

Особенности спектров турбулентных пульсаций струйных затопленных течений воды

И. А. Знаменская,* Н. Н. Сысоев,† Е. Ю. Коротеева,‡ А. М. Новинская§

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

В данной работе экспериментально было показано наличие двойного инерционного интервала для квазидвумерного турбулентного течения, реализованного с помощью специального дискообразного тройника при взаимодействии двух затопленных струй. Регистрация велась с помощью тепловизионной камеры с частотой кадров от 100 Гц в широком спектральном диапазоне через стенку, прозрачную для ИК-излучения.

PACS: 47.27.-i, 47.27.er

УДК: 534-143

Ключевые слова: визуализация процессов, инфракрасная термография, квазидвумерное течение, турбулентность, спектры.

Целью работы являлось: экспериментально на основе высокоскоростной ИК термографии исследовать особенности спектров температурных пульсаций в приповерхностных струйных турбулентных неизотермических течениях воды.

Теоретически было показано [1], что в двумерных течениях возможно появление двух инерционных интервалов, по которым реализуются прямой каскад переноса энтропии (k^{-3} для энергетического спектра скорости), обеспечивающий диссипацию, и обратный каскад кинетической энергии со степенным законом $k^{-5/3}$, перекачивающий кинетическую энергию в область больших масштабов [2]. Черты двумерной турбулентности проявляют крупномасштабные геофизические и астрофизические течения [3]. Численному моделированию двумерной турбулентности в последние годы посвящено большое количество работ; многими авторами отмечалось, что шансов на реализацию двумерной турбулентности в природных и лабораторных условиях фактически нет [2].

Свойство воды поглощать инфракрасное (ИК) излучение на субмиллиметровом масштабе позволило предложить метод измерения и анализа неизотермических турбулентных пульсаций жидкости в пограничном слое через стенки, прозрачные для ИК излучения [4, 5], на основе ИК термографии (ТВПЖ — термография высокоскоростных потоков жидкости). В частности, ранее в плоском тройниковом соединении методом ТВПЖ были получены спектры турбулентности, содержащие прямолинейный участок, соответствующий колмогоровскому закону « $-5/3$ » [5]. Температура в данной серии экспериментов играет роль пассивной примеси. Как показали эксперименты, частотные характеристики пульсаций (в отличие от амплитуды) не зависят от температуры смешиваемых пото-

ков. При спектральном анализе методом ТВПЖ импульсной затопленной струи [6, 7] также были получены спектры турбулентности, соответствующие закону Колмогорова « $-5/3$ ». Метод позволяет снимать информацию из приповерхностного слоя воды толщиной менее 1 мм. Исследования проводились с использованием тепловизионной камеры FLIR SC7700, работающей в спектральном диапазоне 3.7–4.8 мкм с частотой кадров 100–115 Гц.



Рис. 1: Фото тройникового устройства

Проведены экспериментальные исследования турбулентных пульсаций при взаимодействии двух затопленных струй воды одинаковой интенсивности под углом 120° в дискообразном тройниковом устройстве. Вид тройника представлен на рис. 1. Вода поступала снизу вверх через два сопла в затопленное пространство и вытекала через сток в верхней точке сосуда. Внутренний диаметр сосуда составляет 67 мм, толщина — 13 мм, диаметр каждого сопла — 7 мм, конфигурация тройника имеет две вертикальные плоскости симметрии. Смешивались струи с горячей ($30\text{--}55^\circ\text{C}$) и холодной ($10\text{--}20^\circ\text{C}$) водой.

*E-mail: znamen@phys.msu.ru†E-mail: sysoev@phys.msu.ru‡E-mail: forosp@mail.ru§E-mail: novinskaja.anastasija@physics.msu.ru

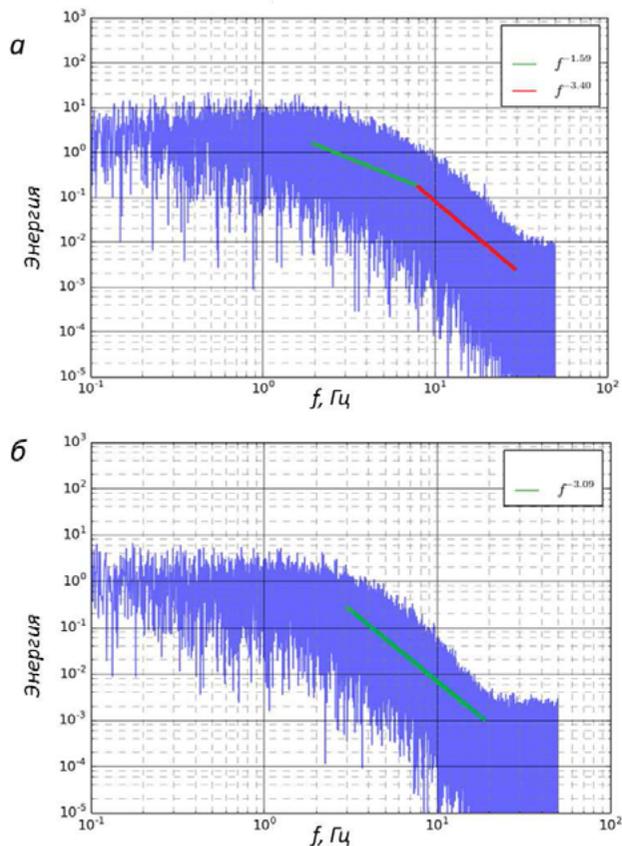


Рис. 2: Спектр мощности температурных пульсаций в дискообразном тройнике, на оси течения (а) и вблизи стенки (б)

Тепловизионная регистрация турбулентного течения в зоне смешения велась через тонкую пластину, прозрачную для ИК излучения. Расход воды через каждое

сопло составил 50 мл/с, при средней скорости истечения из каждого из сопел 1.3 м/с. Число Рейнольдса течения, вычисленное по поперечному размеру сосуда, составило порядка 1.7×10^4 для усредненной температуры. На рис. 2а приведен типичный спектр температурных пульсаций, снятый на плоскости симметрии течения, разделяющей два сопла. Анализ спектральных характеристик процесса перемешивания воды в исследуемом режиме показал наличие в зоне интенсивного взаимодействия струй на расстоянии 0.5–2.0 см от уровня сопел двух выделенных степенных интервалов на спектральных кривых. Как видно из графика, на низкочастотном участке спектра в диапазоне от 2 до 9 Гц отмечено формирование наклона, близкого к $-5/3$ (прямыми линиями обозначены наклоны на соответствующих частотных интервалах, рассчитанные по методу наименьших квадратов). Далее следует второй участок с наклоном, близким к -3 (от 9 до 22 Гц). Для спектров, снятых в верхней части сосуда в зоне торможения и закрутки струй на декаде частот можно идентифицировать как -3 (рис. 2б).

Т. о., пульсационные характеристики пограничного слоя жидкости могут быть исследованы в широком спектральном диапазоне через стенку, прозрачную для ИК излучения, и при использовании тепловизора с частотой кадров от 100 Гц. Экспериментально впервые показано наличие двойного инерционного интервала в квазидвумерном турбулентном потоке, образующемся при взаимодействии двух затопленных струй (в дискообразном тройнике). При смещении контрольных точек по течению вдоль линии взаимодействия струй получен наклон спектра, близкий к -3 . Механизм формирования различных спектральных интервалов в струйном течении может быть связан как со стратификацией жидкости в пристенном течении, зависящей от скорости, так и с особенностями струйного течения в сосуде квазидвумерной геометрии.

- [1] Kraichnan R. Journal of Fluid Mechanics. **47**. P. 535. (1971).
- [2] Фрик П. Г. Турбулентность: подходы и модели. Изд. 2-е, испр. и доп. (М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010).
- [3] Данилов С. Д., Гуларий Д. УФН. **170**, № 9. С. 921. (2000).
- [4] Патент РФ 2677793 от 30 сентября 2014.

- [5] Большухин М. А., Знаменская И. А., Фомичев В. И. ДАН. **465**, № 1. С. 38. (2015).
- [6] Znamenskaya I. A., Koroteeva E. Y. Journal of Flow Visualization and Image Processing. **20**, N1–2. P. 25. (2013).
- [7] Знаменская И. А., Коротева Е. Ю., Новинская А. М., Сысоев Н. Н. Письма в ЖТФ. Принято в печать. (2016).

Spectral singularities of turbulent pulsations of submerged water jets

I. A. Znamenskaya^a, N. N. Sysoev^b, E. Yu. Koroteeva^c, A. M. Novinskaya^d

Department of molecular processes and extreme states of matter, Faculty of Physics,
M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

E-mail: ^aznamen@phys.msu.ru, ^bsysoev@phys.msu.ru, ^cforsp@mail.ru, ^dnovinskaja.anastasija@physics.msu.ru

This study showed experimentally the existence of two inertial ranges in the spectrum of a quasi-two-dimensional flow of two

intersecting jets in a disc-shaped vessel. The flow was recorded through an infrared transparent wall using a thermal camera at the frame rate of 100 Hz in a wide spectral range.

PACS: 47.27.-i, 47.27.er

Keywords: process visualization, infrared thermography, quasi-two-dimensional flow, turbulence.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторах

1. Знаменская Ирина Александровна — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: znamen@phys.msu.ru.
2. Сысоев Николай Николаевич — академик РАН, профессор, зав. кафедрой молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества; тел.: (495) 939-10-97, e-mail: sysoev@phys.msu.ru.
3. Коротеева Екатерина Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-27-41, e-mail: forsp@mail.ru.
4. Новинская Анастасия Михайловна — аспирант физического факультета Московского Государственного Университета имени М.В.Ломоносова; e-mail: novinskaja.anastasija@physics.msu.ru.