

Н. А. Прибатурин¹, И. А. Евдокименко¹, П. Д. Лобанов^{1}, А. С. Светоносос¹, И. В. Щепихин¹*

Исследование структуры потока при продольном обтекании гибкого стержня

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Аннотация. С помощью метода цифровой трассерной визуализации выполнены исследования локальной гидродинамической структуры при продольном обтекании гибкого, консольно-закрепленного стержня в кольцевом канале. Воздействие гидродинамических сил приводит к вибрации стержня. Получены данные о структуре потока вблизи кончиков различной формы. Скоростной PIV метод позволил выделить частоту колебаний скорости порядка 10 Гц, что соответствует частоте колебаний стержня.

Ключевые слова: кольцевой канал, гидродинамическая структура, цифровая трассерная визуализация

N. A. Pribaturin¹, I. A. Evdokimenko¹, P. D. Lobanov^{1}, A. I. Svetonosov¹, I. V. Schepikhin¹*

Study of the Flow Structure in Longitudinal Flow around a Flexible Rod

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: lobanov@itp.nsc.ru

Abstract. Using the digital tracer visualization method, studies of the local hydrodynamic structure during longitudinal flow around a flexible, cantilevered rod in an annular channel were carried out. The influence of hydrodynamic forces causes the rod to vibrate. Data were obtained on the flow structure near tips of various shapes. The high-speed PIV method made it possible to isolate the frequency of velocity oscillations of the order of 10 Hz, which corresponds to the frequency of oscillations of the rod.

Keywords: annular channel, hydrodynamic structure, particle image velocimetry

Введение

В системах, где существует течение сред (жидких или газовых), возникают различные силы, которые могут являться причиной вибрации конструктивных элементов рабочей установки. Колебания элементов могут вызвать повреждения теплообменных трактов ядерных установок (ТВЭЛОВ, теплообменных трубок и т.д.) [1–4]. В связи с этим требуется развитие методов математического моделирования процессов обтекания гибких стержней продольным потоком жидкой фазы с учетом конструкционных факторов, влияющих на сложность создания моделей. К таким факторам можно отнести способ закрепления труб и ТВЭЛОВ, их жесткость и позиционирование. В литературе присутствует информация, посвя-

щенная экспериментальным и теоретическим исследованиям вибраций тел, обтекаемых потоком [5–7]. Но ряд вопросов по воздействию потока жидкости на пучок стержней по-прежнему остается открытым и требует детального экспериментального изучения.

Цель данной работы – получение данных об эволюции локальных гидродинамических параметров вдоль имитатора твэла при возбуждении его колебаний, вызванном гидродинамическими силами.

Экспериментальная установка

Экспериментальный стенд представлял собой замкнутый контур (см. рис. 1).

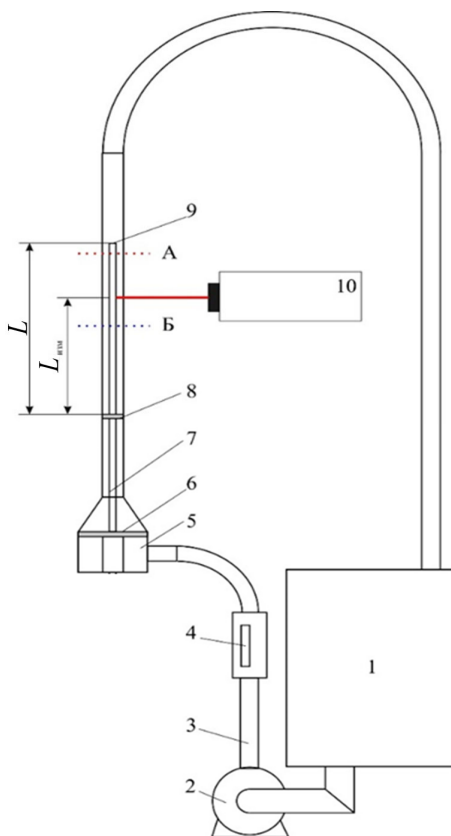


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – основной бак, 2 – центробежный насос, 3 – линия, 4 – расходомер, 5 – коллектор, 6 – выравнивающая поток решетка, 7 – консольно-закрепленный стержень, 8 – решетка, 9 – кончик стержня, 10 – система ЛДА

При экспериментах дистиллированная вода с температурой 25 °С подавалась из бака 1 с помощью центробежного насоса Grundfos 2 в напорную линию 3. Расход жидкости определялся ультразвуковым расходомером 4 (неопределенность определения расхода в пределах $\pm 1\%$ от измеряемой величины). Из напорной линии жидкость через три симметрично расположенных входа поступала в рабочий участок установки через коллектор 5. Для выравнивания потока в коллекторе была установлена решетка 6. За решеткой располагалось плавное суже-

ние, из которого жидкость попадала в кольцевой канал, который был образован внешней трубой с диаметром 26 мм и стержнем 7, с внешним диаметром 12 мм. На расстоянии 200 мм от входа в кольцевой канал располагалась основная решетка 8. Стержень был жестко закреплен в эту решетку. Таким образом было создано консольное закрепление стержня. Длина стержня L определялась, как расстояние от основной решетки до кончика стержня 9.

Были проведены измерения распределения гидродинамических характеристик течения потока жидкости, распределения скорости жидкости и ее пульсаций. Для измерений был использован однокомпонентный лазерно-доплеровский измеритель скорости (ЛДИС) 10. Расстояние по вертикали от начала стержня (верхнего края дистанционирующей решетки) до расположения измерительного объема ЛДИС в наших экспериментах обозначается, как $L_{\text{изм}}$. Показано, что на позициях $L_{\text{изм}} = 200, 400$ и 600 мм профили распределения осредненной скорости практически не отличаются, что говорит об установлении потока вблизи входного коллектора.

Расход жидкости изменялся с помощью частотного преобразователя. Для проверки влияния частоты вращения насоса на генерацию колебаний был установлен байпас. С помощью него был проведен ряд тестовых экспериментов, в которых было показано, что колебания стержня определяются расходом жидкости, а не частотой вращения насоса. Эксперименты проводились в диапазоне расходов жидкости от 1,1 до 6 т/ч с шагом 0,3 т/ч. Выбор шага был обусловлен тем, что в тестовых экспериментах наблюдалась довольно узкая полоса расходов, при которых наблюдалось наибольшее возбуждение вибраций. Длина стержня L устанавливалась равной 600 мм.

Результаты

Проведено исследование структуры течения за наконечниками имитаторов твэла с различной геометрией. Для проведения экспериментов была использована система “Polis – PIV” произведенная в ИТ СО РАН. Для проведения экспериментов в рабочую жидкость были добавлены полиамидные частицы производства Dantec Dynamics. В процессе проведения экспериментов изменялся расход жидкости. Диапазон чисел Рейнольдса течения составлял $12000 \div 60000$. Основной задачей эксперимента являлось исследование гидродинамических характеристик течения за внезапным расширением канала. При этом было исследовано влияние формы носика имитатора твэла на структуру потока. Всего было рассмотрено 3 вида наконечника. Эксперименты были проведены при трапециевидном, цилиндрическом и коническом наконечниках стержня. Результаты измерений приведены на рис. 2–4 в виде полей распределения основных гидродинамических характеристик (вертикальной v_y и горизонтальной v_x компонент скорости). Приведенные поля распределений позволяют определить степень возмущения характеристик потока преградами разной формы. Нужно отметить, что относительные характеристики имеют хорошую повторяемость при разных числах Рейнольдса.

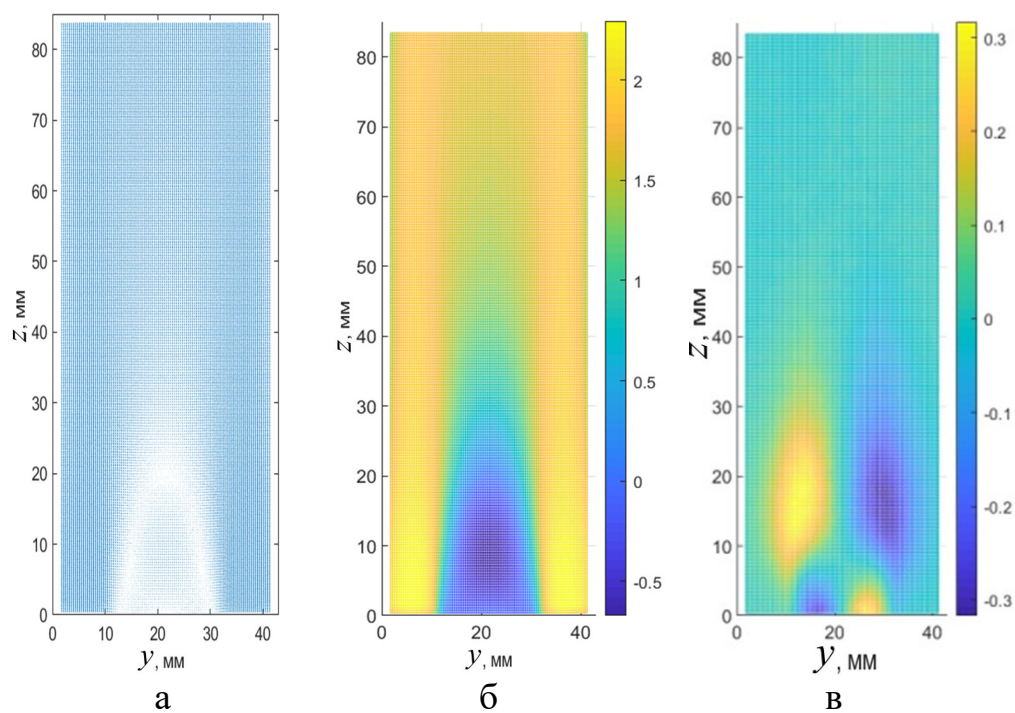


Рис. 2. Распределение гидродинамических характеристик потока за трапециевидным наконечником стержня: а – векторное поле; б – v_y ; в – v_x

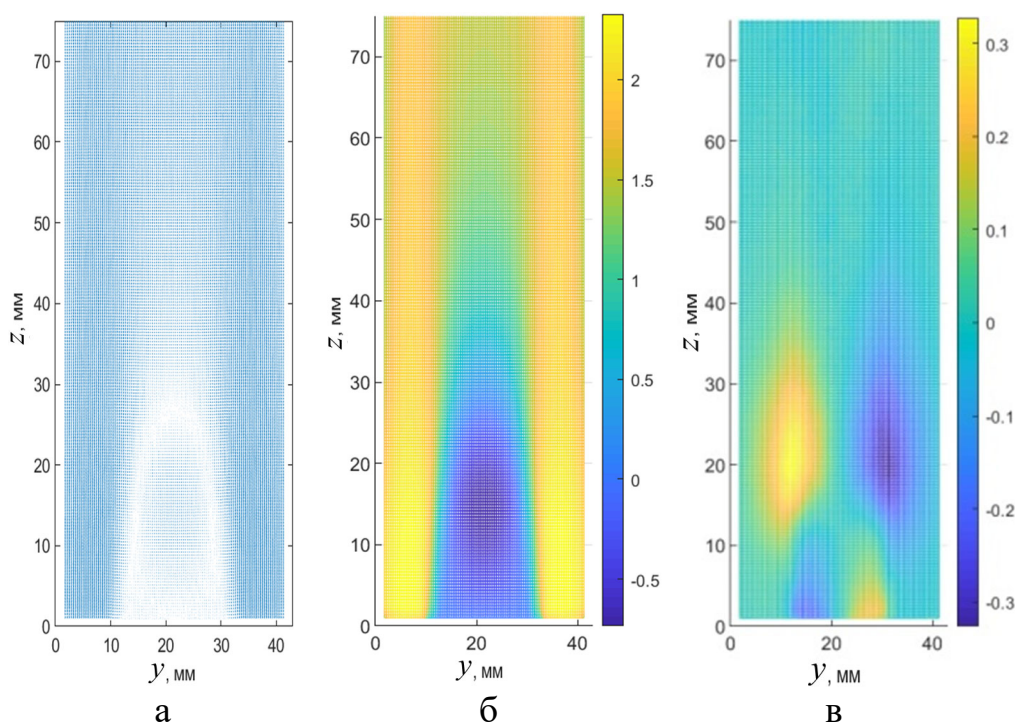


Рис. 3. Распределение гидродинамических характеристик потока за наконечником стержня в форме цилиндра: а – векторное поле; б – v_y ; в – v_x

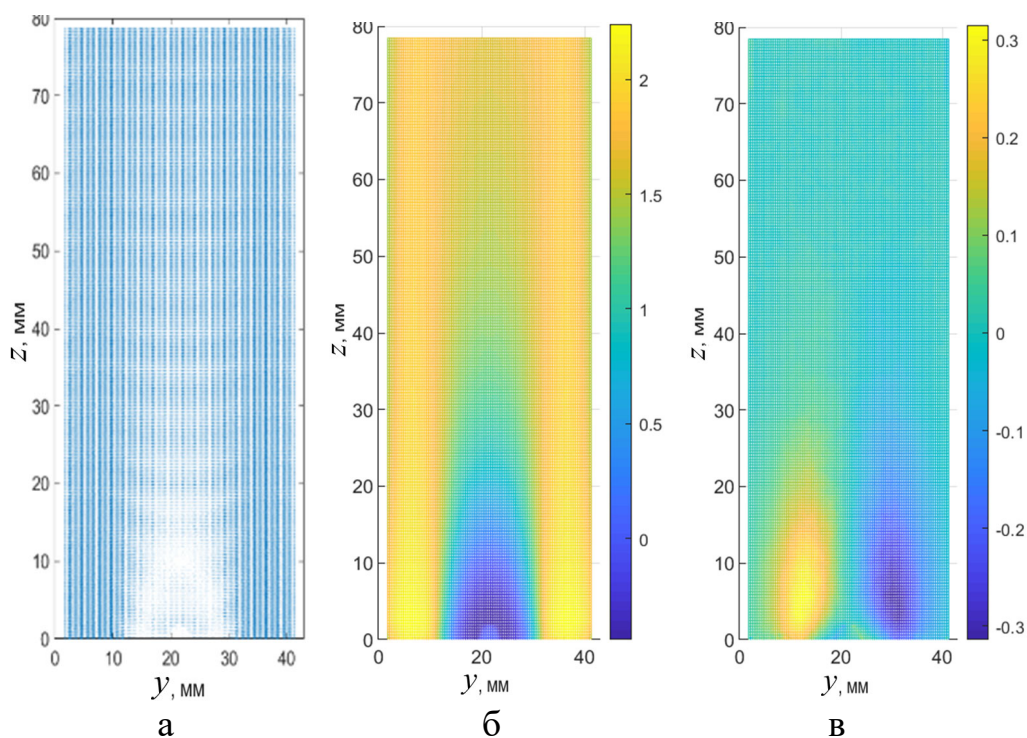


Рис. 4. Распределение гидродинамических характеристик потока за наконечником стержня в форме конуса: а – векторное поле; б – v_y ; в – v_x

Проведено исследование полей скорости вблизи кончика стержня с помощью скоростного метода цифровой трассерной анемометрии (PIV). Для проведения измерений была использована скоростная камера JET 19 с частотой съемки 1000 кадров в секунду. Для формирования лазерного ножа был использован постоянный лазер зеленого цвета с мощностью излучения 1 Вт. Для проведения измерений в поток были добавлены полиамидные частицы с размерами 20–50 мкм. Для предотвращения оптических искажений труба была помещена в бокс, заполненный иммерсионной жидкостью.

Эксперименты были проведены для различных расходов жидкости при диаметре стержня 12 мм. Данные для расхода 1,4 т/ч приведены на рис. 5. Как видно из рисунка, выше кончика стержня по потоку наблюдается близкое к параболическому распределение скорости. При этом он не симметричен, и максимум скорости расположен ближе к центральному стержню. Непосредственно за кончиком существует зона отрывного возвратного течения, где наблюдаются отрицательные скорости течения. Ниже по потоку находится область восстановления потока, где происходит выравнивание профиля скорости. Данные измерений, проведенные для других расходов, выглядят аналогичным образом. Скоростной PIV метод позволил выделить частоту колебаний скорости порядка 10 Гц, что соответствует частоте колебаний стержня.

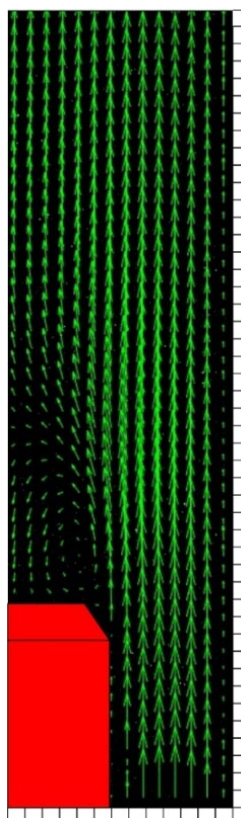


Рис. 5. Данные PIV для поля скорости около кончика консольно-закрепленного стержня

Заключение

Проведены исследования локальной гидродинамической структуры в кольцевом канале с консольно-закрепленным центральным стержнем. Получены данные об эволюции гидродинамических параметров потока вдоль стержня и вблизи его кончика (в зависимости от его формы). Получены данные об осредненных, пульсационных и спектральных параметрах течения. Показано, что в спектре скорости наблюдается выделенная частота, соответствующая частоте колебаний стержня. Данные могут быть использованы для верификации связанных расчетных методов гидродинамики и механики конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems – revision 2, NEA, CSNI, 12 (2014).
2. M. Pettigrew, C. Taylor, N. Fisher, M. Yetisir, B.A.W. Smith. Flow-induced vibration: recent findings and open questions // Nuclear Engineering and Design. 1998. Vol. 185. P. 249–276.
3. Shin Y., Wambsganss M. Flow-induced vibration in LMFBR steam generators: a state-of-the-art review // Nuclear Engineering and Design. 1977. Vol. 40. P. 235–284.
4. Paidoussis M. Real-life experiences with flow-induced vibration // Journal of fluids and structures. 2006. Vol. 22. P. 741–755.
5. Nakamura T., Kaneko S., Inada F., Kato M., Ishihara K., Nishihara T., Mureithi N., Langthjem M. Flow-induced vibrations classifications and lessons from practical experiences, Elsevier, Second Edition, 2014. 432 p.

6. Paidoussis M.P. Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Volume 1, Academic press, 1998. 572 p.

7. Paidoussis M. P. Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Volume 2, Academic press, 2004. 942 p.

© *Н. А. Прибатурин, И. А. Евдокименко, П. Д. Лобанов,
А. С. Светоносков, И. В. Щепихин, 2024*