

Применение высокоскоростной термографической визуализации для валидации численных расчетов течений в пограничном слое жидкости

Коротеева Е.Ю.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
(физический факультет), Россия

ORCID: 0000-0002-1705-5142, koroteeva@physics.msu.ru

Аннотация

Струйные течения и пристенные пограничные слои являются универсальным объектом для тестирования математических моделей в вычислительной гидродинамике. Данные, полученные на основе количественной и качественной экспериментальной визуализации, на сегодняшний день составляют основу для калибровки и валидации различных полуэмпирических моделей турбулентности. В данной работе проанализированы возможности применения высокоскоростной инфракрасной (ИК) термографии для определения турбулентных характеристик пограничных слоев жидкости. Способность большинства жидкостей эффективно поглощать ИК излучение определенного диапазона на субмиллиметровом масштабе позволяет при тепловизионной съемке через ИК-прозрачные стенки сосудов регистрировать зависимость от времени теплового потока из узкого пограничного слоя. Методика протестирована на двух модельных струйных течениях воды, для которых исследованы спектральные характеристики тепловых пульсаций в интервале частот от 1 до 150 Гц в различных точках пристенного течения. На основе сравнения экспериментальных результатов с данными трехмерного CFD моделирования показано, что области течения в пристеночном слое с определенными спектральными свойствами можно сопоставить с характерными областями в структуре течения. Это открывает широкие возможности применения высокоскоростной термографии для расширения базы экспериментальных данных, необходимых для валидации и тестирования численных моделей турбулентных приповерхностных течений жидкости.

Ключевые слова: термографическая визуализация, спектральный анализ, струйные течения, течение в погранслое, CFD моделирование, валидация.

1. Введение

Струйные течения жидкости или газа, примыкающие к твердым стенкам, являются неотъемлемым элементом многих природных явлений и технических устройств. Исследование пристенных струй составляет важный класс задач классической гидромеханики и, кроме того, представляет значительный практический интерес для многих инженерных приложений (в частности, связанных с применением струйных систем для интенсификации процессов тепло- и массообмена).

Свободными струями называют потоки жидкости или газа, не ограниченные твердыми стенками [1]. Особенностью затопленных струй, т.е. струй, истекающих в среду той же или большей плотности, является наличие области турбулентного перемешивания вещества струи с окружающей неподвижной средой. Образующиеся в слое смешения крупномасштабные вихревые образования оказывают существенное воздействие на процессы переноса и теплообмена в области взаимодействия струи с преградой. Наблюдаются локальные изменения характеристик теплообмена (в частности, поверхностное распределе-

ние числа Нуссельта), которые объясняют ламинарно-турбулентным переходом в пограничном слое, увеличением кинетической энергии турбулентности в пристенной струе или динамикой крупномасштабных вихревых структур [2-4].

Струйные течения и пристенные пограничные слои в вычислительной гидродинамике традиционно являются универсальным объектом для тестирования математических моделей. Численный расчет течений в погранслое, образующемся при натекании струи на твердую преграду, напрямую связан с фундаментальной проблемой моделирования турбулентных течений. Несмотря на интенсивное развитие вычислительной техники и существенный прогресс в развитии программного обеспечения для решения задач гидродинамики, наиболее часто используемым инструментом для расчета сложных турбулентных течений при высоких числах Рейнольдса по-прежнему остается полуэмпирическая теория турбулентности, основанная на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS). При этом основу для калибровки и валидации различных полуэмпирических моделей турбулентности составляют данные, полученные при помощи количественной и качественной экспериментальной визуализации. Отсутствие достаточной базы экспериментальных данных является препятствием для создания и обоснования технологии применения программ, описывающих течения жидкости. Для решения проблемы, в частности, в ОАО «ОКБМ Африкантов» была создана специализированная лаборатория гидродинамических испытаний, выполняющая экспериментальные исследования, представительные с точки зрения адаптации и верификации CFD программ [5,6].

Для исследования турбулентных пристенных течений газа на сегодняшний день доступны разнообразные контактные и бесконтактные экспериментальные методы: это и оптические теневые методы; методы, основанные на трассировании потока частицами; на использо-

вании сажемазляных, термоиндикаторных и других покрытий [7,8]. В то же время экспериментальная визуализация затопленных течений несжимаемой жидкости существенно затруднена. Со времен знаменитого опыта О. Рейнольдса второй половины 19 века, наиболее применимыми методами визуализации остаются использование подкрашенных струек, либо пузырьков воздуха [9,10]. Перспективным на сегодняшний день представляется комбинация PIV и PLIF методик [11]. В то же время применение существующих методов к анализу пристенных струйных течений в определенной степени ограничено: область пограничного слоя жидкости практически недоступна. Между тем, именно эта область – взаимодействия струи с поверхностью – представляет особый интерес для прикладных задач [3]. В данной работе для определения турбулентных характеристик пограничного слоя жидкости предложено использовать новый подход, основанный на высокочастотных термографических измерениях. Метод протестирован на двух модельных струйных течениях, а результаты сопоставлены с данными численного 3D моделирования на основе решения системы уравнений RANS.

2. Методика экспериментов

Инфракрасная (ИК) термография успешно применяется для бесконтактной количественной визуализации температурных полей объектов за счет регистрации их теплового излучения. Сегодня термографический метод используется практически во всех областях естественных наук, однако, в основном, для измерения пространственного распределения температуры на поверхности твердых тел [12,13]. Термографические исследования жидкостей и газов усложняются из-за особенностей распространения ИК излучения в этих средах. В то же время, благодаря способности большинства жидкостей (в частности, воды) эффективно поглощать ИК излучение

определенного диапазона, представляется перспективным использование термографии для анализа приповерхностных течений и погранслоев. При этом тепловизионная техника нового поколения позволяет с высокой частотой фиксировать малейшие изменения теплового излучения от объектов в нестационарном режиме. На этом основан метод ТВПЖ - термографии высокоскоростных потоков жидкости [14,15].

В данной работе экспериментальные измерения проводились с использованием средневолновой тепловизионной камеры FLIR SC7000, работающей в спектральном диапазоне 3.7-4.8 мкм. Камера позволяет проводить съемку с частотой до 115 Гц в полнокадровом режиме (640x512 пикселей) и до 415 Гц с ограниченным разрешением. В методе ТВПЖ регистрация тепловых полей проводится через стенки, прозрачные для ИК излучения. Если за такой стенкой находится воздух, тепловизор регистрирует интегральное излучение со всего объема воздуха. В случае воды, 99% теплового излучения поглощается в слое толщиной десятые доли миллиметра, что позволяет при фокусировке камеры на внутренней поверхности ИК-прозрачной стенки регистрировать зависимость от времени теплового потока из узкого пограничного слоя.

С помощью описанного метода в данной работе исследованы два типа струйных турбулентных течений воды, ограниченных твердыми стенками:

1) область взаимодействия затопленной осесимметричной импактной струи с поверхностью. Горячая (35-40 °С) струя воды, погруженная в резервуар с холодной (15-20 °С) водой, натекала на вертикальную стенку резервуара. Варьировались диаметр сопла ($d = 1-4$ мм), расстояние от сопла до стенки ($h/d = 1-4$) и скорость истечения струи ($v = 0.5-20.0$ м/с, что соответствовало числам Рейнольдса течения ~ 104). Характерное мгновенное и усредненное поле температур представлено на Рис. 1.

2) пристеночная область взаимодействия двух затопленных струй разной температуры в дискообразном тройнике. Холодная и горячая струи воды поступали через два боковых сопла, расположенных под углом 120° в дискообразном тройнике диаметром 67 мм и толщиной 13 мм; стоковое отверстие диаметром 12 мм располагалось в верхней части сосуда. Скорость истечения горячей и холодной струй составляла 0.8-1.5 м/с (что также соответствовало числу Рейнольдса течения ~ 104); разность температур горячей и холодной струй поддерживалась постоянной в течение каждого эксперимента. Характерное мгновенное и усредненное поле температур, а также численная иллюстрация процесса представлены на Рис. 2.

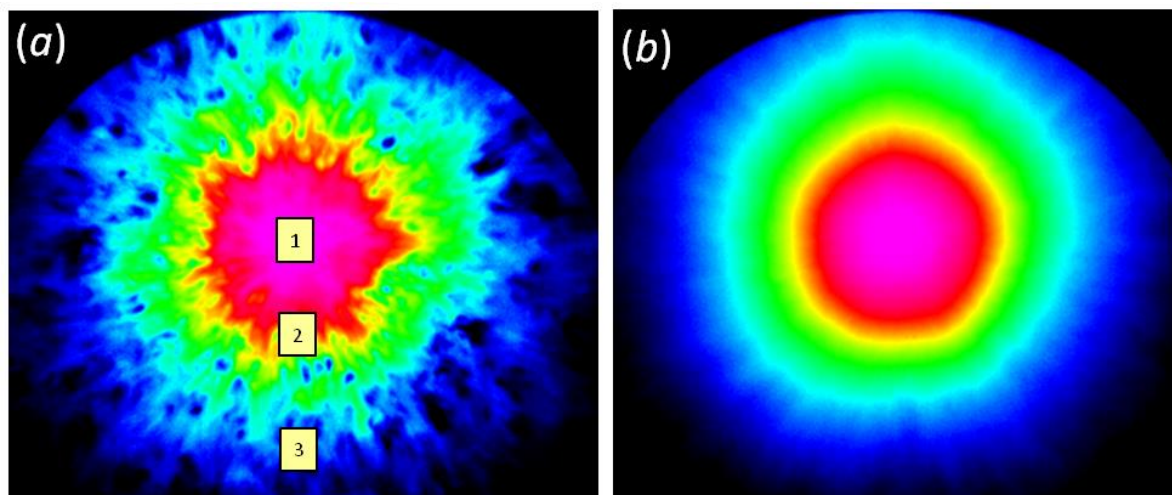


Рис. 1. Термограмма затопленной импактной струи воды: мгновенное (а) и усредненное (б) поле температур.

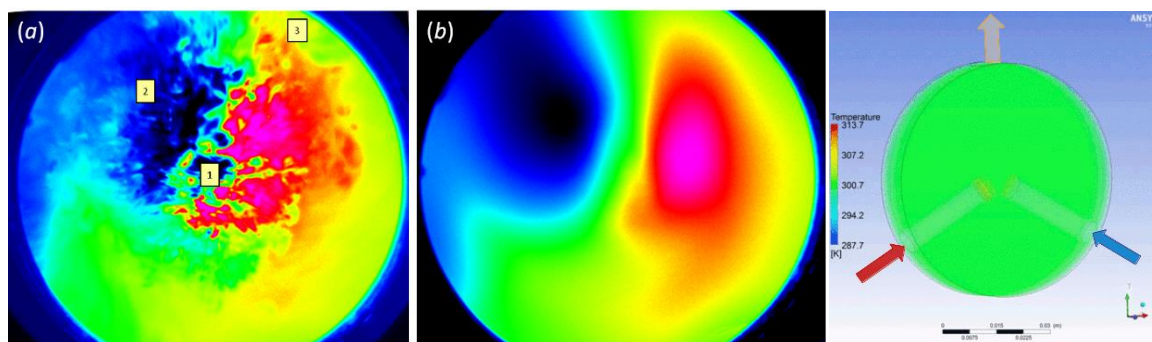


Рис. 2. Термограмма пристенного течения при смешении двух затопленных струй в дискообразном тройнике: мгновенное (а) и усредненное (б) поле температур; и численная иллюстрация течения (с, gif изображение).

Для обеих конфигураций тепловизионная регистрация проводилась через окна из селинида цинка либо фторида кальция, пропускающие, соответственно, более 70 и более 95% ИК излучения в рабочем диапазоне используемого тепловизора. Время съемки составляло от 1 с до 2 мин.

Важным условием применения метода ТВПЖ к анализу турбулентных характеристик приповерхностных течений является возможность рассматривать пульсации температуры как некоторую пассивную примесь, не влияющую на динамику потока. В исследуемых модельных течениях и при достаточно малых временах съемки можно считать, что тепловые пульсации связаны с вихревым перемешиванием элементов жидкости, при котором сохраняются их начальные температуры, и пренебречь эффектами молекулярной теплопроводности.

Обработка экспериментальных данных в методе ТВПЖ заключается в выделении характерных точек на тепловизионном изображении, для которых снимается зависимость температурных пульсаций от времени. Пример таких пульсаций для четырех точек представлен на Рис. 3 (слева). Проводится спектральный анализ полученных зависимостей на основе реализации быстрого преобразования Фурье (FFT), что позволяет оценивать частотно-временные характеристики турбулентных пульсаций в приповерхностном слое.

В данной работе получено, что величина начального температурного контраста не влияет на спектральные характеристики исследуемых течений — при варьировании температуры горячих струй характерный вид спектров в опорных точках не менялся. Кроме того, качественно похожие спектры в одних и тех же точках пристеночного течения были получены как при истекании горячей струи в холодную среду, так и наоборот — холодной струи в пространство, заполненное горячей водой (Рис. 3, справа). Это подтверждает предположение о роли температуры в качестве пассивной примеси.

3. Спектры тепловых пульсаций в приповерхностном течении

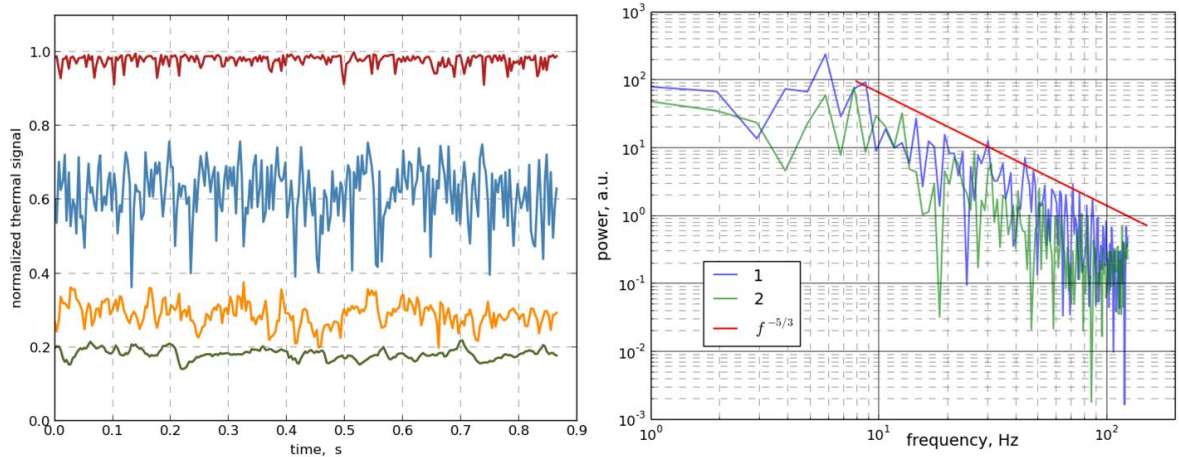


Рис. 3. Пример температурного сигнала в четырех различных точках приповерхностного течения импактной затопленной струи (слева) и характерный спектр пульсаций на расстоянии $r/d = 5$ от точки соударения (справа): 1 - горячая струя в холодной воде; 2 - холодная струя в горячей ($\Delta T \sim 25^\circ\text{C}$).

Анализ экспериментальных данных показал, что полученные спектры турбулентных пульсаций на определенном частотном интервале имеют четко выраженный наклон, который можно аппроксимировать функцией вида f^α . При этом значение показателя степени α , рассчитанного, например, по методу наименьших квадратов, меняется в зависимости от положения опорной точки на термограмме.

Так, для затопленной импактной струи вблизи точки торможения потока и до 1-2 относительных диаметров вокруг

нее (точка 1 на Рис. 1 и 4) спектр мощности пульсаций пограничного слоя практически не зависит от частоты. Для точек, расположенных на расстоянии порядка 3-6 относительных диаметров от места соударения (как точка 2 на Рис. 1 и 4) становится возможным выделить участок с наклоном $-5/3$, соответствующий появлению инерционного интервала. Далее по потоку наклон спектров увеличивается, а показатель степени, в основном, находится в интервале от -1.8 до -3.5 (точка 3 на Рис. 1 и 4).

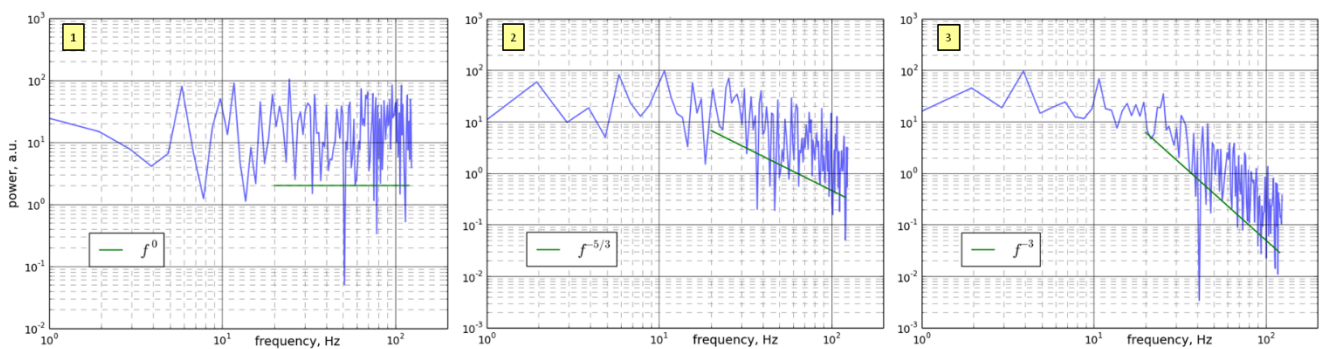


Рис. 4. Спектры температурных пульсаций в трех выделенных точках на термограмме затопленной импактной струи (Рис. 1).

При взаимодействии двух затопленных струй в дискообразном тройнике спектр мощности тепловых пульсаций оказывается не зависящим от частоты на расстоянии до 3-4 см от центра диска вдоль центральной линии течения и

вблизи нее (точка 1 на Рис. 2 и 5). Для точек на центральной оси, расположенных дальше от точки соударения и ближе к выходному сечению, в спектре выделяется интервал с наклоном от -1.5 до -2 (как для точки 2 Рис. 2 и 5). В то же время в некоторых периферийных точках

наблюдается излом спектра (точка 3 на Рис. 2 и 5). Таким образом, установлено, что тепловые пульсации в определенных

зонах течения обладают схожими спектральными свойствами.

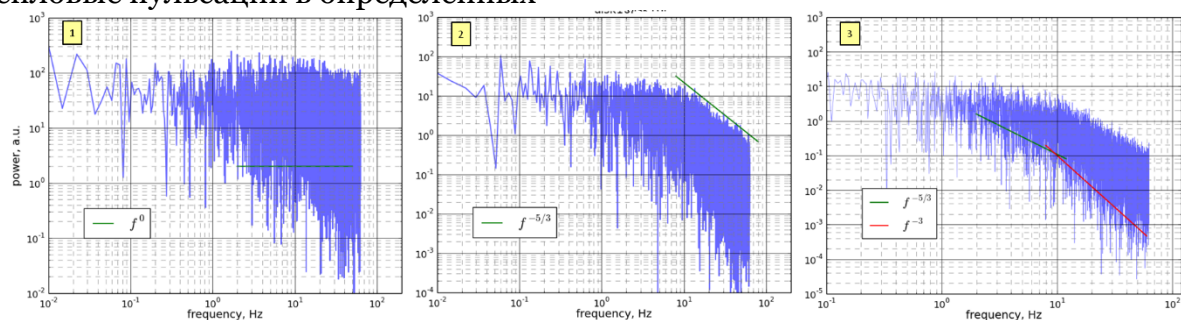


Рис. 5. Спектры температурных пульсаций в трех выделенных точках на термограмме взаимодействия двух затопленных струй (Рис. 2).

4. Численное моделирование

На сегодняшний день основным рабочим инструментом для решения прикладных задач гидродинамики остаются полуэмпирические методы, базирующиеся на использовании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS). Применение более точных подходов, таких как прямое численное моделирование (DNS) или моделирование крупных вихрей (LES), в виду их высокой ресурсоемкости, по-прежнему ограничено простой геометрией и относительно малыми числами Рейнольдса. Семейство RANS включает в себя большое число моделей турбулентности, многие из которых реализованы в программных пакетах вычислительной гидро-газодинамики. К сожалению, фундаментальным недостатком методов RANS является невозможность построения универсальной модели турбулентности, что приводит к необходимости выбора подходящей модели для каждой конкретной задачи. Стоит добавить, что имеющиеся модели зачастую приводят к качественно различным результатам, особенно при моделировании сложных приповерхностных турбулентных течений. В этой связи большую роль играют систематические исследования, основанные на накоплении новых экспериментальных данных, для определения границ применимости существующих и разработки новых подходов к моделированию турбулентности.

В данной работе для сопоставления экспериментальных результатов с данными расчетов проводилось численное 3D моделирование исследуемых течений при помощи пакета ANSYS CFX 14.5. Численный расчет основан на подходе RANS с дискретизацией методом конечных объемов. Использовались, в основном, $k-\epsilon$ и SST (Shear Stress Transport) двухпараметрические модели турбулентности. Расчетные сетки строились в программе ICEM CFD и были сгущены вблизи импактных стенок. В качестве начальных условий использовались задаваемые в экспериментах значения расхода воды на выходе из сопел.

Трехмерность моделируемого нестационарного течения затрудняет визуальное представление и анализ результатов. При исследовании турбулентных режимов течения наибольший интерес представляет идентификация когерентных вихревых структур. Существует множество подходов к визуализации вихревых течений, использующих различные определения вихря и критерии его идентификации [16], среди которых: метод локальных минимумов давления, метод максимальной завихренности, Q-метод и его модификации, λ_2 -метод.

На Рис. 6 представлены результаты численного моделирования затопленной импактной струи воды с параметрами: диаметр сопла $d=3$ мм, расстояние до поверхности соударения $h/d=2$, скорость струи на выходе - 2.4 м/с. Визуализированы распределение завихренности

на поверхности соударения и изоповерхность давления ($p < 0$), окрашенная в значения завихренности. Положения точек 1-3 соответствуют Рис. 1 и 4.

Результаты численного моделирования течения в дискообразном тройниковом устройстве представлены на Рис. 7. В силу симметрии расчет выполнен для половины расчетной области. Скорость струй на выходе из сопел - 1 м/с. Визуализированы распределения скоростей в

четырёх плоскостях, перпендикулярных оси течения, а также изоповерхность Q -критерия ($Q=0.05$), окрашенная в значения температуры. Видно, что на расстоянии 1-2 см от оси течения формируются два крупномасштабных симметричных вихря, образованных горячей и холодной струей. Положения точек 1-3 соответствуют Рис. 2 и 5.

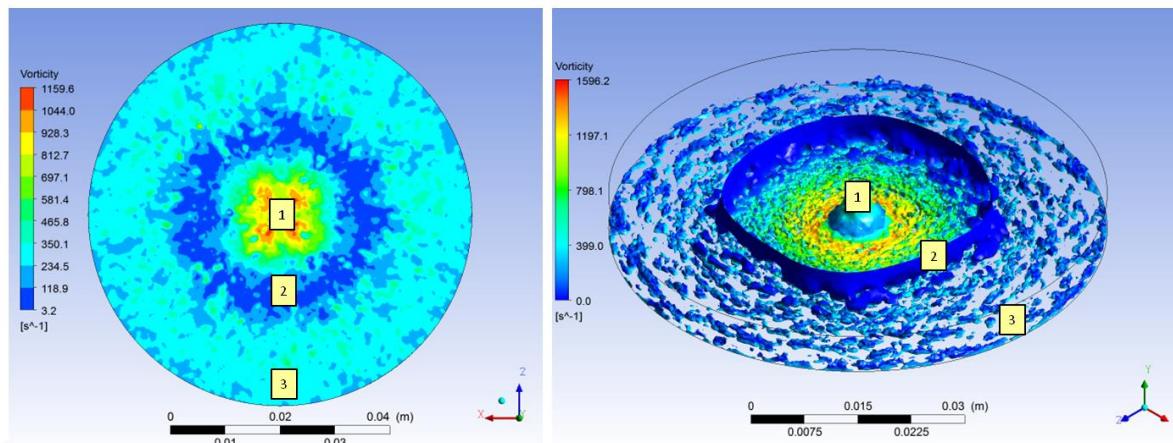


Рис. 6. Расчет затопленной импактной струи: поле завихренности на поверхности соударения (слева) и изоповерхность давления ($p < 0$), окрашенная в значения завихренности. Положения точек 1-3 соответствуют Рис. 1 и 4.

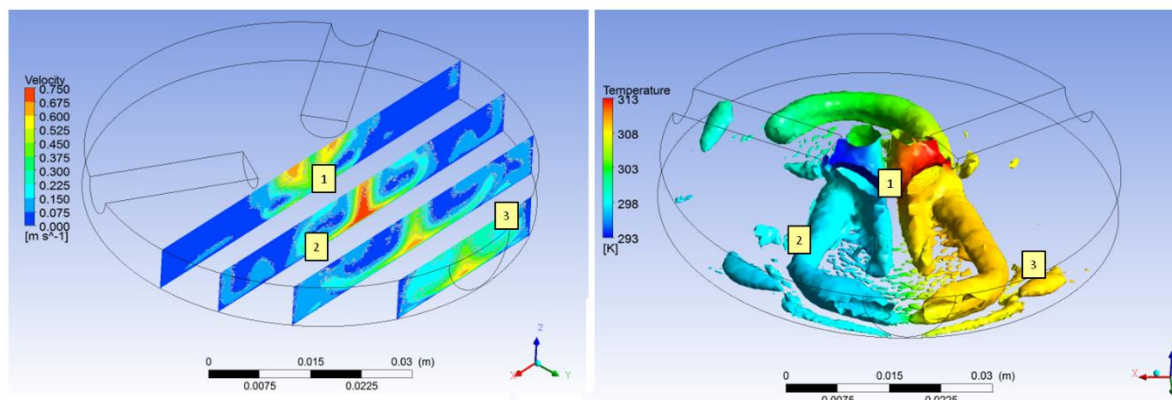


Рис. 7. Расчет течения в дискообразном тройнике: поля скоростей в четырех плоскостях (слева) и изоповерхность Q -критерия, окрашенная в значения температуры. Положения точек 1-3 соответствуют Рис. 2 и 5.

Численная визуализация показывает, что области течения в пристеночном слое с определенными спектральными свойствами можно сопоставить с характерными областями в структуре течения. В этой связи представляется перспективным использование ИК термографии

для валидации и тестирования численных расчетов течений в пристеночных слоях жидкости. Количественная точность экспериментальной методики повышается за счет увеличения числа тепловизионных измерений и определения на их основе усредненных оценок.

5. Заключение

В работе описана новая методика количественного анализа турбулентных характеристик пограничных слоев жидкости на основе ИК термографии. Методика протестирована на двух модельных течениях, для которых исследованы спектры тепловых пульсаций в интервале частот от 1 до 150 Гц в различных точках пограничного слоя. На основе сопоставления экспериментальных данных с результатами численного моделирования показано, что изменения в показателе степени аппроксимирующей функции можно напрямую связать с изменением характера течения в пристеночной области. Это открывает широкие возможности использования данной методики для количественной оценки турбулентных характеристик пограничных слоев жидкости. Таким образом, высокоскоростная ИК термография может служить новым перспективным источником экспериментальных данных, необходимых для валидации и тестирования численных моделей турбулентных приповерхностных течений жидкости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранта №16-38-60186). Автор выражает благодарность проф. Знаменской И.А. за плодотворные обсуждения.

Список литературы

1. Механика жидкости и газа. П.Г.Лойцянский. М.:Наука,1973, 848 с.
2. Lytle D., Webb B. Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings. Intern. J. Heat Mass Transfer. 1994. V. 37, N 2. P. 1687–1697.
3. G.M. Carlomagno, A. Ianiro. Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance. A review. Experimental Thermal and Fluid Science. 2014. V. 58. pp. 15–35.
4. К.Н. Волков. Нестационарный теплообмен в области взаимодействия турбулентной струи с преградой. ТВТ. 2007. Т. 45, №:6. С. 896–904.

5. М.А. Большухин и др. Актуальные задачи развития экспериментальной базы для верификации CFD кодов при использовании в атомной энергетике. "Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева". 2012. №1 (94). С. 100–106.
6. Знаменская И.А., Фомичев В.И., Большухин М.А. Способ тепловизионного определения количественных пульсационных характеристик турбулентности неизотермического потока жидкости. Патент РФ № 2677793 от 30.09.2014.
7. M. Van Dyke. An album of fluid motion. Parabolic Press, Stanford, Ca. 1982. 174 p.
8. A.J. Smits, T.T. Lim (eds). Flow Visualization: Techniques and Examples, 2nd edn. 2012. Imperial College Press, London, UK. 444 pp.
9. Перепелица Б. В. Визуальное исследование течения микроструи в узком канале. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2013. Т. 12, №1. С. 134–140.
10. V. Tesar. Impinging jets. In Vortex Rings and Jets: Recent Developments in Near-Field Dynamics. D. T. H. New, S. C. M. Yu, eds. Springer. 2015. P.191–213.
11. Nebuchinov A. S., Lozhkin Y. A., Bilsky A. V., and Markovich D. M. Combination of PIV and PLIF methods to study convective heat transfer in an impinging jet. Experimental Thermal and Fluid Science. 2017. N. 80. P. 139–146.
12. В.П. Вавилов. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2013. 544 стр.
13. M. Vollmer, K.-P. Möllmann. Fundamentals of Infrared Thermal Imaging, in Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 2010. 612 pp.
14. М. А. Большухин, И. А. Знаменская, Д. Н. Свешников, В. И. Фоми-

- чев. Термографическое исследование турбулентных пульсаций воды при неизотермическом смешении. *Автометрия*. 2014. Т.50, №5. С. 75–83.
15. И. А. Знаменская, Е. Ю. Коротева, А. М. Новинская, Н. Н. Сысоев. Особенности спектров турбулентных пульсаций струйных затопленных течений воды. *Письма в "Журнал технической физики"*. 2016. Т. 13. С. 51–57.
 16. Jiang M., Machiraju R., Thompson D. Detection and visualization of vortices. *Visualization Handbook*. Burlington: Elsevier, 2005. P. 295–309.