

УДК 53.082.6

ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

© 2020 г. Е. Ю. Коротева^{1,*}, И. А. Знаменская¹, П. А. Рязанов¹

Представлено академиком РАН А.И. Леонтьевым 09.10.2019 г.

Поступило 14.10.2019 г.

После доработки 14.10.2019 г.

Принято к публикации 16.11.2019 г.

Предложен новый бесконтактный метод визуализации полей скорости в пограничном слое неизо-термической жидкости путем беззасевого трассирования. Метод основан на высокочастотной тепловизионной регистрации динамики температурных неоднородностей, играющих роль пассивной примеси в течении, через прозрачную для инфракрасного излучения стенку. В результате обработки последовательности тепловизионных изображений с использованием кросс-корреляционного алгоритма исследованы поля скорости пристенного течения, образующегося в области взаимодействия импактной затопленной струи воды с преградой, в диапазоне до 0 до 1 м/с, и определены границы ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое.

Ключевые слова: инфракрасная термография, пристенное течение, ламинарно-турбулентный переход, импактная струя

DOI: 10.31857/S2686740020020145

Развитие количественных методов визуализации течений жидкости и газа важно как для лучшего понимания их структуры, так и с точки зрения валидации численных моделей. Для экспериментальной регистрации турбулентных пристенных течений газа на сегодняшний день доступны разнообразные контактные и бесконтактные методы: трассирование потока частицами; теневые методы; применение сажемасляных, термоиндикаторных и прочих покрытий. Для исследования затопленных струйных течений несжимаемой жидкости перспективным представляется применение комбинации методов цифрового трассирования (PIV и PLIF) [1]. В то же время структура течения в области пристенного пограничного слоя жидкости остается практически недоступной. Между тем, именно эта область – взаимодействия течения с поверхностью – представляет особый интерес для задач теплообмена [2, 3].

Бурное развитие цифровых технологий регистрации быстропротекающих процессов и обработки изображений позволяет использовать принципиально новые подходы к визуализации течений. Ранее была предложена методика количественного анализа турбулентных характеристик погранич-

ных слоев жидкости с использованием инфракрасной (ИК) термографии [4, 5]. Методика основана на высокочастотной тепловизионной регистрации тепловых пульсаций из узкого пристенного слоя жидкости при съемке течения через ИК-прозрачную стенку.

В данной работе предложен новый метод бесконтактной количественной визуализации полей скорости в пристенном течении жидкости, представляющий собой объединение высокоскоростной ИК термографии и кросс-корреляционных алгоритмов обработки изображений, – трассирование “тепловыми точками” (ТТТ). Отслеживание динамики течения при помощи определения сдвигов кластеров тепловых точек – элементов течения, сохраняющих свои начальные температуры при вихревом турбулентном перемешивании, – позволяет получать двумерные поля скорости пограничного слоя. Методы, основанные на использовании температурных неоднородностей в качестве трассирующих частиц, в настоящее время с успехом применяются в исследованиях поверхностных течений, при которых тепловизионные измерения проводятся на границе раздела жидкость–газ [6–9]. В данной работе регистрация локальных температурных неоднородностей производится вблизи обтекаемой плоской поверхности, что позволяет впервые вычислять поля скорости непосредственно в пограничном слое течения без использования физических трассирующих частиц.

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: koroteeva@physics.msu.ru

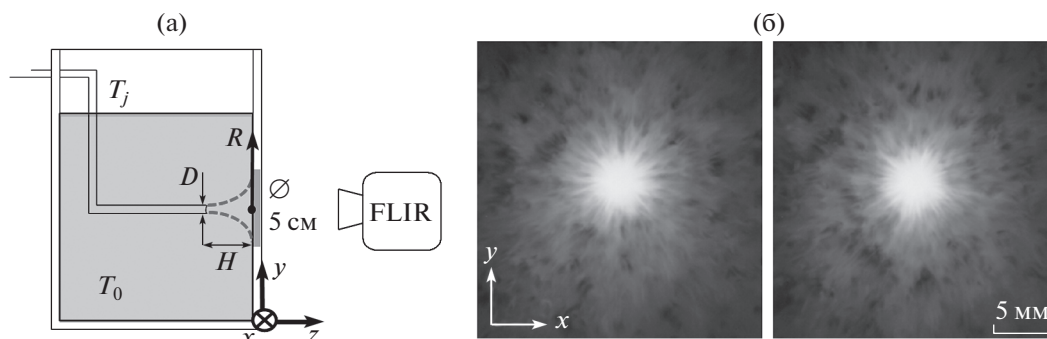


Рис. 1. а – схема эксперимента; б – пример двух последовательных тепловизионных изображений, которые импортируются в программу кросс-корреляционной обработки. Время между кадрами – 3.4 мс. Параметры течения: $D = 1.5$ мм, $H/D = 2$, $v_j = 5$ м/с ($Re_j = 10\,900$).

В работе методом ТТТ исследуется пристенное течение, образованное при взаимодействии затопленной импактной струи с твердой стенкой (рис. 1а). Для этого в бак, заполненный холодной водой ($T_0 = 5–15^\circ\text{C}$), устанавливается круглое сопло с выходным диаметром $D = 1–4$ мм. Горячая струя из сопла ($T_j = 20–40^\circ\text{C}$) натекает на вертикальную стенку резервуара. Область импакта представляет собой окно из фторида кальция толщиной 2 мм и диаметром 50 мм. Относительное расстояние от стенки до среза сопла составляет $H/D = 1–6$. Тепловизионная съемка проводится ИК-камерой FLIR SC7000, работающей в спектральном диапазоне 3.7–4.8 мм. ИК-излучение в этом диапазоне длин волн эффективно поглощается слоем воды толщиной 0.1–0.4 мм, как следует из закона Бугера и оптических свойств жидкой воды [10]. В то же время окно из фторида кальция способно пропускать до 95% ИК-излучения, что позволяет при фокусировке камеры на внутренней стенке окна регистрировать собственное тепловое излучение из субмиллиметрового пограничного слоя воды.

Для существования в течении тепловых точек поддерживается достаточная разница температур между струей и покоящейся жидкостью, $T_j - T_0 = 5–25^\circ\text{C}$. Съемка проводится на частоте от 200 до 400 Гц. Важным условием применения метода ТТТ является возможность рассматривать температурные неоднородности в потоке как пассивную примесь, не влияющую на динамику течения. Для течения затопленной импактной струи это обеспечивается высокой интенсивностью турбулентного перемешивания (числа Рейнольдса на выходе из сопла, Re_j , от 3000 до 16000) и малым временем съемки (1–2 с). В результате динамика тепловых точек определяет направление и скорость жидкости в тонком слое пристенного течения.

Из полученных в ходе экспериментов тепловизионных кадров вырезаются нормированные по

серой шкале последовательности изображений, которые затем импортируются в программу кросс-корреляционной обработки LaVision Davis (рис. 1б). Программой измеряется смещение выделенных программой кластеров тепловых точек при помощи PIV-шаблона; обработка проводится с использованием трех проходов кросс-корреляции.

Пример результата такой обработки двух последовательных кадров (частота съемки 295 Гц) приведен на рис. 2а. Распределение модуля скорости представлено в градациях серого, векторы указывают направление скоростей в приповерхностной плоскости. Осреднение последовательностей мгновенных полей дает уже осесимметричную картину распределения средней скорости с неразрешаемой зоной в центре порядка нескольких относительных диаметров (рис. 2б). С учетом размеров области опроса, частоты съемки, а также особенностей кросс-корреляционной обработки с использованием быстрого преобразования Фурье, максимально возможное значение скорости, регистрируемое предложенным методом, составляет 1 м/с. В исследуемом диапазоне скорости струи на выходе из сопла (до 5 м/с) полученные в работе максимальные значения мгновенной радиальной скорости в пристенном течении не превышают 0.7, средней – 0.3 м/с.

Анализ осредненных полей скорости пристенного течения затопленной импактной струи в широком диапазоне параметров указывает на подобие структуры течения при изменении числа Рейнольдса потока: течение осесимметрично; в центре наблюдается неразрешаемая область, за которой появляются радиально направленные векторы скорости; величина скорости растет до максимума, а затем убывает с увеличением расстояния от точки торможения.

Существование неразрешаемой области вблизи точки торможения потока можно объяснить отсутствием контрастных трассирующих элементов в

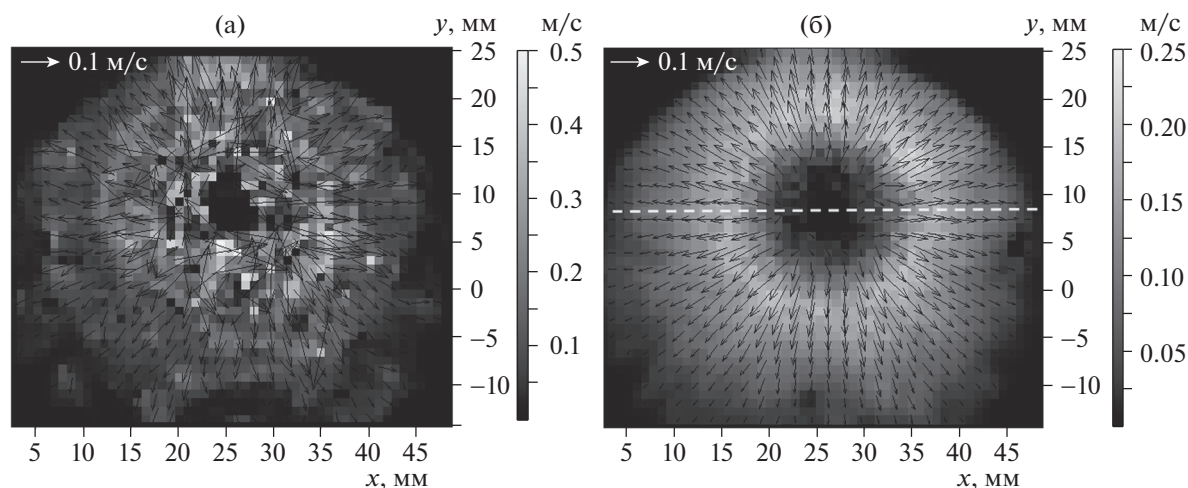


Рис. 2. Мгновенное (а) и среднее (б) векторное поле скорости пристеночного течения (усреднение по 100 мгновенным полям) для затопленной импактной струи с параметрами: $D = 2$ мм, $H/D = 2$, $v_j = 2.9$ м/с ($Re_j = 8400$).

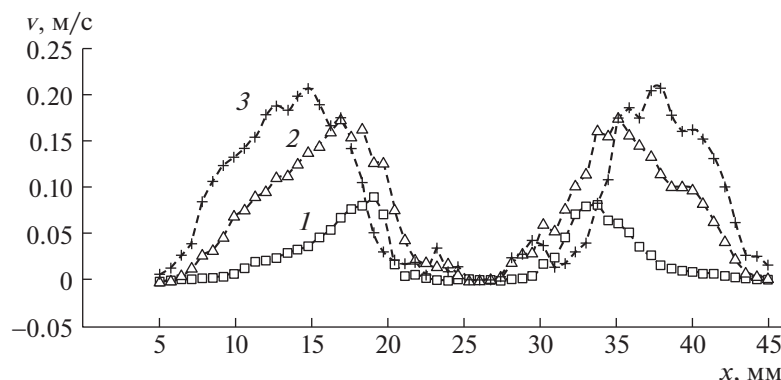


Рис. 3. Сравнение профилей скорости вдоль оси (рис. 2) при различных скоростях истечения струи из сопла ($v_j = 0.7$ (1), 1.4 (2), 2.1 м/с (3)). Параметры течения: $D = 3$ мм, $H/D = 2$.

течении (тепловых точек), что указывает на наличие ламинарного пристенного слоя однородной температуры. Таким образом, граница разрешаемой области соответствует появлению в регистрируемом слое зон турбулентного перемешивания вещества струи с окружающей жидкостью.

Измеренные профили осредненной скорости вдоль горизонтальной оси (отмеченной на рис. 2б) позволяют исследовать зависимость размеров неразрешимой (ламинарной) зоны от скорости струи на выходе из сопла. Пример построенных профилей для одной из конфигураций струи ($D = 3$ мм, $H/D = 2$) представлен на рис. 3. Графики показывают, как с увеличением скорости струи на выходе из сопла увеличиваются размеры ламинарной зоны, от 2 до 4 относительных диаметров. Кроме того, увеличивается абсолютное значение максимума скорости профиля, а его положение сдвигается дальше от зоны стагнации, что соответствует

известным представлениям о структуре пристеночного течения импактной затопленной струи.

Таким образом, предложенный в работе метод трассирования тепловыми точками открывает новые возможности по изучению количественных динамических характеристик турбулентных потоков вблизи твердой стенки. Приведенный алгоритм исследования можно использовать как для экспериментального определения структуры турбулентного течения и границ ламинарно-турбулентного перехода в жидкости, так и для валидации и тестирования численных моделей, описывающих движение жидкости около поверхности.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 19–79–00162.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nebuchinov A.S., Lozhkin Y.A., Bilsky A.V., et al.* // Exp. Therm. Fluid Sci. 2017. № 80. P. 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.08.009>
2. *Қутателадзе С.С., Леонтьев А.И.* // М.: Энергоиздат, 1985. С. 320.
3. *Carlomagno G.M., Ianiro A.* // Exp. Therm. Fluid Sci. 2014. № 58. P. 15–35. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.06.010>
4. *Большухин М.А., Знаменская И.А., Фомичев В.И.* // ДАН. 2015. Т. 465. № 1. С. 38–42. <https://doi.org/10.7868/s0869565215310096>
5. *Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Новинская А.М. и др.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т.13. С. 51–57. <https://doi.org/10.1134/S1063785016070154>
6. *Charogiannis A., Zadrazil I., Markides C.N.* // Intl J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 97. P. 589–595. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.050>
7. *Chickadel C.C., Talke S.A., Horner A.R., et al.* // Geosci. Remote Sens. Lett. 2011. V. 8. № 5. P. 849–853. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2011.2125942>
8. *Jessup A.T., Phadnis K.R.* // Meas. Sci. Technol. 2005. V. 16. № 10. P. 1961–1969. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/10/011>
9. *Lin D., Grundmann J., Eltner A.* // Water Resour. Res. 2019. V. 55. № 4. P. 3122–3136. <https://doi.org/10.1029/2018wr024507>
10. *Zolotarev V.M., Mikhailov B.A., Alperovich L.L., et al.* // Optics and Spectroscopy. 1969. V. 27. P. 430–432.

VELOCITY FIELD MEASUREMENTS IN A LIQUID BOUNDARY LAYER BASED ON HIGH-SPEED THERMOGRAPHY

E. Yu. Koroteeva^a, I. A. Znamenskaya^a, and P. A. Ryazanov^a

^a *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS A.I. Leontyev

We propose a new method to visualize flow velocity fields within a boundary layer of a non-isothermal liquid using seedless velocimetry. The method is based on high-speed thermographic imaging of temperature inhomogeneities acting as a passive flow tracer, through an infrared-transparent wall. Through the post-processing of thermal image sequences using a cross-correlation algorithm, we investigate the near-wall flow fields (up to 1 m/s) of a submerged impinging water jet and define the location of laminar-turbulent transition inside the boundary layer.

Keywords: infrared thermography, near-wall flow, laminar-turbulent transition, impinging jet