

03

Особенности спектров турбулентных пульсаций струйных затопленных течений воды

© И.А. Знаменская, Е.Ю. Коротева, А.М. Новинская, Н.Н. Сысоев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
E-mail: znamen@phys.msu.ru

Поступило в Редакцию 24 февраля 2016 г.

Экспериментально на основе высокоскоростной термографии пограничного слоя воды исследованы спектры температурных пульсаций струйных турбулентных течений в диапазоне частот 1–40 Hz: область взаимодействия импактной струи с поверхностью, прозрачной для инфракрасного излучения, и пристенная область взаимодействия двух затопленных струй в дискообразном тройнике. Показано, что наклоны спектров турбулентных пульсаций импактной затопленной струи близки к значению $-5/3$, и отмечено наличие двойного инерционного интервала в квазидвумерном турбулентном потоке, образующемся при смешении двух струй.

Турбулентные течения имеют сложную структуру, характеризующуюся наличием разных пространственных масштабов. Важнейшей характеристикой турбулентности является распределение интенсивности энергии течения между составляющими различными масштабов. Для количественного анализа энергии турбулентных течений используется спектральное разложение процесса при помощи преобразований Фурье, определяющее спектральную плотность изучаемого процесса. Согласно закону Колмогорова–Обухова, спектральная плотность энергии турбулентности уменьшается с ростом волнового числа по закону пяти третей. С энергетической точки зрения в модели Колмогорова процесс турбулентного перемешивания состоит из передачи энергии по каскаду турбулентных вихрей: энергия больших вихрей передается меньшим вихрям, мельчайшие вихри диссипируют энергию в теплоту. Турбулентность — явление трехмерное; при переходе к двумерному течению происходит качественное изменение свойств и соответственно спектральных характеристик турбулентных пульсаций. Теоретически

было показано, что в двумерных течениях возможно появление двух инерционных интервалов [1], 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]. Обратный каскад энергии можно рассматривать как процесс самоорганизации турбулентности, в результате чего из поля мелкомасштабных пульсаций формируются крупномасштабные когерентные структуры. Черты двумерной турбулентности проявляют крупномасштабные геофизические и астрофизические течения (в этих случаях обычно говорят о квазидвумерной турбулентности) [3]. Численному моделированию двумерной турбулентности в последние годы посвящено большое количество работ [3,4]. Между тем многими авторами отмечалось, что шансов на реализацию двумерной турбулентности в природных и лабораторных условиях фактически нет [2].

Экспериментально исследовались спектры пульсаций скорости [5], температуры [6] жидкостей с различными свойствами. В наиболее цитируемой работе по лабораторному моделированию двумерной турбулентности [5] исследовались режимы, в которых удалось наблюдать формирование обратного каскада энергии со спектром „ $-5/3$ “ с помощью внешних электромагнитных сил. Диапазон масштабов, в котором зафиксировано формирование инерционного интервала, достаточно мал. Эксперименты в мыльных пленках [4] показали, что энстрофийный каскад может развиваться в соответствии с классической теорией в физических системах специального типа.

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 [7,8], 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 „ $-5/3$ “ [7]. В отличие от случая, когда неоднородность температуры является источником турбулентного движения [6], температура в данной серии экспериментов играет роль пассивной примеси. Как показали эксперименты, частотные характеристики пульсаций (в отличие от амплитуды) не зависят от температуры смешиваемых потоков. При

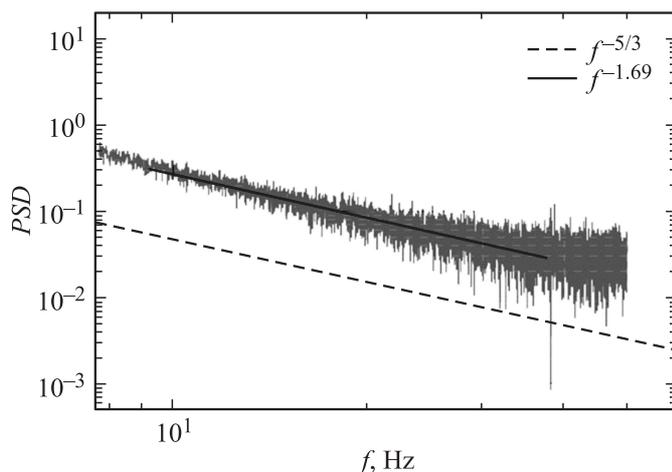


Рис. 1. Спектр мощности температурных пульсаций, полученный в эксперименте с импактной затопленной струей.

спектральном анализе методом ТВПЖ импактной затопленной струи [8] также были получены спектры турбулентности, соответствующие закону „ $-5/3$ “.

Целью данной работы явилось экспериментальное исследование методом ТВПЖ особенностей спектров температурных пульсаций в приповерхностных струйных турбулентных неизотермических течениях воды.

Метод ТВПЖ позволяет снимать информацию из приповерхностного слоя воды толщиной менее 1 mm. Исследования проводились с использованием тепловизионной камеры FLIR SC7700, работающей в спектральном диапазоне 3.7–4.8 μm (по уровню 60% от максимальной чувствительности) и позволяющей проводить съемку с частотой кадров 100–115 Hz в полнокадровом режиме.

На рис. 1 приведен спектр, полученный при регистрации турбулентных пульсаций в зоне взаимодействия теплой (53°C) струи с ИК-прозрачной стенкой (полипропилен) в воде (13°C) при длительности съемки 3 min. Сплошной линией отмечен наклон полученного в эксперименте спектра в интервале частот 9–38 Hz, рассчитанный по методу

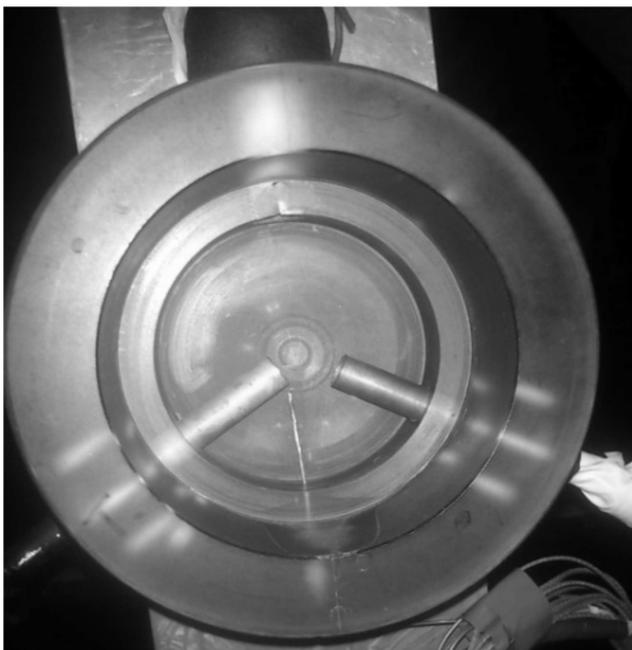


Рис. 2. Фото тройникового устройства для проведения экспериментов по ТВПЖ.

наименьших квадратов. Коэффициент наклона слабо зависит от расположения точки анализа на термограмме и температуры импактной струи.

Были 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. 2. 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. Тепловизионная регистрация турбулентного течения в зоне смешения велась

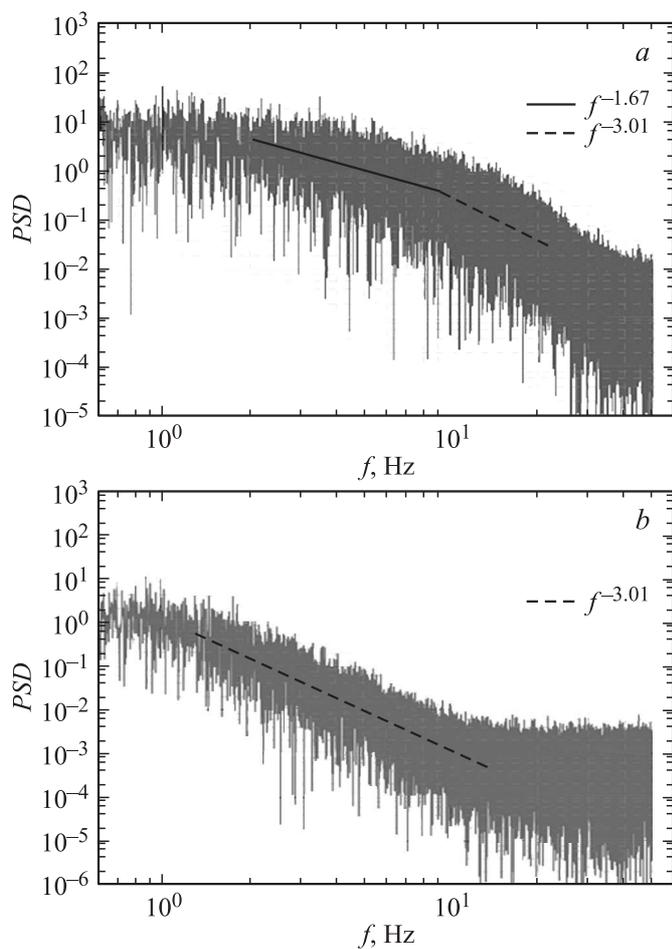


Рис. 3. Спектр мощности температурных пульсаций, полученный методом ТВПЖ при перемешивании жидкости в дискообразном тройнике, на оси течения (a) и вблизи стенки (b).

через тонкую пластину, прозрачную для ИК-излучения. Расход воды через каждое сопло составил 50 ml/s при средней скорости истечения из каждого сопла 1.3 m/s. Число Рейнольдса течения, вычисленное по поперечному размеру сосуда, составило порядка 1.7×10^4 для усредненной температуры.

На рис. 3, *a* 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 Hz 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 Hz). Для спектров, снятых в верхней части сосуда в зоне торможения и закрутки струй, наклон на декаде частот можно идентифицировать как -3 (рис. 3, *b*).

Таким образом, показано, что 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 Hz. Экспериментально на основе метода ТВПЖ исследованы спектры температурных пульсаций в струйных турбулентных течениях воды. Получены наклоны спектра, приближенные к значению $-5/3$, для одиночной импактной затопленной струи и показано наличие двойного инерционного интервала в квазидвумерном турбулентном потоке, образующемся при взаимодействии двух затопленных струй в дискообразном тройнике. При смещении 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.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-38-60186 мол-а-дк).

Авторы выражают благодарность сотрудникам АО „ОКБМ Африкантов“ за предоставление полезной модели для исследований.

Список литературы

- [1] *Kraichnan R.* // J. Fluid Mech. 1971. V. 47. P. 535.
- [2] *Фрик П.Г.* Турбулентность: подходы и модели. Изд. 2-е, испр. и доп. М.; Ижевск: НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, 2010. 332 с.
- [3] *Данилов С.Д., Гурарий Д.* // УФН. 2000. Т. 170. № 9. С. 921–968.
- [4] *Boffetta G., Ecke R.E.* // Ann. Rev. Fluid Mech. 2012. V. 44. P. 427–451.
- [5] *Sommeria J.* // J. Fluid Mech. 1986. V. 170. P. 13–16.
- [6] *Васильев А.Ю.* и др. // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 9. С. 45–49.
- [7] *Большухин М., Знаменская И., Свешиников Д., Фомичев В.* // Автометрия. 2014. Т. 50. № 5. С. 75–83.
- [8] *Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Y.* // J. Flow Visualiz. Image Proc. 2013. V. 20. N 1–2. P. 25–33.