

УДК 535-15

ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ВОДЫ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ СМЕШЕНИИ

М. А. Большухин¹, И. А. Знаменская², Д. Н. Свешников¹,
В. И. Фомичев¹

¹ ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И. И. Африкантова»,
603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский пр., 15

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 2
E-mail: znaten@phys.msu.ru

Анализируются возможности использования термографии для количественного исследования частотных характеристик неизотермических пульсаций воды у стенок сосуда, прозрачных для инфракрасного излучения. Проведены тепловизионные исследования динамики температуры в зоне контакта неизотермической жидкости со стенкой на простых моделях. Измерены частоты пульсаций температуры на внутренней поверхности сосуда через стенку, прозрачную для ИК-излучения, с помощью тепловизора с точной фокусировкой объектива. С использованием преобразования Фурье построены спектральные кривые пульсаций. Показано наличие спектров Колмогорова (закон $-5/3$) в исследованном неизотермическом течении в канале тройникового соединения, что позволяет характеризовать процесс как развитую турбулентность течения воды в зоне пограничного слоя, примыкающей к окну.

Ключевые слова: термография, турбулентное перемешивание, пульсация температуры, спектр.

Введение. С развитием относительно недорогих многопроцессорных вычислительных систем наметилась чёткая тенденция внедрения и использования программ вычислительной гидродинамики (CFD — Computational Fluid Dynamics) для решения задач атомной энергетики (АЭ), таких как обоснование специфических режимов эксплуатации реакторных установок, моделирование условий работы оборудования, функционирующего в условиях термоциклирования, оптимизация конструкции за счёт оперативного расчётного анализа набора вариантов и т. д.

Общей проблемой внедрения CFD в АЭ является практически полное отсутствие представительных экспериментальных данных, необходимых для создания и обоснования технологии их применения к описанию неизотермических течений. В «ОКБМ Африкантов» задача подготовки представительных экспериментальных данных решается в специализированной гидродинамической лаборатории, оснащённой самыми современными средствами регистрации полей температур и скоростей: лазерной системой для регистрации полей скоростей и тепловизором для регистрации полей температур. С использованием тепловизора в гидродинамической лаборатории выполняются комплексные термографические исследования осреднённых и пульсационных характеристик неизотермических течений [1, 2]. В предлагаемой работе показано, что пространственно-временные частотные характеристики этих пульсаций могут быть измерены тепловизором комплексно во всём поле пристеночного течения воды (панорамно) и с достаточно высокой точностью.

Инфракрасная термография есть неразрушающий метод для измерения приповерхностной температуры жидкости и газа [3, 4]. Основными преимуществами термографии являются: бесконтактность, низкая инерционность, высокая чувствительность, двумерность получаемого изображения. В последние 3–4 года в связи с появлением тепловизоров

класса FLIR 7000 были опубликованы отдельные работы по исследованиям динамических процессов в жидкости с помощью тепловизионных технологий, в которых, как правило, излучение регистрируется с открытой поверхности жидкость — газ. В [5] ИК-термография использована для измерения испарения вскипающих капель. Продемонстрировано, что быстропротекающие тепловые процессы в жидкости доступны для визуализации и анализа в миллисекундном диапазоне при регистрации с открытой поверхности. Эксперименты по изучению режимов течения и теплообмена в воздухе и воде в наклонных трубах с применением термографии проводились в [6]. Тепловые изображения на стенке с подогревом и поля локальных коэффициентов теплоотдачи были получены с помощью ИК-термографии. Распределение температуры по периметру трубы показывает максимум в верхней и минимум в нижней части трубы. В работе [7] предложена методика определения динамических температурных характеристик газовых потоков на основе тепловизионных фильмов. Отмечается, что методика позволяет выявить локализацию и конфигурацию структурных образований, их характерные частоты, соотношение линейных размеров подструктур, тип реакции на возмущения, а отсюда и вид когерентных структур. В [8] ИК-термография используется наравне с методом PIV (цифровое трассирование) для анализа структуры жидкой струи, бьющей в металлическую пластину в воздухе. Результаты усредняются по времени. В [9] ИК-съемка турбулентного течения воды в акриловых круглых трубах с высоким временным разрешением проводится для измерения характеристик теплопередачи. Работы по тепловизионным исследованиям неизотермических турбулентных течений жидкости с временным разрешением практически отсутствуют.

Основной проблемой применения тепловизора для исследований температурных полей в жидкости является интерпретация получаемых данных. Тепловизионная камера регистрирует всё тепловое излучение, поступающее из зоны обзора объектива. При исследовании течения жидкости в сосуде излучение поступает из жидкости, толщи стенок сосуда, воздуха между сосудом и объективом, а также фиксируется отражённое от окружающих тел рассеянное излучение. При этом инфракрасное излучение практически полностью поглощается в тонком слое воды. Коэффициент поглощения зависит от длины волны излучения и температуры воды. Соответственно толщина слоя поглощения излучения в слое неизотермической жидкости вблизи стенки сосуда меняется как в пространстве, так и во времени. Оценить диапазон её значений можно как расстояние от нескольких микрон до 0,1 мм.

Тем не менее применение тепловизора при исследовании в сосуде неизотермических течений жидкости, сопровождающихся турбулентными пульсациями температур, весьма актуально. Цель данной работы — представить метод исследования высокочастотных процессов перемешивания турбулентных потоков жидкости с различной температурой. Было предложено использовать термографию для количественного анализа пульсаций температуры воды у стенки (окна), частично прозрачной для инфракрасного излучения [2, 10]. На основе такого подхода проведены тепловизионные исследования полей температур и турбулентных пульсаций температур в жидкости на простых моделях.

Экспериментальные модели и результаты. Исследования проводились с использованием тепловизора системы FLIR 7700 в спектральном диапазоне измерений 3,7–4,8 мкм (по уровню 60 % от максимальной чувствительности), частота кадров в полнокадровом режиме составляет до 115 Гц.

Было проведено тестирование тепловизора в статическом режиме жидкости при получении термограмм через поверхность, выполненную из селенида цинка. При тестировании осуществлялось термографирование поверхности дна сосуда диаметром 200 мм, внутри которого с помощью специального нагревателя поддерживались заданная температура воды в диапазоне от 0 до 100 °С. При испытаниях в статическом режиме расхождения показаний температуры воды, полученных тепловизором через окно сосуда из селенида

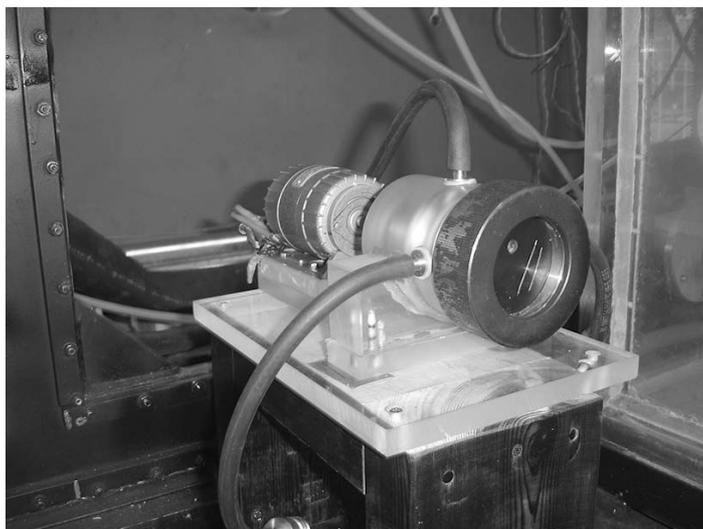


Рис. 1. Цилиндрическая модель с устройством, задающим частоту смешения воды

цинка и измеренных термопарой, зависели от температуры и составляли от $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ воды до $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ воды [2].

Для верификации метода при измерениях частотных характеристик температурных пульсаций воды была изготовлена цилиндрическая модель (рис. 1), позволяющая регистрировать через окно, прозрачное для инфракрасного излучения (материал — селенид цинка), изменения температуры внутри цилиндрической полости с водой. Частота смены холодной и горячей воды задавалась механическим устройством. Задаваемые значения низкочастотных температурных колебаний воды равнялись 7 и 14 Гц, температуры смешиваемых потоков — $20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $40\text{--}45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Частота съёмки изменялась от 10 до 450 Гц. С учётом зависимости вязкости от температуры оценка числа Рейнольдса для данной модели составила $2 \cdot 10^3$. Пространственное разрешение системы, измеренное с помощью миры, равно 150 шт/мм. Данная модель является тестовой, т. е. служит для выделения и определения повторяемости основных (низких) частот пульсаций температуры жидкости, заданных механически.

Как показано на рис. 2, в случае когда стенка сосуда прозрачна для ИК-излучения в диапазоне длин волн, регистрируемых тепловизором, термографическая информация при движении жидкости в сосуде снимается: из зоны пограничного слоя воды, примыкающей к внутренней поверхности окна, из толщи стенки сосуда (окна), с поверхности стенки сосуда (окна), из воздуха между сосудом и тепловизором. Тепловизором регистрируются также рассеянное, отражённое, фоновое ИК-излучения из атмосферы.

Поскольку вода интенсивно поглощает излучение данного диапазона длин волн, глубина зоны съёма информации тепловизором из воды через стенки, прозрачные для ИК-излучения, существенно менее миллиметра. Таким образом, визуализация неизотермического движения воды сквозь прозрачную для ИК-излучения поверхность позволяет зафиксировать быстропротекающие процессы изменения температуры зоны контакта жидкости со стенкой, но не из объёма жидкости. В этом основное отличие термографии пограничного слоя жидкости от соответствующих исследований в газах, где регистрируется интегрированное по объёму среды излучение.

Визуализируемый пограничный слой воды определяет высокочастотную составляющую пространственно-временных параметров регистрируемых тепловизором тепловых процессов.

На рис. 3 приведены мгновенные изображения и кривые пульсаций, полученные с тепловизора через прозрачные для ИК-излучения окна цилиндрической модели на частотах

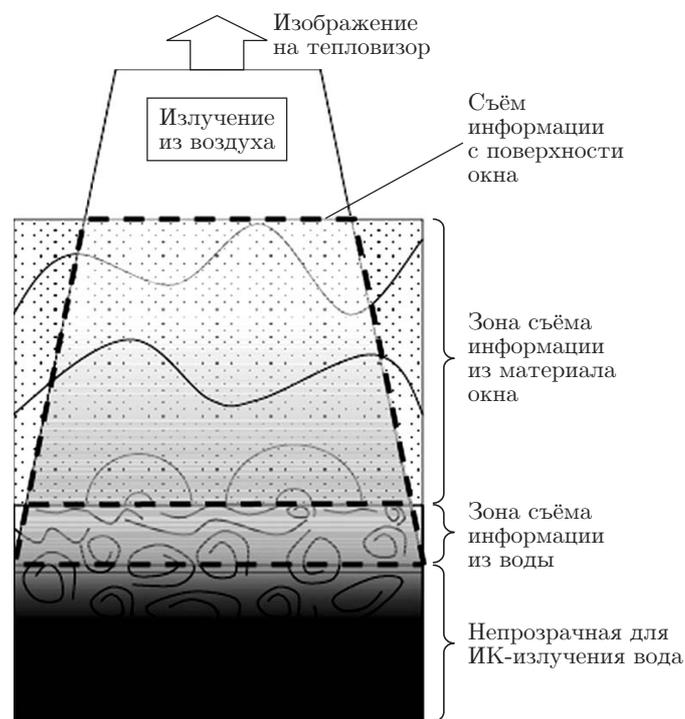


Рис. 2. Зоны съёма информации тепловизором

съёмки 10, 25, 50, 100 Гц. Задаваемое механически значение низкочастотных пульсаций температуры воды при смешении равнялось 7 Гц. Измерения показали, что задаваемая частота пульсаций регистрируется с высокой точностью как основная. Погрешность измерений уже для частоты съёмки 25 Гц была менее 5 %. Таким образом, значение частоты съёмки, обеспечивающее достоверную регистрацию частоты пульсаций температуры из зоны пограничного слоя воды, примыкающей к внутренней поверхности окна, составило около трёх значений от известной задаваемой частоты пульсаций температуры потока.

В последние годы большое количество работ по неизотермическому перемешиванию жидкостей и газов посвящено исследованиям потоков в Т-образной конфигурации труб — тройниках смешения [11–13]. Тройники смешения представляют собой типичные элементы конструкций, где происходят температурные флуктуации при смешении потоков. Их можно исследовать экспериментально и моделировать численно как в трёхмерном варианте (круглое сечение труб), так и в двумерном (прямоугольное сечение).

Для апробации метода и термографических исследований картины смешения неизотермических турбулентных потоков воды изготовлена и испытана модель плоского Т-образного соединения сечением 50×10 мм (рис. 4). Ниже области смешения были установлены специальные круглые окна диаметром 30 мм из селенида цинка толщиной 4 мм, через которые проводилось термографирование непосредственно пристеночных зон водных потоков. Задняя стенка модели выполнена из прозрачного органического стекла, что позволило проводить визуальные наблюдения за картиной смешения потоков при их подкрашивании. Модель испытывалась при различных смешениях потоков горячей (~ 50 °С) и холодной (~ 20 °С) воды и при изменении мест их подачи в тройник. Число Рейнольдса в зоне смешения превышало 10^4 . Макрообъектив тепловизора фокусировался на внутреннюю стенку сосуда с точностью 0,1 мм. Для повышения достоверности результатов длительность непрерывной регистрации процесса пульсаций доводилась до 1 часа.

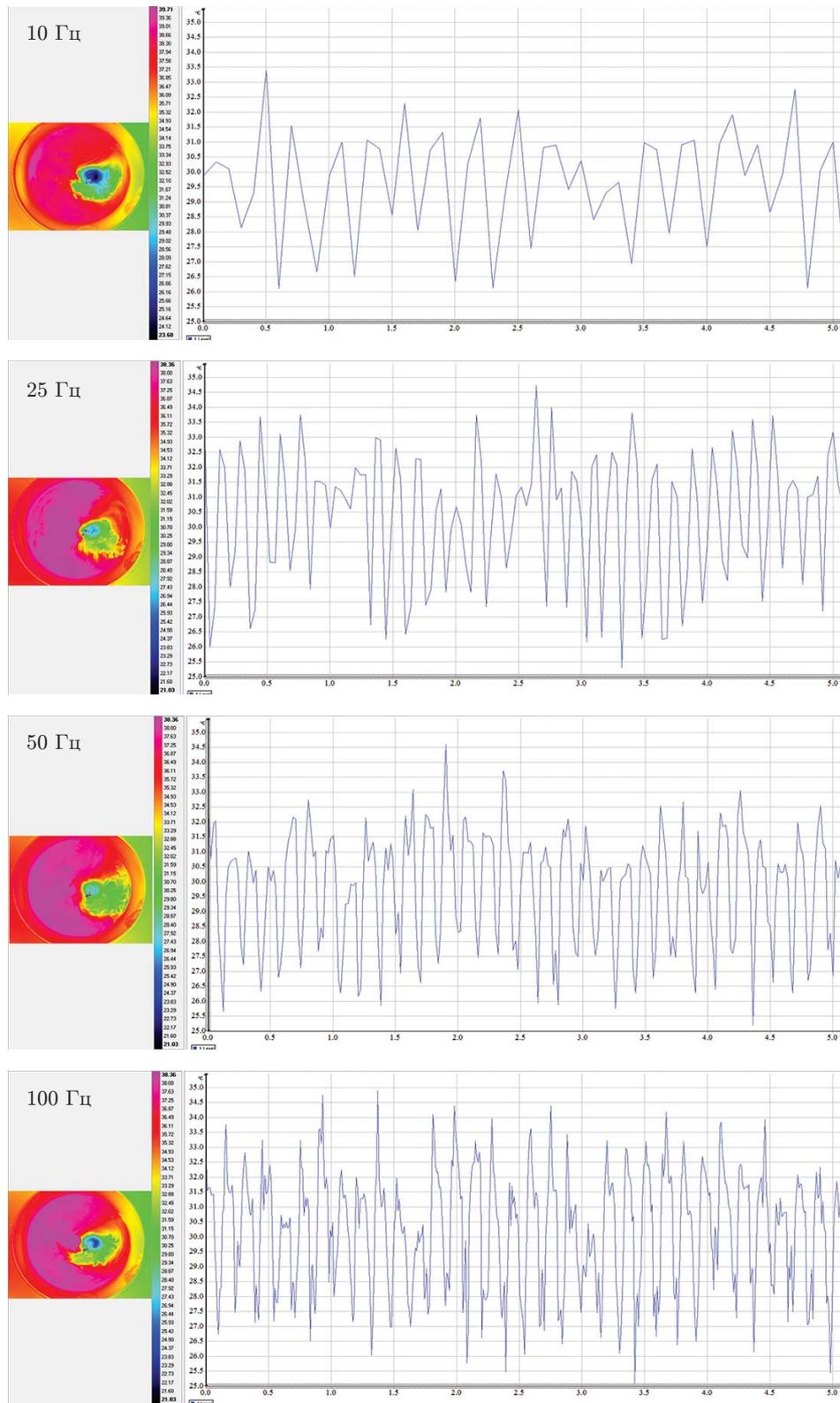


Рис. 3. Температурные пульсации при смешении воды, снятые через прозрачное для ИК-излучения окно при разных частотах регистрации

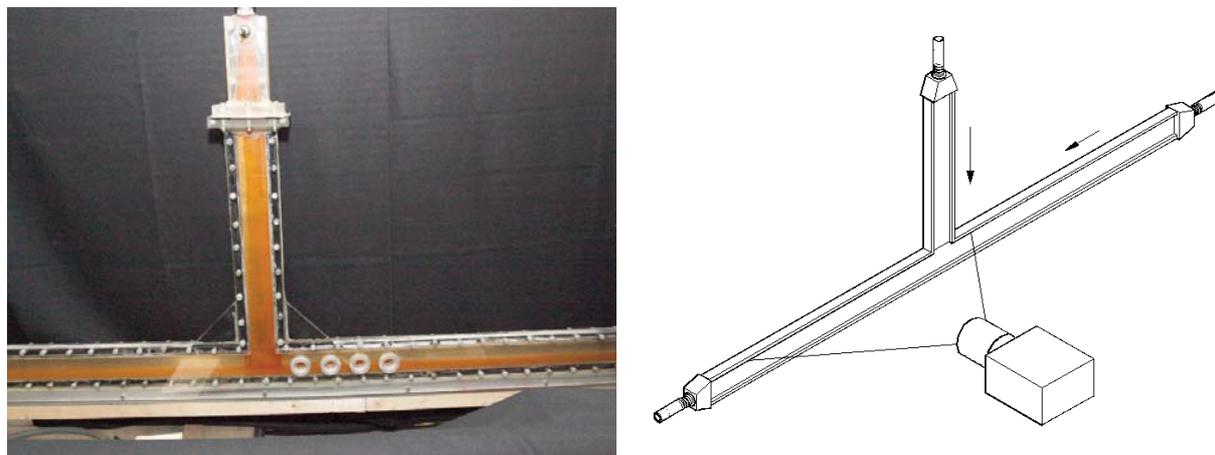


Рис. 4. Т-образное соединение для смешения потоков воды

На рис. 5 приведено типичное термографическое мгновенное изображение потока воды, регистрируемого через два прозрачных для ИК-излучения окна, и соответствующие температурные кривые пульсаций, снятые с двух точек окна. Расход горячей и холодной воды составлял по $0,92 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Обработка и анализ данных, регистрируемых тепловизором через прозрачное для ИК-излучения окно в тройниковом соединении, отражают динамику тепловых процессов, идущих в узкой зоне турбулентного пограничного слоя неизотермического течения воды, который примыкает к поверхности окна (см. рис. 2). Оценки показали, что температурные пульсации воды являются единственным источником высокочастотных сигналов, фиксируемых тепловизором и имеющих достаточно большую амплитуду (свыше $15 \text{ }^\circ\text{C}$ для данной

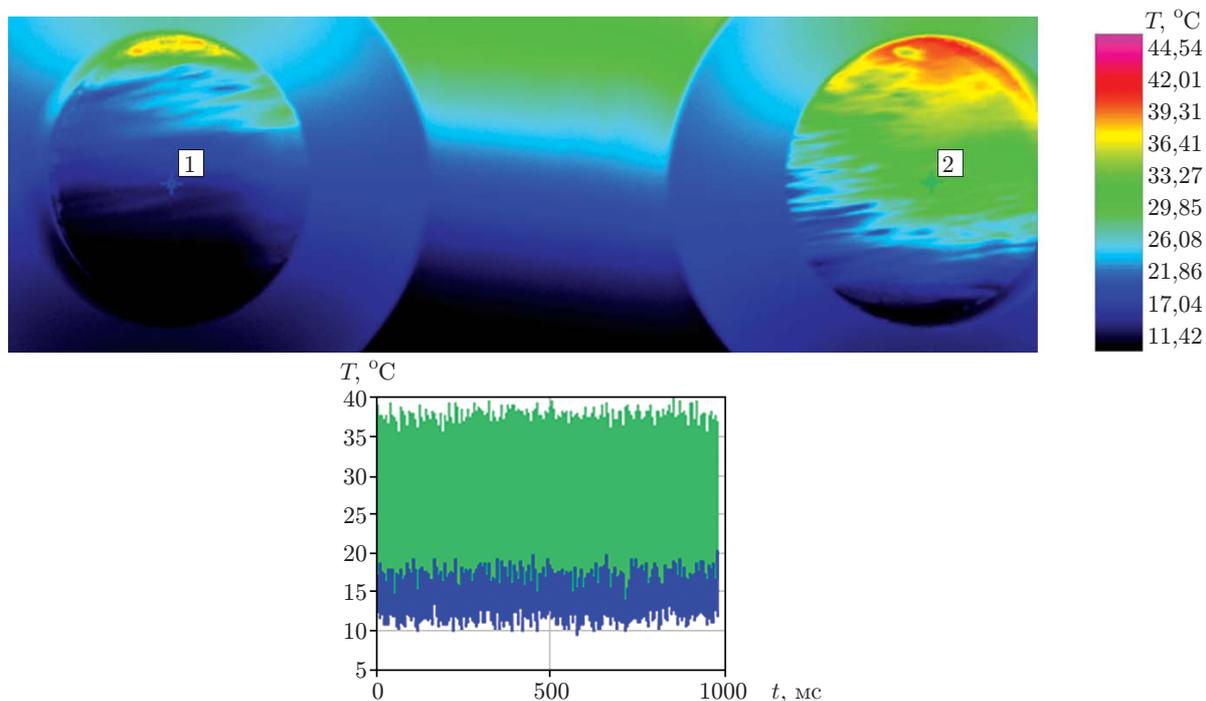


Рис. 5. Термограмма и пульсации воды в Т-образном соединении (синий цвет — уровень 1, зелёный — уровень 2)

серии экспериментов). Другие регистрируемые тепловые потоки вносят вклад как шумовые составляющие с существенно большими константами времени процесса.

Полученные в экспериментах с тройниковым соединением данные (тепловизионные фильмы), снятые через прозрачное для ИК-излучения окно, были систематически обработаны:

1. Выбирались несколько точек на поверхности каждого окна модели, которые представлялись наиболее характерными для участка течения смешения.
2. Строились зависимости амплитуды температуры, измеренной тепловизором в данной точке, от времени с помощью соответствующей программы.
3. Строились энергетические спектры для полученных зависимостей с использованием программы прямого преобразования Фурье.
4. Выделялись и анализировались основные частоты пульсаций.
5. Определялся степенной закон среднего участка спектра в целях идентификации характера турбулентных пульсаций и соответствующего диапазона частот.

Один из наиболее часто применяемых на практике методов исследования турбулентности — изучение энергетического спектра пульсаций [14, 15]. Для локально-изотропной турбулентности имеет место закон Колмогорова — Обухова, описывающий прямолинейный участок волнового спектра. Сценарий Колмогорова развития турбулентности предполагает наличие двух инерционных интервалов переноса энергий пульсаций температуры и скорости с формированием одинаковых спектров $k^{-5/3}$, где k — волновое число для зависимости от пространственных переменных (либо частоты от времени). Полученные при обработке данных термографии тройникового соединения энергетические спектры были проанализированы с точки зрения их соответствия колмогоровскому закону $-5/3$.

На рис. 6 приведён пример энергетического спектра. В полученных экспериментально спектрах достаточно легко можно выделить линейный участок в области средних частот. При анализе по углу наклона этот участок спектра может быть идентифицирован как инерционный интервал энергетического спектра, удовлетворяющий колмогоровскому закону $-5/3$. Измерения показали, что соответствовавшие этим участкам частоты лежат в интервалах от 4–5 до 40 Гц. Следует отметить, что измерить такие значения частот температурных пульсаций в потоке жидкости существующими контактными средствами не представляется возможным.

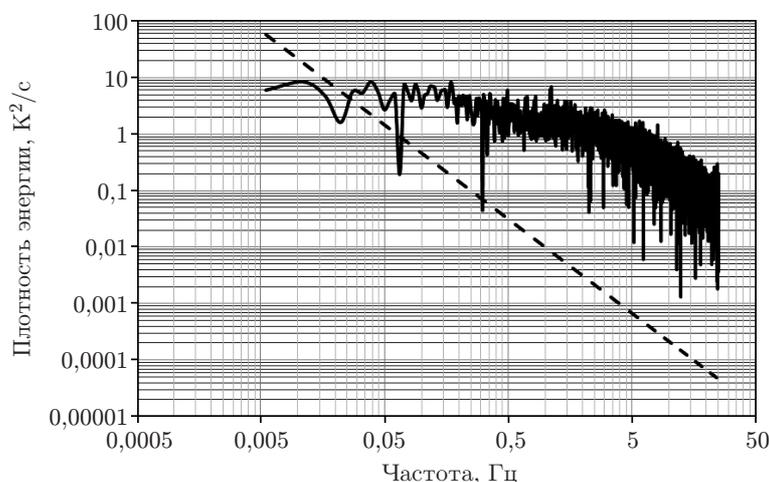


Рис. 6. Энергетический спектр пульсаций воды в Т-образном соединении. Обработка термографических данных

Имеет место высокая степень воспроизводимости, повторяемости полученных результатов, в особенности при большом промежутке времени снятия информации (свыше 10 мин). Покрытие чёрной матовой краской поверхности сосуда с прозрачными для ИК-излучения стенками приводит к существенному ухудшению пространственного разрешения, снижению амплитуды колебаний в 3–4 раза и к потере высокочастотной (выше 30 Гц) составляющей колебаний. Следует отметить, что практический интерес с точки зрения влияния на температурное состояние стенки представляют температурные пульсации жидкости с частотами приблизительно до 5 Гц.

Заключение. В данной работе показаны возможности бесконтактного метода тепловизионного определения количественных пульсационных характеристик неизотермического потока жидкости на примере простых моделей. Пространственно-временные параметры нестационарного температурного поля регистрируются из узкой зоны пограничного слоя на внутренней поверхности сосуда через прозрачную для ИК-излучения стенку с помощью тепловизора с точной фокусировкой объектива. Проведено термографическое исследование температурных пульсаций воды при неизотермическом смещении через окна, прозрачные для ИК-излучения, на частоте съёмки 115 Гц. Измерены частотные и спектральные характеристики течения воды по тепловому излучению из тонкой зоны пограничного слоя, примыкающей к окну, при температурах смещения 20–50 °С. По спектральным кривым идентифицированы участки, соответствующие турбулентному спектру. В исследованном неизотермическом течении в канале плоского тройникового соединения выявлено наличие ясно идентифицируемых инерционных интервалов энергетических спектров, удовлетворяющих закону Колмогорова $-5/3$, в диапазонах частот от 4 до 40 Гц. Показано, что при тепловизионном исследовании неизотермических течений жидкости через материал, прозрачный для ИК-излучения, данный метод может быть эффективно использован для анализа пространственно-временных, частотных, спектральных характеристик турбулентного пограничного слоя жидкости в зоне контакта со стенкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Большухин М. А., Будников А. В., Свешников Д. Н. и др.** Актуальные задачи развития экспериментальной базы для верификации CFD кодов при использовании в атомной энергетике // Тр. Нижегородского ГТУ им. Р. Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2012. № 1(94). С. 100–107.
2. **Bolshukhin M. A., Budnikov A. V., Fomichev V. I. et al.** Thermography analysis of turbulent mixing process in T-junction cross-flow // Proc. of the 15th Intern. Symp. on Flow Visualization. Minsk, Belarus, 2012. Paper 142.
3. **Carlomagno G. M., Cardone G.** Infrared thermography for convective heat transfer measurements // Experiments in Fluids. 2010. **49**, N 6. P. 1187–1218.
4. **Вавилов В. П., Климов А. Г.** Тепловизоры и их применение. М.: Интелуниверсал, 2002. 88 с.
5. **Kim T. H., Kommer E., Dessiatoun S., Kim J.** Measurement of two-phase flow and heat transfer parameters using infrared thermometry // Intern. Journ. Multiphase Flow. 2012. **40**. P. 56–67.
6. **Hetsroni G., Mewes D., Enke C. et al.** Heat transfer to two-phase flow in inclined tubes // Intern. Journ. Multiphase Flow. 2003. **29**, N 2. P. 173–194.
7. **Жилкин Б. П., Зайков Н. С., Кисельников А. Ю.** Тепловизионная идентификация турбулентных структур в газовых потоках // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 1. С. 155–158.

8. **Violato D., Ianiro A., Cardone G., Scarano F.** Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer in circular and chevron impinging jets // Intern. Journ. Heat and Fluid Flow. 2012. **37**. P. 22–36.
9. **Shiibara N., Nakamura H., Yamada S.** Visualization of turbulent heat transfer to a water flow in a circular pipe using high-speed infrared thermography // Proc. of the 9th Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing. 25–28 August, 2013. Busan, Korea. P. 303–308.
10. **Пат. 112409 РФ.** Устройство для измерения температурного поля газового или жидкостного потока /М. А. Большухин, А. В. Будников, Д. Л. Зверев и др. Опубл. 10.01.2012.
11. **Kimura N., Ogawa H., Kamide H.** Experimental study on fluid mixing phenomena in T-pipe junction with upstream elbow // Nucl. Eng. Design. 2010. **240**, Is. 10. P. 3055–3066.
12. **Kobari T., Komiya A., Moriya S. et al.** Visualization of flow patterns in differently shaped cooling channels of pistons // Proc. of the 8th Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing. Moscow, Russia, 21–25 August, 2011. [CD-ROM].
13. **Frank Th., Lifante C., Prasser H.-M., Menter F.** Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX // Nucl. Eng. Design. 2010. **240**, Is. 10. P. 2313–2328.
14. **Волков К. Н., Емельянов В. Н.** Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.
15. **Фрик П. Г.** Турбулентность: подходы и модели. Москва — Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 292 с.

Поступила в редакцию 11 декабря 2013 г.
