

УДК 535-15

М.А. Большухин<sup>1</sup>, И.А. Знаменская<sup>2</sup>, В.П. Крепков, В.И. Фомичев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ОКБМ «Африкантов», Россия 603074, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15.

<sup>2</sup> Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, физический ф-т, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы 2, E-mail: znamen@phys.msu.ru

## **ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ВОДЫ ПРИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОМ СМЕШЕНИИ**

### **АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена использованию термографии для количественного анализа частотных характеристик пульсаций температуры воды у стенок сосуда, прозрачных для инфракрасного излучения. Проведены тепловизионные исследования нестационарных турбулентных пульсаций температур при смешении потоков воды с различными температурами на простых моделях. Показано наличие спектров Колмогорова (закон  $-5/3$ ) в исследованном неизотермическом течении в канале тройникового соединения, что позволяет характеризовать исследованный процесс как развитую турбулентность течения воды в пограничном слое, примыкающем к окну.

**ТЕРМОГРАФИЯ, ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ, ПУЛЬСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ, СПЕКТР**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Режимы турбулентного перемешивания жидкости разной температуры имеют место в большом числе элементов теплообменного оборудования. Их спецификой является то обстоятельство, что они практически всегда сопровождаются пульсациями температур. Пульсации температур, в свою очередь, являются причиной дополнительных термоциклических нагрузок, в ряде случаев определяющих ресурс элементов оборудования энергетических установок.

Инфракрасная термография есть бесконтактный, неразрушающий метод для измерения приповерхностной температуры жидкости и газа [1,2]. Основными преимуществами термографии являются: бесконтактность, низкая инерционность, высокая чувствительность, двумерность получаемого изображения. В работе [3] 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. В последние 3-4 года в связи с появлением тепловизоров класса FLIR 7000 появились отдельные зарубежные работы по исследованиям динамических процессов в жидкости с помощью тепловизоров, как правило, излучение регистрируется с открытой поверхности жидкость – газ. Эксперименты по изучению режимов течения и теплообмена в воздухе и воде в наклонных трубах с помощью термографии проводились группой Hetsroni с соавторами [4]. Тепловые изображения на стенке с подогревом и поля локальных коэффициентов теплоотдачи были получены с помощью инфракрасной термографии. Распределение температуры по периметру трубы

показывает максимум на верхней и минимум в нижней части трубы. В работе [5] 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 работе [6] тепловизор используется наравне с PIV методом для анализа структуры жидкой струи, бьющей в металлическую пластину в воздухе. Результаты усредняются по времени. Работы по тепловизионным исследованиям неизотермических турбулентных течений жидкости с временным разрешением практически отсутствуют.

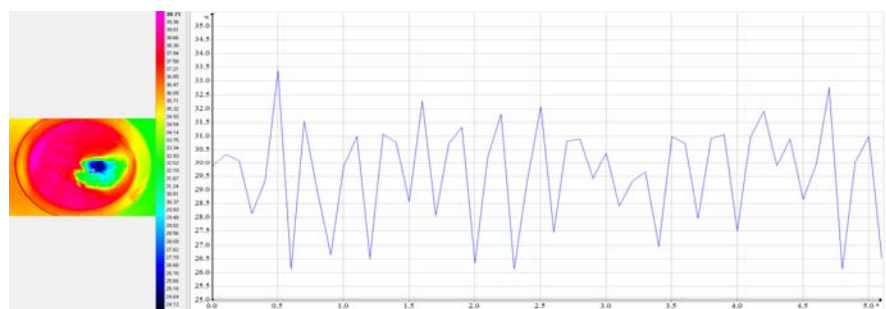
В связи с этим применение тепловизора при исследовании процесса неизотермических течений жидкости, сопровождающихся турбулентными пульсациями температур, является весьма актуальным. Данная работа представляет новый метод исследования высокочастотных процессов перемешивания турбулентных потоков жидкости с различной температурой. Было предложено использовать термографию для количественного анализа пульсаций температуры воды у стенки (окна), прозрачного для инфракрасного излучения [7, 8]. Проведены тепловизионные исследования полей температур и нестационарных турбулентных пульсаций температур в жидкости на простых моделях.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования проводились тепловизором FLIR 7700, спектральный диапазон измерений 3,7-4,8 мкм (по уровню 60% от максимальной чувствительности), частота кадров 117 Гц. Для верификации метода при измерениях частотных характеристик пульсаций температуры воды была изготовлена полезная модель, позволяющая регистрировать через окно, прозрачное для инфракрасного излучения (селенид цинка), изменения температуры внутри цилиндрической полости с водой. Частота смены холодной и горячей воды задавалась механическим устройством. Съемка тепловизором велась с различными частотами. На рис.1 приведены изображения полученных кривых на частотах съемки тепловизором 10, 25, 50, 100 Гц. Заданная частота температурных пульсаций составляла 7 Гц. Пространственное разрешение – 5 пикселей на 1 мм. Видно, что уже для частоты съемки 25 Гц задаваемая частота регистрируется с высокой точностью (погрешность менее 5%).



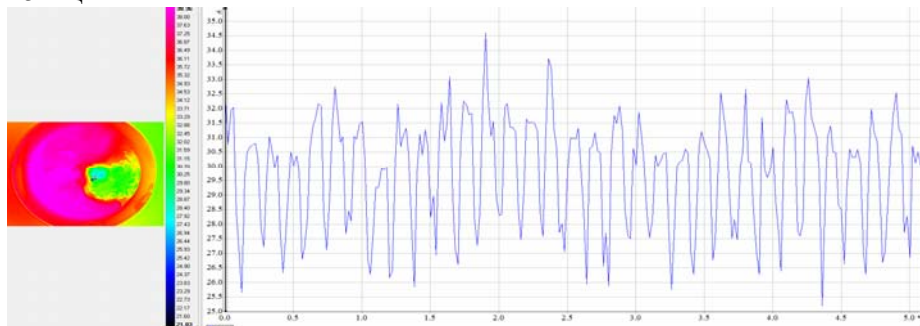
Рис. 1. Полезная модель с устройством, задающим частоту смешения воды



10 Гц



25 Гц



50 Гц



100 Гц

Рис. 2. Температурные пульсации при смешении воды, снятые через ИК прозрачное окно

В данном случае для стенки, прозрачной для ИК излучения в диапазоне длин волн, регистрируемых тепловизором, информация снимается:

- 1- из некоторой зоны пограничного слоя воды,
- 2 - из толщи стенки сосуда,
- 3- с поверхности стенки сосуда,
- 4 - из воздуха между стенкой и тепловизором.

Поскольку вода интенсивно поглощает излучение данного диапазона, глубина зоны съема информации в воде - менее миллиметра. Локальное значение регистрируемого теплового потока есть сложная функция температуры воды и локальной скорости потока. Кроме излучения из исследуемого объекта тепловизором регистрируется рассеянное, отраженное, фоновое инфракрасное излучение.

Для термографических исследований картины смешения неизотермических потоков воды была спроектирована, изготовлена и испытана модель плоского Т-образного соединения (тройника) сечением 50x10 мм (рис.3). Задняя стенка модели выполнена из прозрачного органического стекла, что позволило проводить визуальные наблюдения за картиной смешения потоков при их подкрашивании. Ниже области смешения были установлены специальные круглые окна диаметром 30 мм из селенида цинка – из материала прозрачного для инфракрасного через них проводилось термографирование непосредственно водных потоков. Модель испытывалась: при различных смешениях горячей  $\sim 50^{\circ}\text{C}$  и холодной  $\sim 20^{\circ}\text{C}$  воды, при изменении мест подачи холодной и горячей воды в тройник.

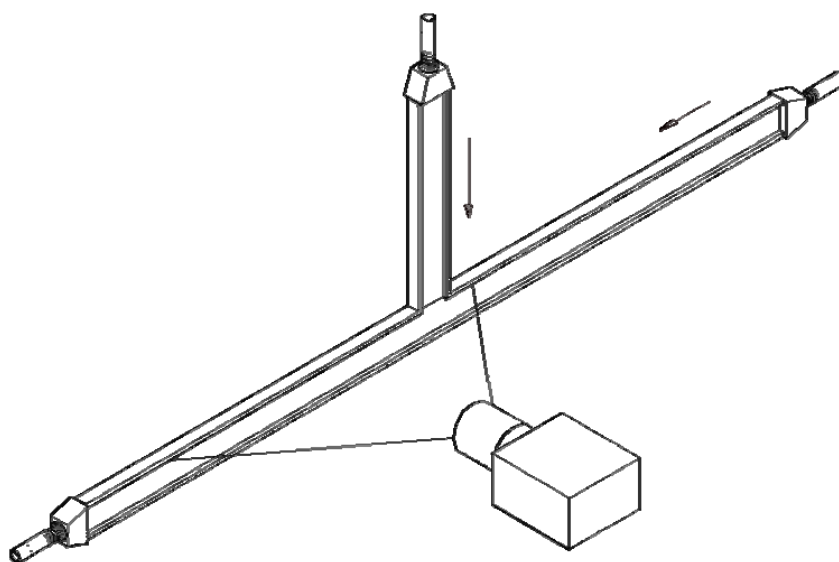
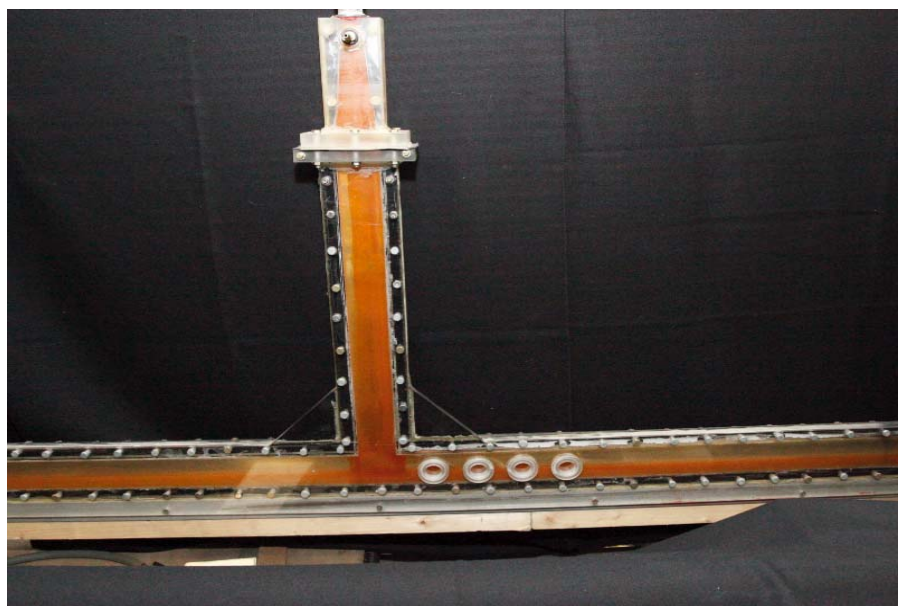


Рис. 3. Т-образное соединение для смешения потоков воды

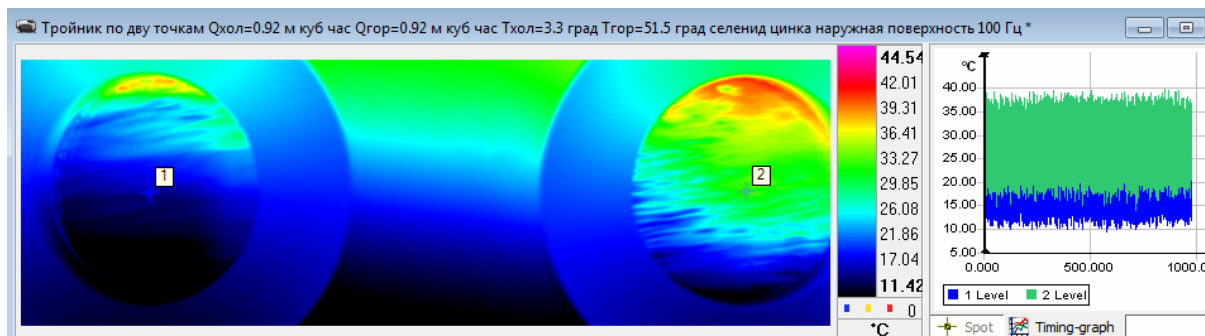


Рис. 4. Термограмма и пульсации воды в Т-образном соединении

На рис. 4 приведено типичное тепловизионное изображение потока воды, регистрируемого через ИК прозрачные окна и соответствующие температурные кривые, снятые с точек 1 и 2.

## ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

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

1. выбирались точки на поверхности модели, которые являлись наиболее характерными для участка течения;
2. строились зависимости амплитуды измеренной тепловизором в данной точке температуры от времени с помощью соответствующей программы;
3. строились Фурье-спектры для полученных зависимостей с помощью соответствующей программы (прямое преобразование Фурье);
4. выделялись и анализировались основные частоты пульсаций;
5. определялся степенной закон участка спектра с целью идентификации турбулентного характера пульсаций.

Из литературы известно два основных сценария развития конвективной турбулентности [9]. Сценарий Колмогорова, (при котором температура ведет себя как пассивная примесь), предполагает наличие двух инерционных интервалов переноса энергии пульсаций температуры и скорости, с формированием одинаковых спектров  $k^{-5/3}$ , где  $k$  — волновое число для зависимости от пространственных переменных (либо частота — от времени). Силы плавучести жидкости в таком сценарии существенной роли не играют.

Данные, регистрируемые тепловизором через ИК прозрачный материал (в данном случае, - селенид цинка), отражают динамику тепловых процессов, идущих в зоне пограничного слоя неизотермического течения воды, примыкающем к поверхности окна. В полученных спектрах (Рис. 5) достаточно легко выделить высокочастотную составляющую, которая при анализе по углу наклона может быть идентифицирована как инерционный интервал энергетического спектра, удовлетворяющий закону  $5/3$ . Соответствующие этому участку частоты лежат в интервале от 4-5 Гц до 40-50 Гц.

Зачернение черной матовой краской поверхности сосуда с ИК прозрачными стенками приводит к существенному ухудшению пространственного разрешения, снижению амплитуды колебаний примерно не порядок и к потере высокочастотной составляющей колебаний.

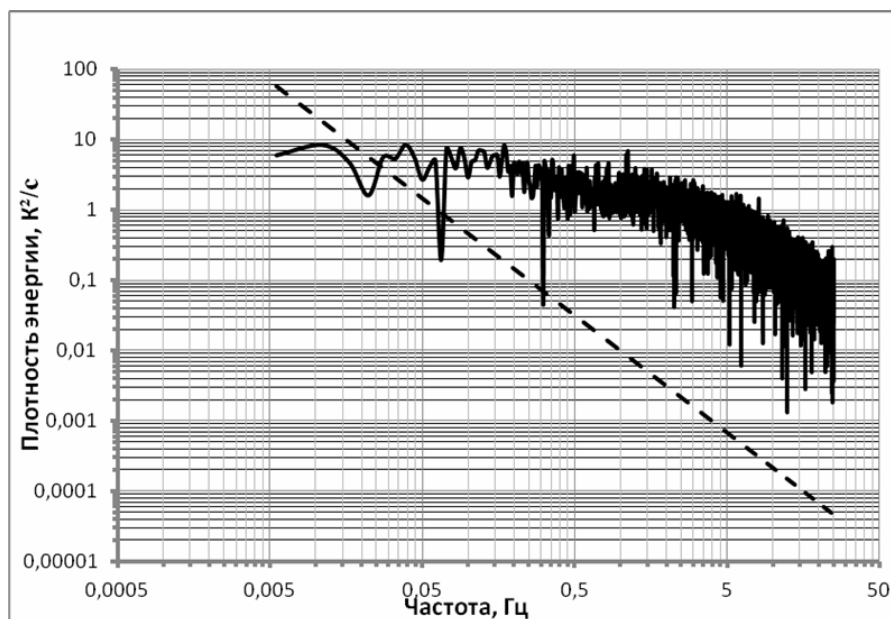


Рис. 5. Энергетический спектр пульсаций воды в Т-образном соединении. Обработка термографических данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термографическое исследование неізотермических пульсаций воды через окна, прозрачные для инфракрасного излучения, позволило измерить частотные, спектральные характеристики течения воды из зоны, примыкающей к стенке сосуда. Наличие ясно идентифицируемых спектров Колмогорова  $k^{-5/3}$  в исследуемом неізотермическом течении в канале тройникового соединения позволяет характеризовать исследованный через ИК прозрачное окно процесс как развитую турбулентность течения воды в пограничном слое, примыкающем к окну.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Carlomagno G.M., Cardone G.** Infrared thermography for convective heat transfer measurements // *Experiments in Fluids*. 2010. Т. 49. № 6. С. 1187–1218.
2. **Вавилов В.П., Климов А.Г.** Тепловизоры и их применение. М. Интелуниверсал, 2002. 88с.
3. **Kim Т.Н. и др.** Measurement of two-phase flow and heat transfer parameters using infrared thermometry // *International Journal of Multiphase Flow*. 2012. Т. 40. С. 56–67.
4. **Hetsroni G. и др.** Heat transfer to two-phase flow in inclined tubes // *International Journal of Multiphase Flow*. 2003. Т. 29. № 2. С. 173–194.
5. **Жилкин Б.П. и др.** Тепловизионная идентификация турбулентных структур в газовых потоках // *Приборы и техника эксперимента*. 2010. № 1. С. 155–158.
6. **Violato D. и др.** Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer in circular and chevron impinging jets // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2012. Т. 37. С. 22–3
7. Патент №112409 // 2012.
8. **Bolshukhin M.A. и др.** Thermography analysis of turbulent mixing process in T-junction cross-flow // *Proc. ISFV-15. Minsk, Belarus: , 2012. С. Paper 142.*
9. **Фрик П.Г.** Турбулентность: подходы и модели, Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003, 292 с.

M.A. Bolshukhin<sup>1</sup>, V.I. Fomichev<sup>1</sup>, V.P. Krepkov, I.A. Znamenskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «Afrikantov OKBM» Nizhny Novgorod, 603074, Russia

<sup>2</sup>Department of Physics, Lomonosov State University, Moscow, 119991, Russia

Email: znamen@phys.msu.ru

## **THERMOGRAPHY ANALYSIS OF TURBULENT PULSATIONS IN NON-ISOTHERMAL MIXING FLOW**

*The paper is devoted to the use of thermography for quantitative analysis of the frequency characteristics of temperature fluctuations at the wall of the water vessel, transparent to infrared radiation. Thermal imaging study was held of unsteady turbulent fluctuations of temperatures by mixing streams of water of different temperatures on the models. Kolmogorov spectra presence was showed (the law of  $-5 / 3$ ) in the investigated non-isothermal flow in a channel T-junction connection. That allows us to characterize the investigated process as developed turbulent flow of water in the boundary layer adjacent to the window.*

**THERMOGRAPHY, TURBULENT MIXING, TEMPERATURE PULSATIONS, SPECTRUM**