

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Шагиянова Анастасия Михайловна

**Анализ пограничного слоя течений жидкости на основе
высокоскоростной термографии**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научные руководители – *Сысоев Николай Николаевич,
доктор физико-математических наук,
профессор.*

*Коротеева Екатерина Юрьевна,
кандидат физико-математических наук.*

Официальные оппоненты – *Скорнякова Надежда Михайловна,
доктор технических наук, доцент, кафедра
физики НИУ «МЭИ», зав. кафедрой.*

*Шкуринов Александр Павлович,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, профессор,
физический факультет МГУ имени
М.В. Ломоносова, профессор.*

*Дубнищев Юрий Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
Новосибирский государственный
технический университет, профессор.*

Защита диссертации состоится «3» июня 2021 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета МГУ.01.12 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, Физический факультет МГУ, ауд. ____.

E-mail: igorkartashov@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/dissertations/364894063/>

Автореферат разослан «__» апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.



И.Н. Карташов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Успешное развитие современной экспериментальной физики невозможно представить без активного внедрения цифровых технологий в методы измерений и обработки данных. Появление цифровых тепловизионных камер, позволяющих получать качественные изображения во всем практически значимом диапазоне инфракрасного излучения, их высокое пространственное, временное разрешение и низкая инерционность существенно расширяют круг задач, доступных для термографических исследований в теплофизике, гидродинамике, геофизике, медицинской физике. Данная работа посвящена апробации и отработке нового метода – термографии высокоскоростных потоков жидкости для количественных исследований пограничных течений жидкости.

Известно, что тепловые пульсации в турбулентном пограничном слое неизотермического течения жидкости существенно воздействуют на обтекаемые поверхности, что может привести к возникновению термической усталости материалов. Проблема прогнозирования такого воздействия при численном моделировании заключается в недостатке достоверных экспериментальных данных по температурным, энергетическим, пульсационным характеристикам пограничного слоя жидкости – для верификации расчетов. Это связано, прежде всего, с отсутствием надежных экспериментальных методов диагностики нестационарных тепловых полей: методики должны давать возможность визуализировать как нестационарное течение в объеме, так и в пограничном слое жидкости и непосредственно на стенках.

В теплообмене неизотермического потока с твердой поверхностью решающую роль играет непосредственно пристеночная область течения, регистрация параметров которой позволяет контролировать механизмы теплопередачи и исследовать пограничный слой жидкости. Сложность регистрации заключается, с одной стороны, в необходимости измерения многомасштабных турбулентных структур, требующих бесконтактных измерений с высоким пространственным и временным разрешением. С другой стороны, пограничный турбулентный слой вблизи стенки является областью высоких градиентов скорости, которая практически не разрешается известными методами на основе засева частицами. Таким образом, применимость традиционных методов, таких как лазерная доплеровская анемометрия, анемометрия по изображениям частиц, теневые методы и др.,

для исследований затопленных турбулентных течений в пограничном слое жидкости весьма ограничена.

Цель диссертационной работы заключается в апробации и отработке метода термографии высокоскоростных потоков жидкости (ТВПЖ) для количественных исследований:

1. турбулентных пограничных слоев жидкости вблизи стенки при импактном натекании затопленной струи на преграду и неизотермическом смешении двух затопленных струй;
2. течения незатопленной высокоскоростной гидроструи.

Научная новизна работы

Представленные в диссертационной работе результаты основаны на принципиально новом методе, позволяющем применять инфракрасную (ИК) термографию для количественных исследований гидродинамических течений [1]. В отличие от традиционных методов, данный – позволяет анализировать динамику течения жидкости непосредственно в узком слое вблизи твердой обтекаемой поверхности. В работе впервые определены и обоснованы пространственные и температурные диапазоны применимости метода.

Метод ТВПЖ позволил впервые экспериментально получить количественные данные для ряда струйных течений воды:

1) спектральные характеристики (частотой до 150 Гц) приповерхностных пульсаций в пристеночном течении импактной затопленной струи;

2) область двойного инерционного интервала в спектре турбулентных пульсаций приповерхностного течения, образующегося при смешении двух затопленных струй в дискообразном тройниковом устройстве;

3) динамические и пространственные характеристики теплового излучения с поверхности высокоскоростной незатопленной струи.

Практическая значимость работы

Метод ТВПЖ применим для количественного исследования неизотермических динамических или турбулентных течений жидкости в приповерхностной области. Визуализация течения осуществляется непосредственно из водного слоя без использования засева, что повышает возможность детальной регистрации различных масштабов вихревых структур.

Полученные в работе результаты могут быть использованы для задач тепло- и массопереноса. Знание тепловых и динамических характеристик пограничных струйных течений необходимо для предотвращения

термической усталости материалов оболочек. Результаты, полученные с помощью метода ТВПЖ, по турбулентным пограничным слоям импактной затопленной струи могут быть использованы в качестве эмпирических данных для верификации алгоритмов моделей турбулентных течений жидких сред.

Достоверность работы

Результаты и выводы, представленные в работе, получены на основе многократно повторенных экспериментов. Проведены калибровочные эксперименты для исследуемых оптических окон и разностей температур. Большой объем статистических данных позволяет судить о достоверности полученных результатов. Рассчитанные пульсационные характеристики турбулентного пограничного слоя сравниваются с известными моделями турбулентности. Полученные результаты нестационарных тепловых полей пристеночной области струйных течений не противоречат результатам работ других исследовательских коллективов.

Положения, выносимые автором на защиту

- Метод термографии высокоскоростных потоков жидкости (ТВПЖ) позволяет бесконтактно проводить количественный анализ пограничных слоев воды толщиной не более 0.27 мм в неизотермических течениях с температурами 10 – 50 °С в инфракрасном диапазоне излучения 3.7 – 4.8 мкм.
- Разность температур в диапазоне 5 – 35 °С при динамическом смешении неизотермических потоков выступает в качестве «пассивной примеси» и слабо влияет на спектральные характеристики течения в пристеночной области.
- Изменения пульсационных и спектральных характеристик в диапазоне частот до 150 Гц, полученных с помощью метода ТВПЖ, отражают динамику структуры потоков в затопленных течениях, что продемонстрировано для пристеночной области импактной затопленной струи жидкости $Re_{jet} = 4000 - 35000$.
- С использованием метода ТВПЖ впервые экспериментально зарегистрирован двойной инерционный интервал в области приповерхностного смешения двух затопленных струй воды в тройниковом устройстве.
- Высокоскоростная термографическая регистрация может применяться для получения новых данных о тепловых процессах при запуске и развитии незатопленных струй жидкости со скоростью истечения до 270 м/с.

Апробация работы и публикации

По результатам работы опубликовано 6 статей в реферируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и RSCI, и 10

статей в трудах всероссийских и международных конференций. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-79-00162 (участник) и РФФИ № 18-19-00672 (участник) и в рамках научной школы МГУ «Фундаментальные и прикладные исследования в области цифровых квантовых технологий, фотоники и микроэлектроники» и междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Основные результаты, изложенные в диссертации, представлены в 18 докладах на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. X Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (Крым, 2014)
2. 25th International symposium on transport phenomena (ISTP-25) (Таиланд, Краби, 2014)
3. 10 Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-10) (Италия, Неаполь, 2015)
4. 13th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (Польша, Гданьск, 2016)
5. GraphiCon2016, 26-я Международная конференция и школа-семинар по компьютерной графике и зрению (Нижний Новгород, 2016)
6. Ломоносовские чтения – 2017 (Москва, МГУ, 2017)
7. XIV Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» ОМИП-2017 (Москва, 2017)
8. Всероссийская конференция молодых учёных-механиков, YSM-2017 (Сочи, 2017)
9. The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (Япония, Кумамото, 2017)
10. 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference (Германия, Берлин, 2018)
11. 7-я Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, 2018)
12. Ломоносовские чтения - 2019 (Москва, МГУ, 2019)
13. XXII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Москва, 2019)
14. 15-я Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков - ОМИП 2019» (Москва, 2019)
15. XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019)

16. 15th Asian Symposium on Visualization (ASV15) (Корея, Пусан, 2019)
17. 12th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-12) (Тайвань, 2019)
18. Ломоносовские чтения – 2020 (Москва, МГУ, 2020)

Личный вклад автора

В основу диссертации легли результаты исследований, проведенных в период 2014 – 2020 гг. на кафедре молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в проведении лично или совместно с коллегами всех описанных в диссертационной работе экспериментов, обработке и анализе полученных результатов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, благодарностей и списка цитируемой литературы (134 ссылки). Объем диссертации составляет 112 страниц и содержит 46 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и положения, выносимые на защиту. Также аргументированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны объект и предмет исследования, его методология.

Первая глава посвящена методам визуализации течений в жидкости и в газе. Обсуждаются работы по исследованию струйных течений, механизмов турбулизации в пристеночной области и тепломассопереноса потока со стенкой.

В разделе 1.1 приведены основные оптические методы диагностики затопленных течений в жидкости. Рассмотрены преимущества и недостатки контактных и бесконтактных, одноточечных и полевых методов, а также примеры модификаций методов визуализации. Поднимается вопрос «бесконтактности измерения» для наиболее распространенных на данный момент методик на основе засева частицами потока, которые применяются для исследований турбулентных течений. Сочетание больших градиентов скорости вблизи твердой стенки и разнообразие масштабов вихревых структур в турбулентном потоке приводят к ограниченности использования традиционных методов.

Раздел 1.2 посвящен современному методу измерения и анализа теплового излучения объектов и потоков – инфракрасной термографии. Он позволяет регистрировать динамические двумерные поля собственного излучения объекта. Интерес к термографии обусловлен как появлением тепловизоров с высокой чувствительностью и низким временем отклика, так и возможностями цифровой обработки, анализа, хранения термографических изображений и фильмов. Задачи использования термографии ограничены в гидродинамике, в связи с непрозрачностью жидкости в среднем ИК диапазоне спектра. Приведены примеры использования метода для жидкости – изучение испарения вскипающих капель, тонких пленок, приповерхностных медленных течений жидкости и др. Отмечено, что в основном инфракрасная регистрация проводится либо со свободной поверхности жидкость-газ [2,3], либо через металлические подложки [4,5]. Исследования неизотермических турбулентных течений жидкости на основе тепловизионных измерений практически отсутствуют.

В **разделе 1.3** приведена характеристика струйных течений. Обсуждается их роль в процессах тепломассообмена и основные параметры, оказывающие влияние на поток. Также описывается строение импактных затопленных струй, дается их классификация. Стоит отметить, что регистрируемая картина течения очень чувствительна к пространственному разрешению метода или используемой сетке для численного моделирования. Далее приведен обзор работ для струйных турбулентных течений.

В **разделе 1.4** описаны механизмы турбулизации потока и формирования отрывного течения в импактной струе. Обсуждаются локальные характеристики теплообмена в пристенной области, а именно локальные максимумы и минимумы в распределениях чисел Нуссельта. Распределение числа Нуссельта для импактной струи обычно имеет два пика, один из которых расположен в точке торможения потока, а положение другого может зависеть от параметров течения. О причинах их возникновения в литературе до сих пор ведутся споры. Появление вторичного пика связывают с ламинарно-турбулентным переходом и увеличением кинетической энергии турбулентности в пристеночной части струи. Также вторичные максимумы могут быть обусловлены истончением пограничного слоя и интенсивным сдвигом между пристеночной струей и окружающей жидкостью. Альтернативная точка зрения заключается в изменении характеристик теплообмена в области взаимодействия струи с преградой из-за генерации крупномасштабных структур.

Раздел 1.5 посвящен вихревым когерентным структурам в импактной затопленной струе, которые играют ключевую роль в усилении теплообмена.

Описаны механизмы образования первичного и вторичного вихря. Отмечено, что движение вихревых структур оказывает влияние на распределение компонент скорости в пристенной области. Обсуждается взаимосвязь между распределением числа Нуссельта, отрывом потока на стенке и утолщением теплового пограничного слоя.

Авторами различных работ отмечается, что с увеличением числа Рейнольдса шансы экспериментальной регистрации вторичных вихрей в поле потока уменьшаются. Тем не менее, результаты, полученные с помощью численного моделирования, свидетельствуют об эволюции вторичного вихря сразу после прохождения первичного вихря даже при более высоких числах Рейнольдса.

В разделе 1.6 обсуждаются методы исследования турбулентных течений. Описывается идея каскадных процессов для развитой мелкомасштабной трехмерной турбулентности. Кратко изложена теория А.Н. Колмогорова (K41). Для двумерной турбулентности описано характерное появление двух инерционных интервалов – прямой каскад переноса энтропии, обеспечивающий диссипацию, и обратный каскад кинетической энергии, перекачивающий кинетическую энергию в область больших масштабов. Большое количество работ посвящено численному моделированию двумерной турбулентности, в то время как примеров реализации ее в лабораторных условиях фактически нет. На практике черты квазидвумерной турбулентности проявляют крупномасштабные геофизические и астрофизические течения, магнитогидродинамические системы и мыльные пленки. Вопрос о существовании универсальных свойств турбулентности остается открытым.

В разделе 1.7 дается понятие гидродинамического пограничного слоя. Традиционно его разделяют на вязкий подслой и динамический пограничный слой. Приведены формулы для оценки толщины ламинарного и турбулентного пограничных слоев.

В разделе 1.8 представлены оценки колмогоровского и тейлоровского масштабов для экспериментальных параметров течений, используемых в данной работе.

Во второй главе дается описание метода ТВПЖ, экспериментальных установок и используемого термографического оборудования.

В разделе 2.1 изложена физическая сущность метода ТВПЖ. Вода поглощает инфракрасное излучение в рабочем диапазоне тепловизионной камеры 3.7 – 4.8 мкм на субмиллиметровом масштабе. Регистрация через ИК-прозрачное окно позволяет визуализировать непосредственно пристеночный слой жидкости. Для измерений не требуется использования засеивающих

частиц или красителя; индикатором течения служит разность температур. Фокусировка камеры настраивается на внутреннюю поверхность ИК-прозрачного окна.

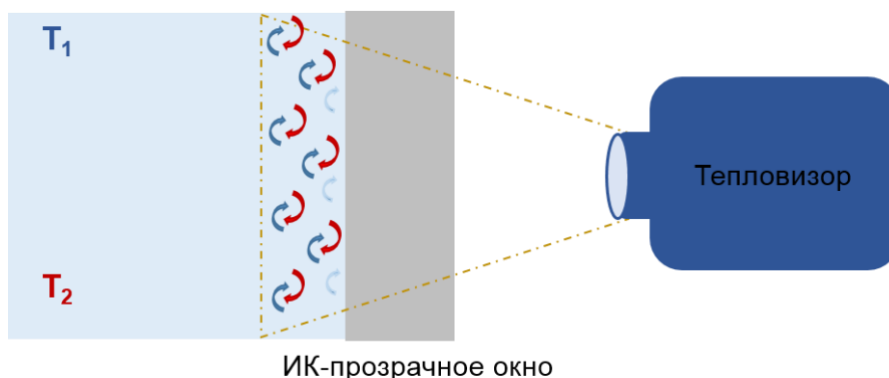


Рисунок 1. Схема используемого метода регистрации температурных пульсаций с пристеночного слоя жидкости.

Метод ТВПЖ применим для определенного класса течений. Поток должен быть неизотермическим, а само течение – динамическим или турбулентным (рис. 1). Вихри в турбулентном неизотермическом потоке образуют «кластеры» одинаковой температуры. Пульсации теплового поля обусловлены гидродинамикой течения, что приводит к корреляции пульсаций температуры и пульсаций скорости [6].

В разделе 2.2 обсуждаются особенности измерений через ИК-прозрачную стенку. Регистрация тепловых полей проходит через окна с высоким коэффициентом пропускания τ в рабочем диапазоне инфракрасной камеры. Ранее эксперименты проводились для различных материалов: полипропилен ($\tau \sim 50\%$), селенид цинка ($\tau < 70\%$) и фторид кальция ($\tau > 90\%$). Результаты измерений температуры невозмущенной жидкости в резервуаре через окна из фторида кальция, селенида цинка, стекло (непрозрачное) показали, что наилучшее совпадение данных наблюдается в диапазоне температур $\sim 25\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Обсуждается влияние теплопроводности, излучения и естественной конвекции на эксперимент. На основе уравнения теплопроводности проведена оценка времени остывания или нагревания стенки резервуара для параметров эксперимента. Оно составило более 1 с, что на порядок больше регистрируемых в работе пульсаций 10 – 100 Гц.

Раздел 2.3 посвящен характеристикам тепловизионных камер. Описаны основные принципы тепловизионной регистрации. Приведен вывод общей измерительной формулы, используемой в большинстве коммерческих тепловизионных систем.

В разделе 2.4 обсуждается диапазон применения метода ТВПЖ и точность измерений. На регистрируемое инфракрасной камерой излучение оказывают влияние многие внешние факторы: коэффициент излучения поверхности, угол наблюдения, расстояние до источника, окружающая среда, (например, фоновая температура и влажность воздуха) [7]. Это приводит к тому, что абсолютная точность приборов мала по сравнению с известными точечными контактными методами измерений. С другой стороны, тепловизоры позволяют регистрировать малые контрасты температур порядка десятков милликельвинов. Одним из ключевых показателей точности термографических измерений является тепловая чувствительность камеры (noise equivalent temperature difference или NETD) [8], которая выражается пороговым значением чувствительности, эквивалентной уровню шума. Для используемого в данной работе тепловизора NETD составляет 18 мК при 25°C и < 25 мК в других диапазонах.

Современные тепловизионные камеры обладают высоким пространственным разрешением (рис. 2). Стоит учитывать, что пространственное разрешение также зависит от выбора объектива и фокусного расстояния, поэтому его принято оценивать общим количеством пикселей в кадре, которое соответствует числу регистрируемых точек на термограмме.

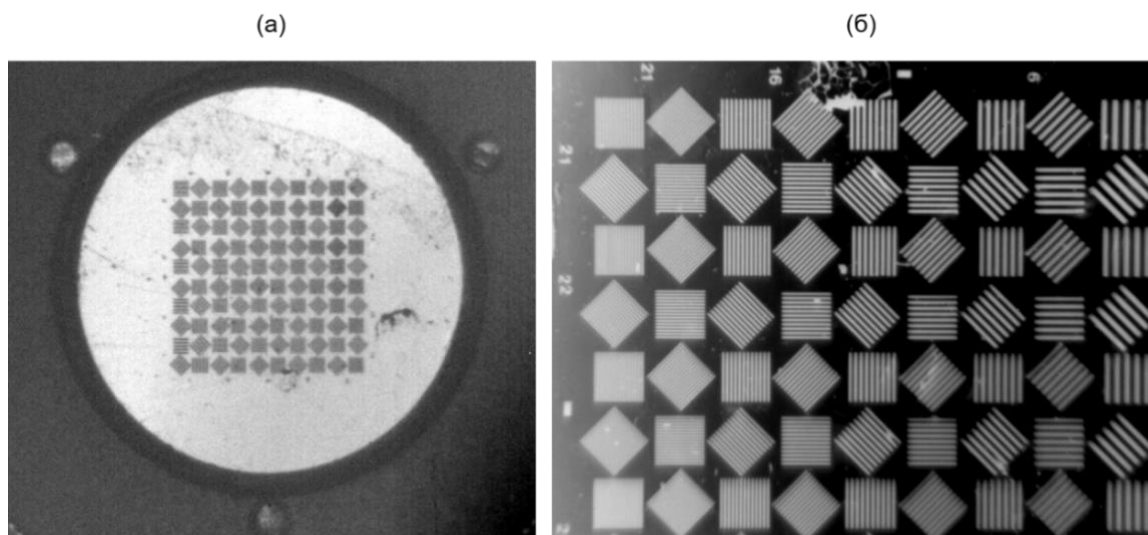


Рисунок 2. Термографическое изображение миры, снятое через ИК-прозрачное окно, (а) объектив 50 мм, (б) макрообъектив.

Диапазон температур, регистрируемый тепловизором, связан с временем интеграции съемки. Для экспериментов выбран интервал от 5 до 80 °C, что соответствует времени интеграции 980–1030 мкс.

В данной работе измерения проводились с помощью тепловизионной камеры FLIR SC7700, работающей в ИК диапазоне 3.7–4.8 мкм, с максимально возможной частотой съемки 115 Гц в полнокадровом режиме 640x512

пикселей. Сочетание двумерности получаемого изображения, бесконтактной регистрации, высокой чувствительности и возможности скоростной съемки для ИК диапазона позволили получить новые данные для задач тепло- и массообмена.

В разделе 2.5 описываются методики обработки тепловизионных фильмов, полученных методом ТВПЖ. Для количественного анализа пограничных течений разработаны несколько направлений пост-обработки изображений:

- построение полей среднеквадратичных температурных пульсаций;
- расчет энергетических спектров мощности турбулентных пульсаций для каждого временного ряда, с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (FFT);
- определение характерных частот температурных пульсаций и степенных законов спектров мощности.

В разделе 2.6 приведена теоретическая оценка толщины регистрируемого слоя жидкости в ИК диапазоне излучения. Из-за сильной зависимости коэффициента поглощения воды от длины волны [9] возможна лишь интегральная оценка. Для рабочего диапазона тепловизора 99% интенсивности излучения поглощается на глубине $\delta = 0.1\text{--}0.4$ мм.

В третьей главе представлены результаты двух типов экспериментов по определению области применимости метода ТВПЖ, толщины слоя визуализации: динамический подход с погружением нагретого диска в контрастную воду и статический – с клиновидной щелью в ИК-прозрачной пластине, заполненной водой.

В разделе 3.1 описывается подход для анализа глубины регистрируемого методом ТВПЖ слоя воды с помощью погружения нагретого диска в контрастную жидкость вдоль ИК-прозрачного окна. Влияние теплопереноса за счет теплопроводности между диском и окружающей жидкостью и обтекания диска во время погружения минимизированы с помощью подбора экспериментальных параметров.

Толщина слоя воды δ , регистрируемого тепловизором в средневолновом ИК диапазоне, рассчитывается на основе полученных тепловых полей в передней части диска и сопоставления их геометрическим размерам диска. Показано, что для разности температур $dT = 5\text{--}30$ °С оценка диапазона глубины пограничного слоя, регистрируемого методом ТВПЖ, равна $\delta = 0.17 \pm 0.04$.

Этот эксперимент также позволил проанализировать влияние сопутствующих тепловых процессов при регистрации в пристеночном слое воды.

В разделе 3.2 приводится описание задачи с клиновидной щелью по определению слоя визуализации. Две пластины из фторида кальция толщиной 2 мм каждая вертикально расположены под углом с максимальным зазором в верхней части 0.5 мм. Клиновидное отверстие заполнено дистиллированной водой комнатной температуры. Для создания однородного фона использовано абсолютно черное тело (АЧТ) Fluke 4180 с задаваемой температурой. Измерения проведены для АЧТ температурой $T = 25\text{--}90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ниже (рис. 3) представлены зависимости регистрируемого излучения тепловизором на просвет от толщины водного слоя.

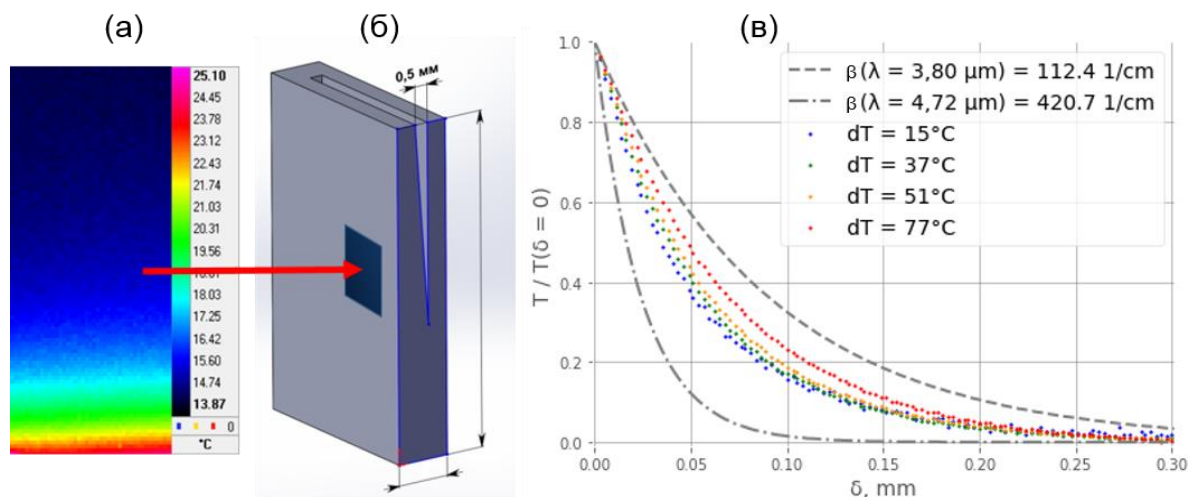


Рисунок 3. Пример термограммы (а), схема клиновидной пластины с щелью (б) и график регистрируемых тепловизором температур, нормированных на максимальное значение, от толщины водного слоя (в).

В данном эксперименте получено, что температурные контрасты $dT = 9\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ регистрируются через слой воды толщиной до 0.27 мм.

Четвертая глава посвящена применению метода ТВПЖ для экспериментального исследования струйных течений для трех конфигураций (рис. 4): импактная затопленная струя (а), взаимодействие двух затопленных струй в дискообразном тройниковом устройстве (б), высокоскоростная незатопленная струя (в).

Верификация и апробация метода ТВПЖ проводится на основе данных, полученных для импактной затопленной струи, и сравнения их с известными результатами.

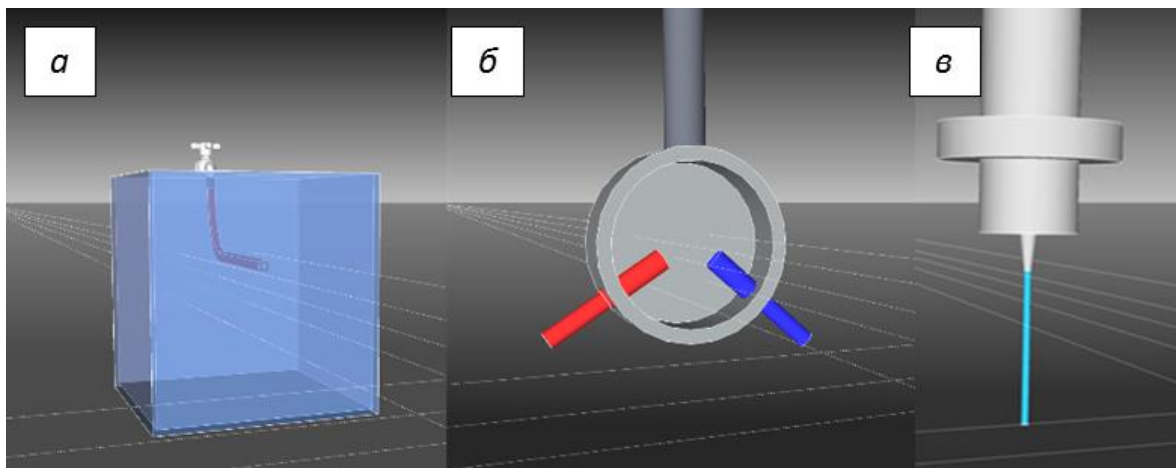


Рисунок 4. Схема экспериментальных установок струйных течений, рассмотренных в данной работе.

В разделе 4.1 приведены результаты измерений пристеночной неизотермической области импактной затопленной струи, полученные методом ТВПЖ. Импактная струя сочетает в себе несколько режимов течения и достаточно хорошо изучена, что часто используется для задач численного моделирования турбулентных течений.

Большинство тепловых изображений записываются с частотой 300 Гц (с уменьшенным окном регистрации), что, согласно теореме Котельникова, позволяет наблюдать явления потока с частотой до 150 Гц. Пространственное разрешение для экспериментов лежит в диапазоне 0.08–0.15 мм/пиксель.

Исследования проводятся для значений сопел $D = 1\text{--}4$ мм, расстояний от среза сопла до поверхности соударения $H/D = 1\text{--}6$, скоростей потока $v_{\text{jet}} = 0.7\text{--}10$ м/с, чисел Рейнольдса $Re_{\text{jet}} = 4000\text{--}35000$, рассчитанных для параметров на срезе сопла.

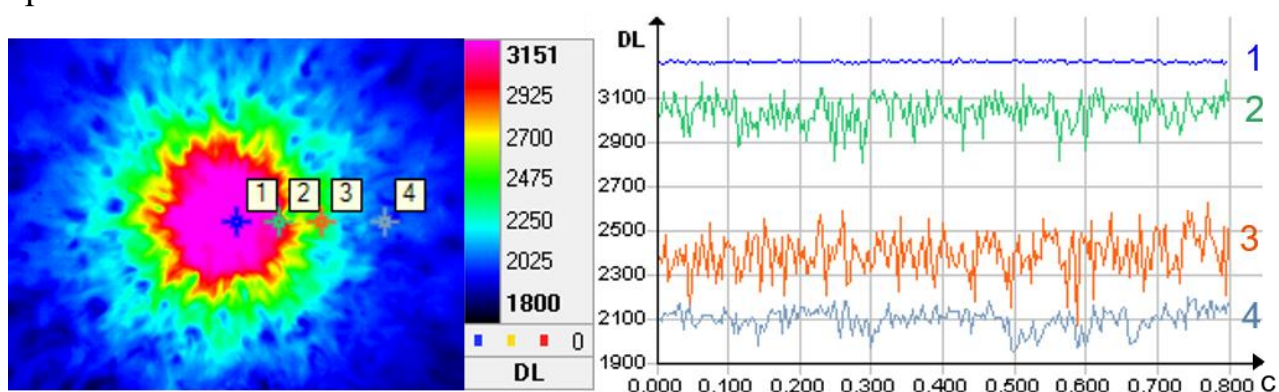


Рисунок 5. Пример мгновенной термограммы и временной развертки температуры на четырех разных расстояниях от геометрического центра струи: $R/D = 0.2, 1.5, 3$ и 5 .

Течение импактной затопленной струи в пристеночной зоне зависит от радиального расстояния от центра струи R . Принято выделять область

торможения потока, переходную и область отрыва потока. Показано, что каждой из этих зон соответствует свой характер пульсаций (рис. 5).

В области торможения потока пульсации практически не наблюдаются. При удалении от центра струи амплитуда пульсаций возрастает. Течение в пристеночной области импактной струи зависит от числа Рейнольдса Re_{jet} и относительного расстояния от среза сопла до поверхности соударения H/D [6].

Количественный анализ нестационарных тепловых полей проведен на основе среднеквадратичной величины температурных флуктуаций, которая рассчитывается согласно формуле (1):

$$T_{rms}(x, y) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [T_i(x, y) - \bar{T}(x, y)]^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Здесь $T_i(x, y)$ – значение мгновенной температуры в точке (x, y) на термограмме, $\bar{T}(x, y)$ – усредненная по времени температура в точке (x, y) , N – количество термограмм, по которым проводилось усреднение и расчет.

Амплитуда тепловых пульсаций минимальна в области торможения потока. Далее по потоку среднеквадратичная величина температурных флуктуаций достигает максимума. Обнаружено, что для расстояний $H/D = 2$ в области торможения потока амплитуда пульсаций струи не превышает 2% от максимального значения (рис. 6). Для $H/D \geq 6$ в центральной области амплитуда пульсаций возрастает, что свидетельствует об отсутствии влияния потенциального ядра струи, которое, как известно, распространяется на расстояниях до $H/D = 6$.

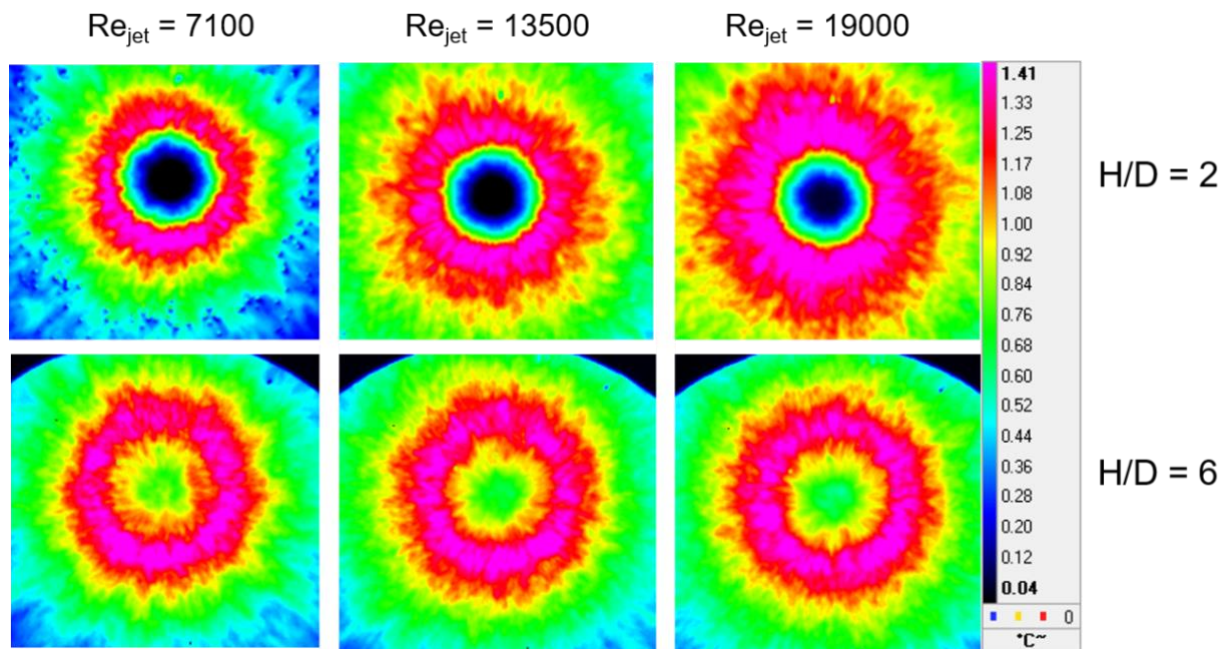


Рисунок 6. Поля среднеквадратичной величины тепловых пульсаций для $Re_{jet} = 7100, 13500, 19000$, рассчитанные по 256 кадрам тепловизионной съемки, частота съемки 300 Гц.

С помощью метода ТВПЖ получено, что амплитуда тепловых пульсаций минимальна в области торможения потока и достигает максимума в переходной области $R/D = 2.4\text{--}3.7$ (рис. 7).

Также показано, что с увеличением расстояния H/D положение максимума среднеквадратичных пульсаций отдалается от центра струи. Ранее полученные данные свидетельствуют о возникновении вторичного вихря для схожих значений Re_{jet} и H/D именно в этой области [9,11].

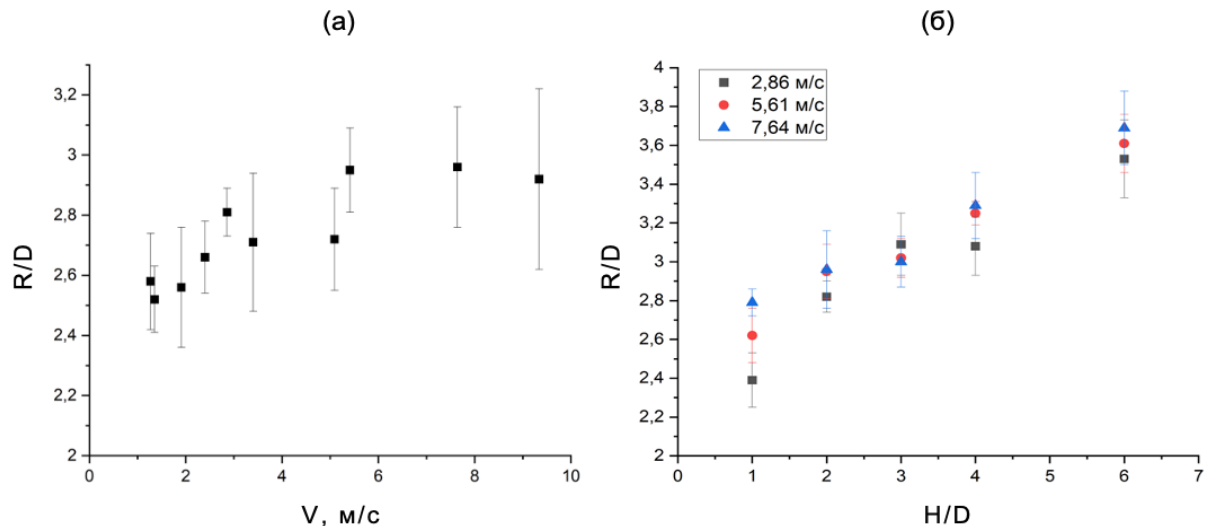


Рисунок 7. Зависимость радиального расстояния, на котором достигается максимум интенсивности температурных пульсаций в пристеночной зоне импактной струи, от числа Рейнольдса при $H/D = 2$ (а) и от относительного расстояния от среза сопла до поверхности соударения H/D для $D = 2$ мм (б).

Из температурных зависимостей от времени построены энергетические спектры турбулентных флуктуаций пограничного слоя жидкости в диапазоне частот до 150 Гц (рис. 8). Область энергетического спектра, соответствующая инерционному интервалу, может быть описана степенной функцией f^α .

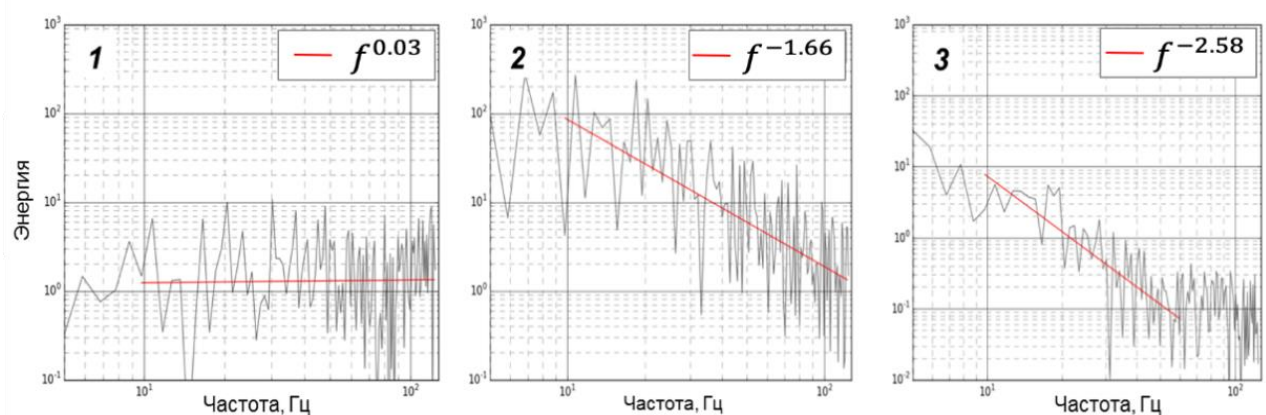


Рисунок 8. Пример спектров температурных пульсаций в трех выбранных точках потока 1) $R = 0$; 2) $R \sim 4 D$; 3) $R \sim 8 D$.

По форме спектров и сравнению их с известными моделями турбулентности можно говорить об особенностях областей течения и ламинарно-турбулентном переходе. Основным критерием при анализе спектров являлся их наклон, который был рассчитан по методу наименьших квадратов. Показано, что турбулентные свойства пограничного слоя зависят от радиального расстояния по потоку и коррелируют с характерными зонами течения в пограничном слое (рис. 9).

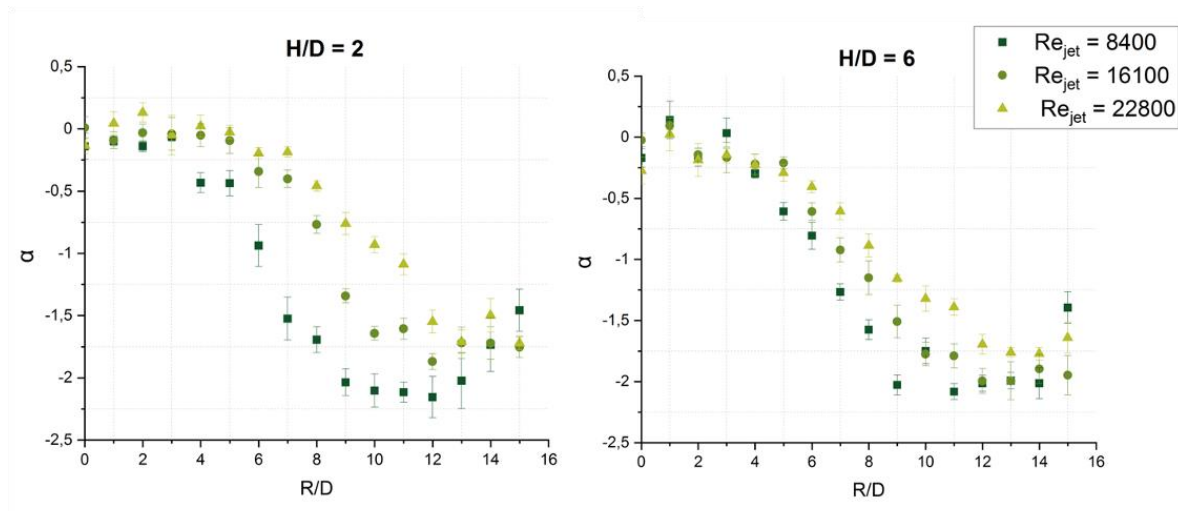


Рисунок 9. Изменение коэффициента наклона α энергетического спектра по мере удаления от точки торможения потока для $D = 2$ мм на расстоянии $H/D = 2$.

Изменение коэффициента наклона спектра α можно объяснить окончанием ламинарной области и переходом к турбулентным пульсациям.

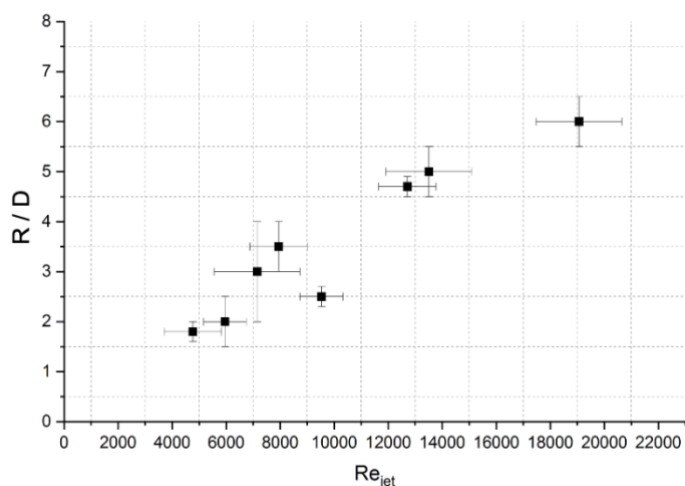


Рисунок 10. Зависимость радиуса области с наклоном спектра до $\alpha < 0.3$ от числа Рейнольдса Re_{jet} .

Вблизи точки торможения потока ($R/D < 2$) спектр мощности тепловых пульсаций практически не зависит от частоты. В области 3–12 R/D становится возможным выделить участок, сопоставимый классическому степенному закону Колмогорова « $-5/3$ » и соответствующий появлению инерционного интервала [12]. Далее по потоку наклон спектров увеличивается, а показатель степени, в основном, находится в интервале от -1.8 до -3.

Зависимость размера области течения с горизонтальным наклоном спектра от чисел Рейнольдса представлена на рис. 10. Для затопленных

импактных струй жидкости ($H/D = 2$) с $Re_{jet} = 4 \cdot 10^3 - 10^4$ область перехода лежит в диапазоне $R/D = 1.7 - 3.5$, для $Re_{jet} > 1.2 \cdot 10^4$ - $R/D = 4.5 - 6$.

Наличие разности температур в потоке необходимо для визуализации гидродинамики течения с помощью метода ТВПЖ. В данном случае, разность температур в потоке $dT = T_{jet} - T_0$ может рассматриваться в качестве пассивного скаляра. Проведенные эксперименты для различных значений dT в диапазоне от 5 до 25 °C при фиксированных других параметрах струи показали, что тепловые пульсации проявляют аналогичное спектральное поведение на тех же радиальных расстояниях от точки торможения потока (рис. 11).

Кроме того, обнаружено, что спектры, полученные для холодной струи, погруженной в резервуар с теплой водой $dT < 0$, соответствуют тому же масштабу, что и для горячей струи, погруженной в резервуар с холодной водой $dT > 0$. Это наблюдение подтверждает роль температуры как пассивной примеси в изучаемом потоке. Однако значения dT по меньшей мере 5° C или выше являются предпочтительными для достижения желаемого контраста на тепловых изображениях.

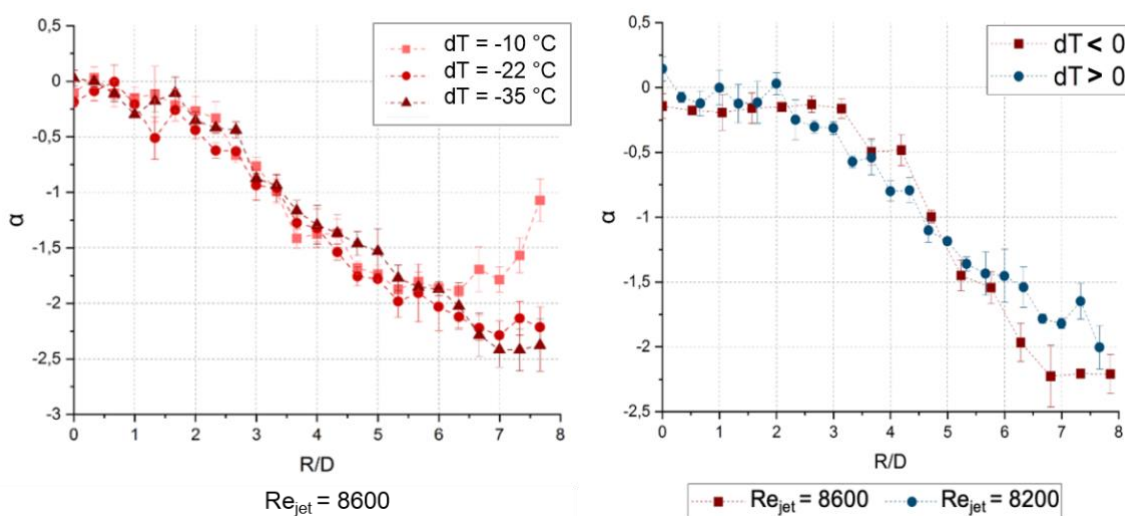


Рисунок 11. График зависимости наклона спектров от радиального расстояния при разных температурах.

В разделе 4.3 приведены результаты исследования неизотермического смешения двух струй, полученные с помощью метода ТВПЖ. В дискообразном тройнике холодная и горячая вода поступают через два боковых сопла под углом 120° и вытекают через сток в верхней точке сосуда диаметром 14 мм. Скорость истечения жидкости варьируется от 0.25 до 1.3 м/с, разность температур между потоками – от 5 до 40 °C. При смешении двух затопленных струй разной температуры в тройниковом устройстве визуализирована динамическая картина течения в пограничном слое жидкости

и рассчитаны поля среднеквадратичных пульсаций для симметричных и несимметричных потоков (рис. 12).

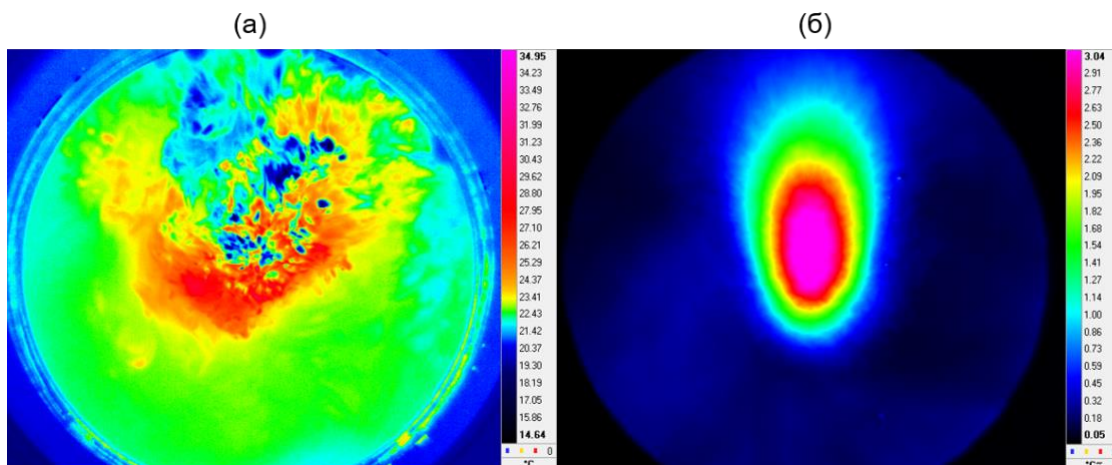


Рисунок 12. (а) пример термограммы взаимодействия двух затопленных неизотермических струй с температурой струй 10 и 40 °С со скоростью $v_{jet}=1.2$ м/с каждая с частотой съемки 115 Гц и (б) поле среднеквадратичной величины тепловых пульсаций, рассчитанное по 1150 кадрам.

Метод ТВПЖ позволил провести анализ спектральных характеристик процесса перемешивания воды в исследуемом режиме. В зоне интенсивного взаимодействия струй на расстоянии 0.5 – 2.0 см от сопел (на рис. 13 выделена красным) обнаружено наличие двух выделенных степенных интервалов на полученных спектрах.

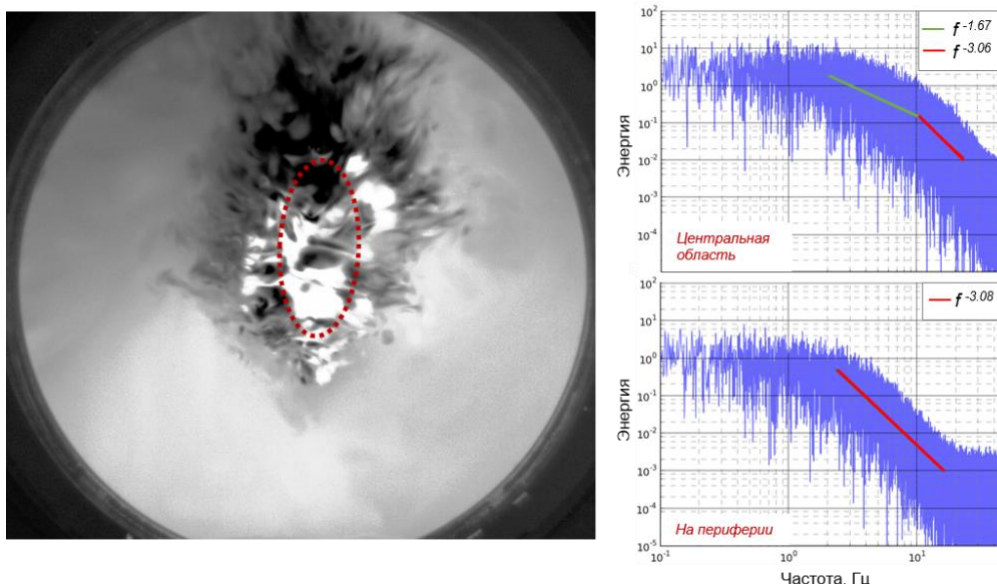


Рисунок 13. Пример термограммы взаимодействия двух затопленных струй одинакового напора, с температурами струй $T_1 = 12$ °С, $T_2 = 52$ °С и спектры в цилиндрическом тройнике: на периферии и в центрально-осевой области.

На низкочастотном участке спектра в диапазоне от 2 до 9 Гц наблюдается формирование наклона, близкого к $-5/3$. Далее от 9 до 22 Гц

следует второй участок с наклоном, близким к -3 . Лабораторная реализация обратного каскада энергии и спектральных законов квазидвумерной турбулентности крайне ограничена. При удалении от центрально-осевой области к периферии тройника перегиб на спектральных кривых исчезает.

В разделе 4.4 описываются результаты термографических измерений незатопленной высокоскоростной гидроструи, выполненных на промышленном станке гидроабразивной резки (модель Flow WaterJet Mach3). Впервые зарегистрированы динамические тепловые поля – пусковые процессы и динамика высокоскоростного потока со скоростью до 270 м/с, что соответствует $Re \approx 10^7$.

В данной задаче наблюдение ведется с периферийной области струи и ее воздушно-водной оболочки, в связи со свойством поглощения воды в исследуемом диапазоне ИК спектра. Эксперименты проведены с частотой кадров до 415 Гц при установленном коэффициенте излучения $\varepsilon = 0.95$ в ПО тепловизионной камеры. Метод ТВПЖ не позволяет получить точные измерения абсолютных значений температур в связи с особенностью регистрации «кажущейся» температуры. Однако тепловизионная съемка позволяет исследовать:

- динамику излучения (пульсации температуры в зависимости от времени);
- пространственное распределение излучения в сечениях струи в зависимости от расстояния до сопла;
- распределение температуры вдоль оси струи.

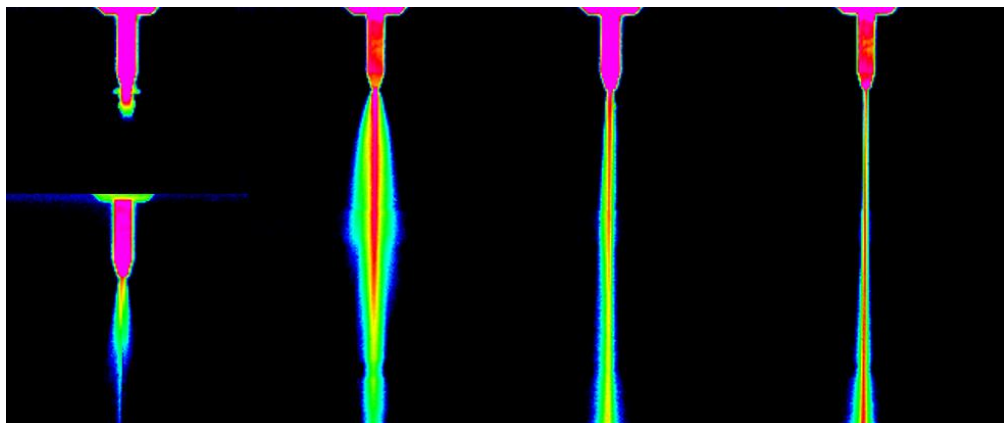


Рисунок 14. Термограммы пусковых процессов высокоскоростной незатопленной гидроструи в период до 0.01 с после запуска.

Экспозиция съемки позволяет регистрировать интегрально движущуюся от сопла ограниченную область струи при стартовом процессе (рис. 14). Проведен анализ распределения излучения незатопленной высокоскоростной струи на начальных стадиях пусковых процессов и в стационарном режиме течения.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

1. Экспериментально обоснована возможность применения метода ТВПЖ для количественного анализа пограничных слоев воды на примере струйных течений. Определены диапазон применения и область зоны визуализации метода ТВПЖ. Показано, что толщина слоя визуализации в диапазоне ИК излучения 3.7 – 4.8 мкм не превышает 0.27 мм.
2. Экспериментально показано, что разность температур между импактной струей и окружающей жидкостью $dT = 10 - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ играет роль «пассивной примеси» и слабо влияет на результаты измерений методом ТВПЖ.
3. Впервые визуализирована динамическая пристеночная область импактной затопленной струи жидкости – на основе метода ТВПЖ. Проведен расчет амплитудных и спектральных характеристик температурных пульсаций в диапазоне частот до 150 Гц в турбулентном пограничном слое для чисел Рейнольдса от 4000 до 35000, расстояний от сопла до поверхности соударения $H/D = 1 - 10$. Показано, что полученные зависимости среднеквадратичных пульсаций и показателя степени в спектральном законе связаны с изменениями интенсивности перемешивания и структуры потока в пристеночной области импактной струи.
4. Впервые экспериментально обнаружен двойной инерционный интервал в квазидвумерном турбулентном пограничном слое, образующемся при взаимодействии двух затопленных струй. При смещении точек по течению вдоль линии взаимодействия струй получен наклон спектра, близкий к «-3».
5. Впервые экспериментально зарегистрирована динамика тепловых полей высокоскоростных (со скоростью до 270 м/с) незатопленных струйных потоков на начальных стадиях пусковых процессов и при стационарных режимах течения.

Список цитированной литературы:

1. Патент № RU 2 577 793 C1 Знаменская И.А., Фомичев В.И., Большухин М.А., Крепков В.П., Свешников Д.Н. Способ тепловизионного определения количественных пульсационных характеристик турбулентности неизотермического потока жидкости (2014).
2. Judd K.P., Smith G.B., Handler R.A., Sisodia A. The thermal signature of a low Reynolds number submerged turbulent jet impacting a free surface // *Phys. Fluids*. 20.11 (2008): 115102.
3. Dupont J., Mignota G., Paladino D., Prasser H. Mid wave infrared thermography of water films in condensing and evaporating environments // *Nuclear Engineering and Design*. 336 (2018): 80-89.
4. Nakamura H., Shiibara N., Yamada S. Quantitative measurement of spatio-temporal heat transfer to a turbulent water pipe flow // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 63 (2017): 46-55.
5. Carlomagno G.M., Ianiro A. Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance: A review // *Exp. Thermal Fluid Sci*. 58 (2014): 15-35.
6. Nebuchinov A.S., Lozhkin Y.A., Bilsky A.V Combination of PIV and PLIF methods to study convective heat transfer in an impinging jet // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 80 (2017): 139-146.
7. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е издание, доп. М. Издательский дом Спектр, (2013), С. 544.
8. Astarita T., Carlomagno, G. M. Infrared Thermography for Thermo-Fluid-Dynamics // Springer Ed., Berlin (2013), P. 224.
9. Zolotarev V. M., Mikhilov B. A., Alperovich L. L., Popov S. I. Dispersion and absorption of liquid water in the infrared and radio regions of the spectrum // *Optics and Spectroscopy*. 26 (1969): 430-432.
10. Rohlf W., Haustein H. D., Garbrecht O., Kneer R. Insights into the local heat transfer of a submerged impinging jet: Influence of local flow acceleration and vortex-wall interaction // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 55 (2012) 7728-7736.
11. Yadav H., Agrawal A. Effect of vortical structures on velocity and turbulent fields in the near region of an impinging turbulent jet // *Physics of Fluids*. 30 (2018) 035107.
12. Фрик П.Г. «Турбулентность: подходы и модели» // Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований. (2003), С. 292.

**Публикации автора по теме диссертации,
индексируемые Web of Science, Scopus, RSCI**

1. Koroteeva E., Shagiyanova A., Irina Znamenskaya I., Sysoev N. Time-resolved thermographic analysis of the near-wall flow of a submerged impinging water jet // *Experimental Thermal and Fluid Science* 121 (2021): 110264. (Q1, IF: 3.444)
2. Знаменская И.А., Шагиянова А.М., Коротеева Е.Ю., Муратов М.И., Рязанов П.А. Анализ больших массивов данных при визуализации динамических тепловых полей // *Научная визуализация* 12.5 (2020): 13 – 24. [A. Znamenskaya, A.M. Shagiyanova, E.Yu. Koroteeva, M.I. Muratov, P.A. Ryazanov. Analysis of large visualization datasets for thermographic studies in fluid dynamics // *Scientific Visualization* 12.5 (2020): 13 – 24.] (IF: 0.268)
3. Шагиянова А.М., Коротеева Е.Ю., Знаменская И.А., Дашян М.Э., Благонравов Л.А., Сысоев Н.Н. Анализ области визуализации пристеночного слоя жидкости при регистрации методами высокоскоростной термографии // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия* 2 (2020): 31 – 35. [Shagiyanova A.M., Koroteeva E.Y., Znamenskaya I.A., Dashyan M.E., Blagonravov L.A., Sysoyev N.N. Analysis of the Visualization Region in Near-Wall Fluid Layer by High-Speed Infrared Thermography // *Moscow University Physics Bulletin* 75 (2020): 143 – 147.] (IF: 0.538)
4. Znamenskaya I., Koroteeva E., Shagiyanova A. Thermographic analysis of turbulent non-isothermal water boundary layer // *Journal of Flow Visualization and Image Processing* 26 1 (2019): 49 – 56. (IF: 0.19)
5. Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Yu., Shirshov Ya.N., Novinskaya (Shagiyanova) A.M., Sysoev N.N. High speed imaging of a supersonic waterjet flow // *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 14.2 (2017): 185-192. (IF: 0.524)
6. Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Новинская (Шагиянова) А.М., Сысоев Н.Н. Особенности спектров турбулентных пульсаций струйных затопленных течений воды // *Письма в Журнал технической физики, и Наука. С.-Петербург. отд-ние* 13 (2016): 51-57. [Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Y., Novinskaya A.M., & Sysoev N. N. Spectral peculiarities of turbulent pulsations of submerged water jets // *Technical Physics Letters* 42.7 (2016): 686 – 688.] (IF: 0.773)

Другие публикации

1. Дашян М.Э., Коротеева Е.Ю., Шагиянова А.М. Анализ возможностей ИК-термографии при регистрации динамических процессов в пристеночном слое воды // Труды XXII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (2019) 364-366.
2. Коротеева Е.Ю., Знаменская И.А., Шагиянова А.М., Рязанов П.А. Количественный анализ динамических термограмм пограничных слоев жидкости // Оптические методы исследования потоков: Труды XV Международной научно-технической конференции, «Перо» (2019) 164-169.
3. Koroteeva E., Znamenskaya I., Novinskaya A. Estimating turbulent boundary layer characteristics by high-speed infrared thermography // 14th Quantitative Infrared Thermography Conference, QIRT Council (2018) 451-455.
4. Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Новинская А.М., Рязанов П. Исследование пограничного неизотермического слоя жидкости на основе высокоскоростной термографии // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену: в 3 т. С. 582, Москва 1 (2018) 92-95.
5. Koroteeva E., Znamenskaya I., Ryazanov P., Novinskaya A. Velocimetry of water boundary layer flows by thermal imaging // Proceedings of 11 Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-11) Япония (2017) 087-1-087-3.
6. Znamenskaya I.A., Shirshov Y.N., Koroteeva E.Y., Novinskaya A.M., Sysoev N.N. High speed imaging of a supersonic waterjet flow // 13th Quantitative infrared thermography conference, Gdansk, Poland 158 (2016) 965-970.
7. Znamenskaya I., Koroteeva E., Sysoev N., Novinskaya A. High-speed IR thermography of submerged turbulent water jets // 13th Quantitative Infrared Thermography Conference, Gdansk, Poland (2016) 433-439.
8. Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Новинская А.М. Термографическая визуализация струйных затопленных турбулентных течений // GraphiCon2016 Труды Международной научной конференции, ННГАСУ (2016) 323-326.
9. Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Y., Novinskaya A.M., Fomichev V.I. Thermographic analysis of turbulent non-isothermal water boundary layer // 10 Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-10), E-Book Proceedings, Naples, Italy (2015) 159-1-159-6.
10. Koroteeva E., Znamenskaya I., Novinskaya A. Heat flux measurements of impinging jet turbulent flow using thermography // 25th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-25), Bangkok, Thailand (2014) 52-1-52-5.