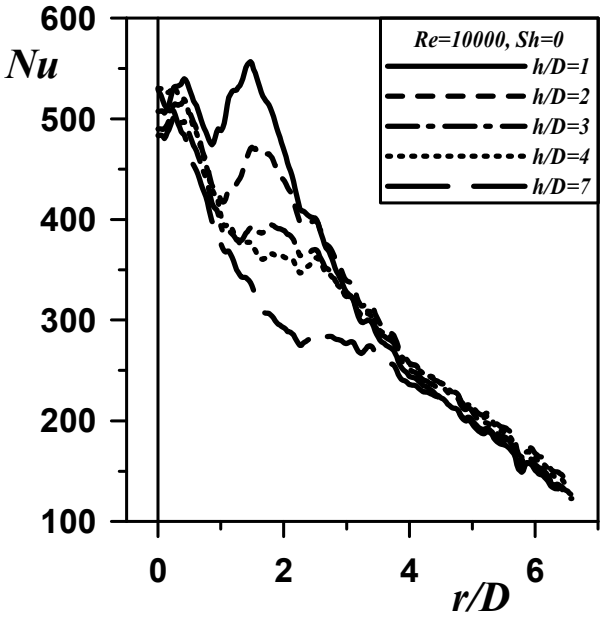

Рис.4. Распределение *Nu* в зависимости от *h/D; Re=10000*

Также видно, что средний теплообмен на нагревательном элементе уменьшается с увеличением

расстояния до него. Причём не во всей области натекания струи на преграду, а в зоне отрыва потока (*r/D=1-4*), где наблюдается наиболее интенсивное подавление *Nu*. Так как струя, распространяясь в среде на данных расстояниях до преграды, почти не теряет своего импульса, то есть скорость натекания струи на импактную поверхность в критической точке не меняется, в зависимости от *h/D*, то в области критической точки теплообмен практически не изменяется.

Далее представлено влияние частоты возмущения на теплообмен (Рис.5). Числа Струхаля в экспериментах были *Sh=0,4÷1; Sh=1,3; Sh=1,6; Sh=2*.

На рис.5(а, б) представлены наиболее характерные распределения коэффициента теплообмена в зависимости от частоты возбуждения (*f*), выраженной в числе Струхаля ($Sh=f\cdot D/U_0$). Режим истечения *Re=4000*, расстояние между срезом сопла и нагревательным элементом *h/D=1* (а) и *h/D=3* (б) с частотами внешнего возмущения потока *Sh=0,6* (*f=10,8*Гц),*Sh =0,9* (*f=16,2*Гц), *Sh=2* (*f=36* Гц).

При малом расстоянии от среза сопла до преграды (*h/D=1*) с внесением внешнего возбуждения струи теплообмен на нагреваемой импактной поверхности меняется. Возмущая поток на частоте *Sh=0,6* (*f=10,8* Гц), теплообмен минимален, т.е. происходит его подавление, а при внесении возмущений *Sh=0,9* (*f=16,2* Гц) максимален, т.е., наоборот, наблюдается интенсификация по сравнению с невозмущенным состоянием. На более высоких частотах *Sh=2* (*f=36* Гц) коэффициент теплообмена ведёт себя практически также, как без возмущения (*Sh=0*). Причём все изменения происходят в области до *r/D*≈3. Разность между минимальным и максимальным интегральными (то есть проинтегрированными по области натекания струи) значениями числа Нуссельта составляет ≈14,6 %. А некоторое изменение интенсивности вторичного максимума при разных частотах возмущения говорит об изменении режимов течения в области отрыва.

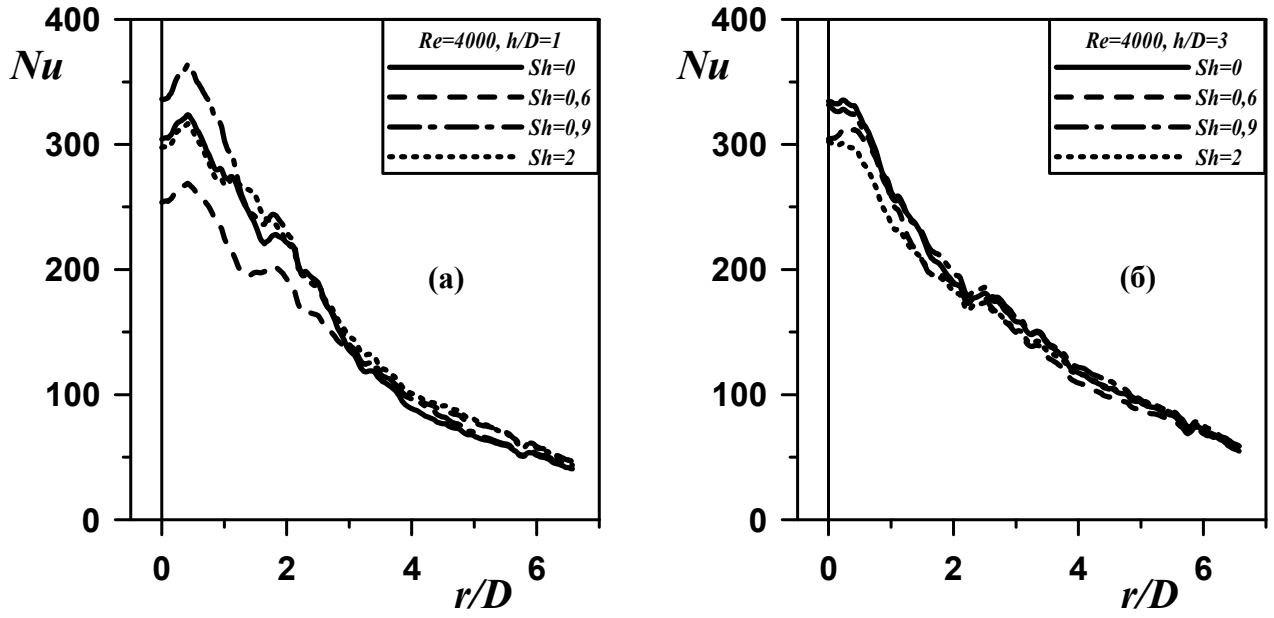

Рис.5. Распределение *Nu* в зависимости от *Sh. Re=4000*; (а) *h/D=1;* (б) *h/D=3*

На более дальних расстояниях от среза сопла *h/D=3* рис.5(б) теплообмен на нагреваемой поверхности практически не изменяется. Так же нет явно выраженного вторичного максимума.

Аналогичная картина наблюдается и при *Re=10000*.

В следующем эксперименте изучалось влияние амплитуд внешнего возмущения потока на теплообмен при двух режимах течения *Re=4000; h/D=1; Sh=0,6* и *Re=10000; h/D=3; Sh=0,6*. На рис.6 (а, б) представлены распределения числа Нуссельта в зависимости от амплитуды возбуждения.

Коэффициент теплообмена понижается с увеличение амплитуды. Так как при внесении внешнего возбуждения струи на частоте *Sh=0,6* наблюдается эффект подавления теплообмена на импактной поверхности в обоих случаях, то это означает, что при увеличении амплитуды возмущений этот эффект усиливается.

Вторая часть работы посвящена более детальному изучению процессов теплопереноса в зоне натекания при помощи комбинации методик PIV и PLIF. Были одновременно измерены мгновенные поля скорости и температуры в осесимметричной затопленной импактной струе. В эксперименте для каждого режима было измерено 2000 реализаций мгновенных полей скорости и температуры, по которым проводилось усреднение.

Для совмещения камер PIV и PLIF, а так же для определения масштабного коэффициента, была проведена пространственная калибровка. Калибровочная мишень с круглыми маркерами (размером d=3 мм, расстояние между маркерами 3 мм) помещалась в исследуемую область и снималась двумя камерами одновременно. Затем с помощью алгоритмов калибровки (аналогичных тем, что используются для калибровки Stereo PIV метода) было рассчитано преобразование координат и масштабный коэффициент.

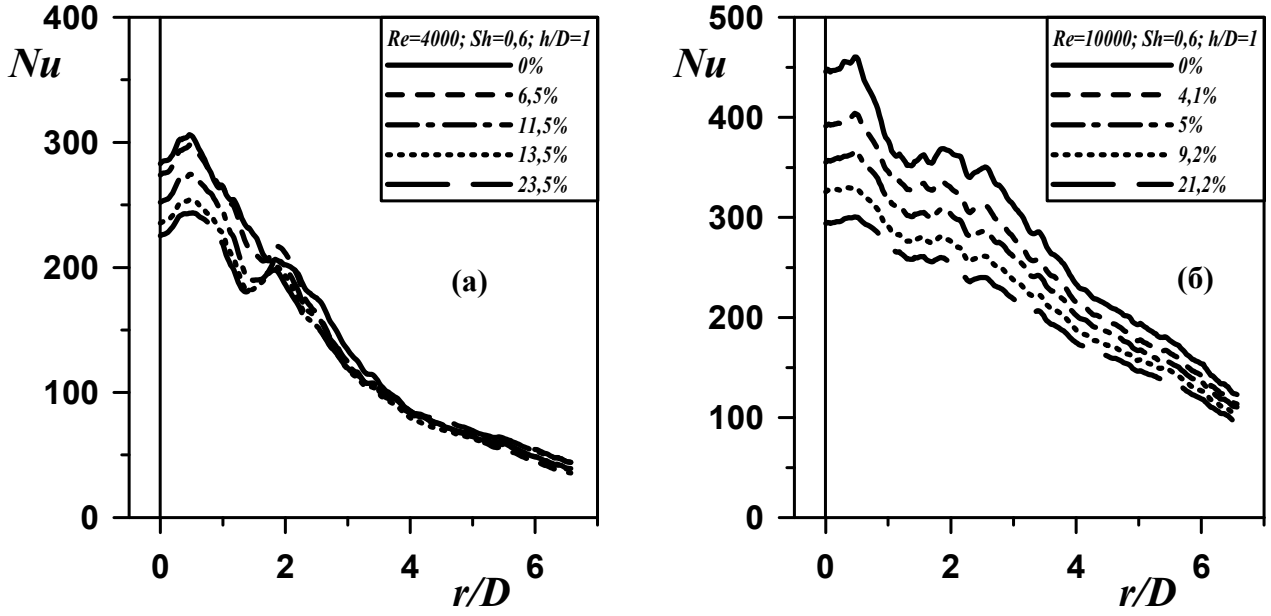

Рис.6. Распределение Nu в зависимости от амплитуды внешних возмущений в % от невозмущенного состояния. *h/D=1, Sh=0,6*; (а) *Re=4000,* (б) *Re=10000*

Измерения проводились для расстояния от стенки до среза сопла *h/D = 3*. Число Рейнольдса в экспериментах составляло 4000, что соответствует среднерасходной скорости на срезе сопла U_o=*0,27 м/с*. Измерительная область – область натекания потока на стенку (от *r/D=0,4* до *r/D=3*). Нагревательный элемент выделял постоянный поток тепла *q=3,3 Вт/см*^{2}. эксперимент проводился для трех случаев внешнего возбуждения: невозмущенный случай, и два возмущённых -*Sh=0,5* (частота возмущения *f=9 Гц*), *Sh=0,9 (f=16 Гц)*.

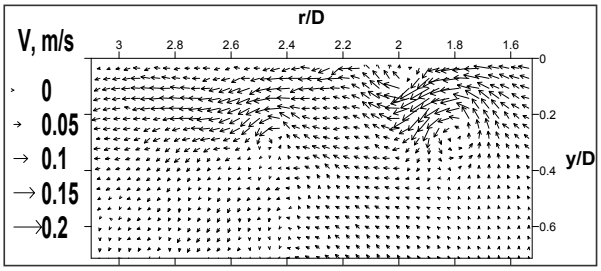

Рис.7. Мгновенное поле скорости. *Re=4000*, *h/D = 3*

На рисунке 7 представлено мгновенное поле скорости, полученное при обработке снимков, сделанных PIV камерой. Видно, что на расстоянии порядка 2-х калибров присутствует отрыв течения, индуцированный крупномасштабной вихревой структурой расположенной вблизи, и направленный вглубь пограничного слоя.

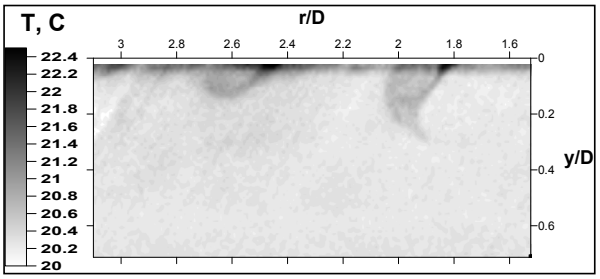

Рис.8. Мгновенное поле температуры

На рисунке 8 представлено мгновенное поле температуры, полученное при обработке снимков, сделанных PLIF камерой.

На мгновенных полях температуры мы наблюдаем локальные выбросы тепла. Эти выбросы можно связать с наличием отрывных течений в пристенной области, индуцированных крупномасштабными структурами вблизи стенки. В работе [3] наиболее интенсивный унос тепла наблюдался в области между крупными вихрями с противонаправленным вращением. В данном объекте такой

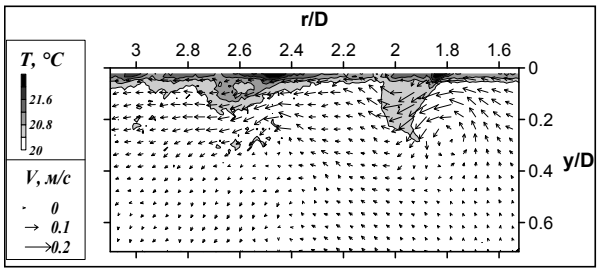

Рис.9. Мгновенные поля скорости и температуры

механизм также присутствует в областях между основным (когерентным) вихрем и отрывным вихрем противоположного знака завихренности. В этом можно убедиться, наложив поле скорости на поле температуры, что показано на следующем рисунке (рис.9.). Видно, что выбросы температуры происходят в тех местах, где наблюдается крупномасштабный вихрь. Вихрь способствует уносу горячей жидкости от стенки, что увеличивает локальный теплообмен в данной области.

На рисунке 10 представлены корреляции пульсаций температуры с нормальной компонентой пульсаций скорости <t'V'> при 3-х разных режимах возбуждения: невозмущенный случай, с возмущением *Sh=0,5* и *Sh=0,9*. Значения корреляций нормированы на величину $\rho \cdot C_p / Q$, где ρ – плотность жидкости и C_p – теплоемкость. Можно сказать, что при отсутствии возмущения, распределение максимумов корреляции немонотонно (прерывисто и с меньшими абсолютными значениями), в отличие от случая с возмущением. При возмущении *Sh=0,5* корреляции начинают принимать более регулярную структуру. А при возмущении *Sh=0,9* корреляционный слой становится более постоянным, расширяясь по мере удаления от оси сопла. Увеличение абсолютных величин корреляций в случаях с внешним возмущением потока означает усиление роли турбулентного механизма переноса тепла при внешнем возмущении потока.

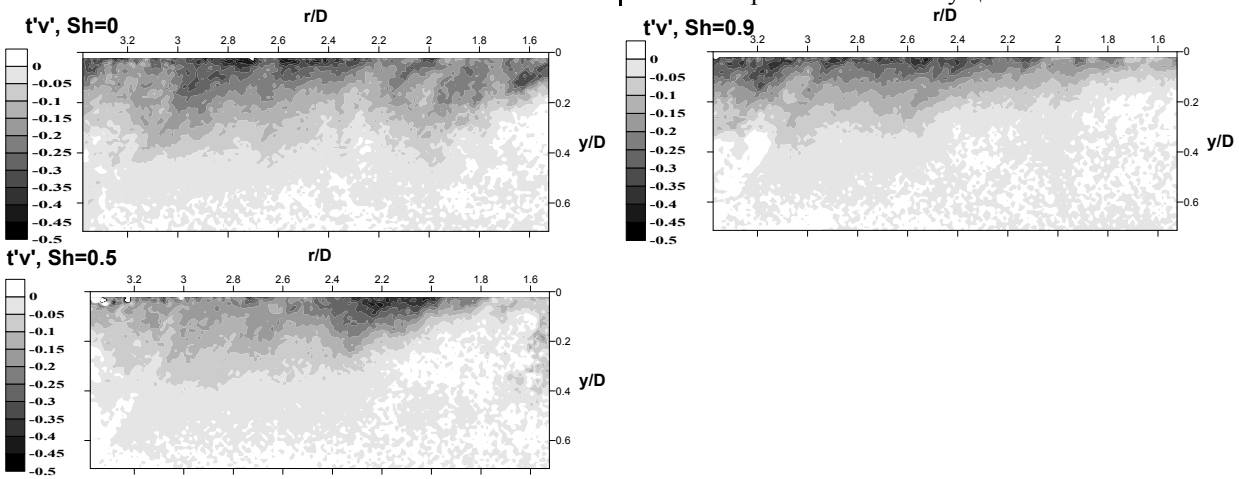

Рис.10. Корреляции <t'V'>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объектом исследования в работе являлась осесимметричная импактная струя, натекающая нормально на нагреваемую поверхность. Струя находилась как в естественных условиях, так и в условиях внешнего возбуждения потока при различных чисел Рейнольдса, расстояний между преградой и срезом сопла, частотах и амплитудах внешнего возмущения потока. Частоты возбуждения соответствовали разным режимам развития когерентных структур и разным значениям интенсивности интегрального теплообмена на стенке.

Проведены измерения распределения Nu на нагреваемой поверхности при различных режимах истечения струи и режимов внешнего возмущения потока. Показано, что внесением внешнего возмущения в поток можно как усиливать (при *Sh=0,9*), так и подавлять (при *Sh=0,6*) теплообмен в области натекания струи, причем изменение интенсивности теплообмена может достигать 14,6%.

Проведены одновременные измерения полей скорости и полей температуры в пристенной области осесимметричной турбулентной струе, натекающей на нагреваемую поверхность. Показано, что взаимодействие когерентной структуры со

стенкой приводит к локальному увеличению уноса тепла от нагреваемой поверхности. Рассчитаны корреляции пульсаций скорости и пульсаций температуры, характеризующие интенсивность турбулентного переноса тепла. Показано, что варьируя частоту внешнего возбуждения струи можно регулировать интенсивность турбулентного переноса в области натекания струи на стенку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liu T., Sullivan J.P. Heat transfer and flow structures in an excited circular impinging jet // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1996. V. 39. № 17. P. 3695–3706.
2. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle Image Fluorescence. A practical guide. Berlin: Sringer. 1998.
3. Sakakibara J., Hishida K., Maeda M. Measurements of thermally stratified pipe flow using image-processing techniques // Experiments in Fluids. 1993. № 16. P. 82–96.
4. Funatani S., Fujisawa N., Ikeda H. Simultaneous measurement of temperature and velocity using two-colour LIF combined with PIV with a colour CCD camera and its application to the turbulent buoyant plume // Measurement Science and Technology. 2004. № 15. P. 983–990.
5. K. Kataoka Impingement heat transfer augmentation due to large scale eddies, Proc. 9th Int. Heat Transfer Conf., vol. 1, 1990.
6. Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М. Метод PLIF для исследования теплообмена в жидкостях // Девятая международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков». Труды конференции. Издательский дом МЭИ: Москва, 2007. С. 406–409.
7. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № 3. С. 109–131.