

Н. А. Прибатурин¹, П. Д. Лобанов^{1}, А. С. Светоносов¹, И. В. Щепихин¹*

Применение методов машинного зрения в исследовании колебания стержня под воздействием гидродинамических сил

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

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

Аннотация. В науке и технике широко распространены методы машинного зрения. В данной работе проведено исследование вибрации продольно обтекаемого потоком жидкости консольно-закрепленного стержня. Исследования проведены с помощью скоростной съемки верхнего торца стержня через прозрачную крышку рабочего участка. Далее было проведено автоматическое распознавание полученных кадров с определением амплитуды и частоты колебаний стержня в зависимости от скорости осевого потока жидкости.

Ключевые слова: вибрация конструкций, скоростная съемка, машинное зрение

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

Application of Computer Vision Methods in the Study of Rod Vibration under the Influence of Hydrodynamic Forces

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

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

Abstract. Computer vision methods are widely used in science and technology. We performed an experimental study of the vibration of a cantilevered rod in a liquid flow. The studies were carried out using a high frame rate camera that captured images through a transparent test section cover. The determination of amplitudes and oscillations of the rod depending on the liquid flow rate was performed by the image processing.

Keywords: vibration of structures, high-speed photography, machine vision

Введение

Конструктивные элементы, находящиеся в потоке жидкости, подвергаются действию гидродинамических сил, вызывающих их колебания. Вибрация может привести к повреждению оборудования и возникновению аварийных ситуаций. В рамках обеспечения безопасной эксплуатации ядерных энергетических установок проведены работы [1–3].

В настоящее время в мире проводятся работы над созданием связанных моделей гидродинамики и механики твердого тела. Большую актуальность подобные методы представляют для реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями, при сравнимой плотности теплоносителя и материалов конструкций. Существует ряд работ, в основном экспериментальных, посвященных

изучению данной проблемы для течений водяного теплоносителя [4–5], однако ряд вопросов до сих пор остаются открытыми.

В данной работе проведены исследования колебаний консольно-закрепленного стержня, вызванные продольным вертикальным потоком жидкости при разных расходах модельного теплоносителя.

Экспериментальный стенд

На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда. Жидкость нагнеталась из бака 1 в рабочую область с помощью насоса 2, который имеет максимальную производительность 17 кубометров в час. В секции 3 происходило выравнивание потока. Для мониторинга расхода жидкости использовался расходомер 4. Модельный теплоноситель – вода с температурой $25 \pm 0,2$ °С. Жидкость подавалась в коллектор 5 с установленным хонейкомбом, в экспериментальную модель внутренним диаметром 26 мм (общая длина 1200 мм). Внешняя часть рабочей зоны была выполнена из органического стекла для возможности проведения оптических измерений.

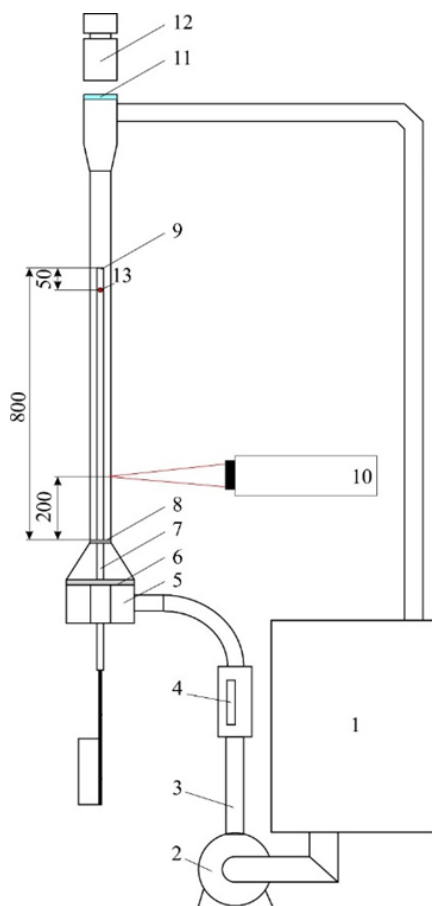


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – бак для хранения жидкости, 2 – центробежный насос, 3 – подающая линия, 4 – ультразвуковой расходомер, 5 – коллектор, 6 – хонейкомб, 7 – трубка-стержень, 8 – дистанционирующая решетка, 9 – кончик стержня, 10 – система ЛДА, 11 – оптическое стекло, 12 – скоростная камера

В центре рабочего участка была установлена дюралюминиевая трубка 7 с внутренним и внешним диаметрами 10 мм и 12 мм соответственно. Трубка была жестко припаяна к дистанционирующей решетке 8, расположенной в начале рабочего участка. Длина свободной части трубки, обтекаемой потоком жидкости – 800 мм.

Контроль распределения локальных гидродинамических параметров на входе в канал осуществлялся с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости 10.

Для проведения измерений колебаний стержня использовалась скоростная съемка торца прозрачной трубки 9 через прозрачное окно 11, с помощью камеры JET 19 с частотой 1200 кадров в секунду (12).

Обработка полученных изображений производилась в среде Python. Для увеличения точности поиска расположения оси трубки использовался поиск по маске, которая представляла собой изображение торца трубки, на который были нанесены насечки. После нахождения центра трубки на первом изображении, для последующих поиск осуществлялся в пределах 30 пикселей, а остальные результаты отбрасывались, как ошибочные, что дополнительно увеличивало точность измерений.

Результаты

Измерения проводились при разных расходах жидкости $Q_{ж}$, в пределах $1,1 \div 6$ м³/ч. Общее время съемки для каждого режима – 20 секунд. Траектории перемещений оси стержня (линии синего цвета) и «тепловые карты» расположения оси стержня в пространстве за все время выборки приведены для $Q_{ж} = 1,1$ и 6 м³/ч на рис. 2. Траектории перемещения приведены за временной интервал 1 с, временная задержка между данными, приведенными на разных рисунках – 5 секунд. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что обтекаемая потоком трубка совершает колебательные движения с увеличением амплитуды при увеличении расхода жидкости.

Для $Q_{ж} = 1,1$ м³/ч отклонения оси стержня, в основном, ограничены значениями порядка 0,15 мм при среднем значении 0,06 мм. Редкие выбросы достигают величин порядка 0,2–0,3 мм.

Для $Q_{ж} = 6$ м³/ч диаметр области перемещений центральной трубки увеличивается примерно до 0,3 мм. Пиковые значения составляют порядка 0,8 мм. Среднее значение амплитуды колебаний центральной трубки увеличивается примерно в три раза, по сравнению с минимальным расходом рабочей жидкости, до 0,2 мм.

Изучение полного диапазона расходов жидкости позволяет сделать следующие выводы:

- с увеличением расхода жидкости происходит линейное возрастание среднего отклонения положения трубы от центральной оси рабочей зоны;
- обнаружена характерная частота возбуждения в диапазоне 9–10 Гц, слабо зависящая от расхода теплоносителя.

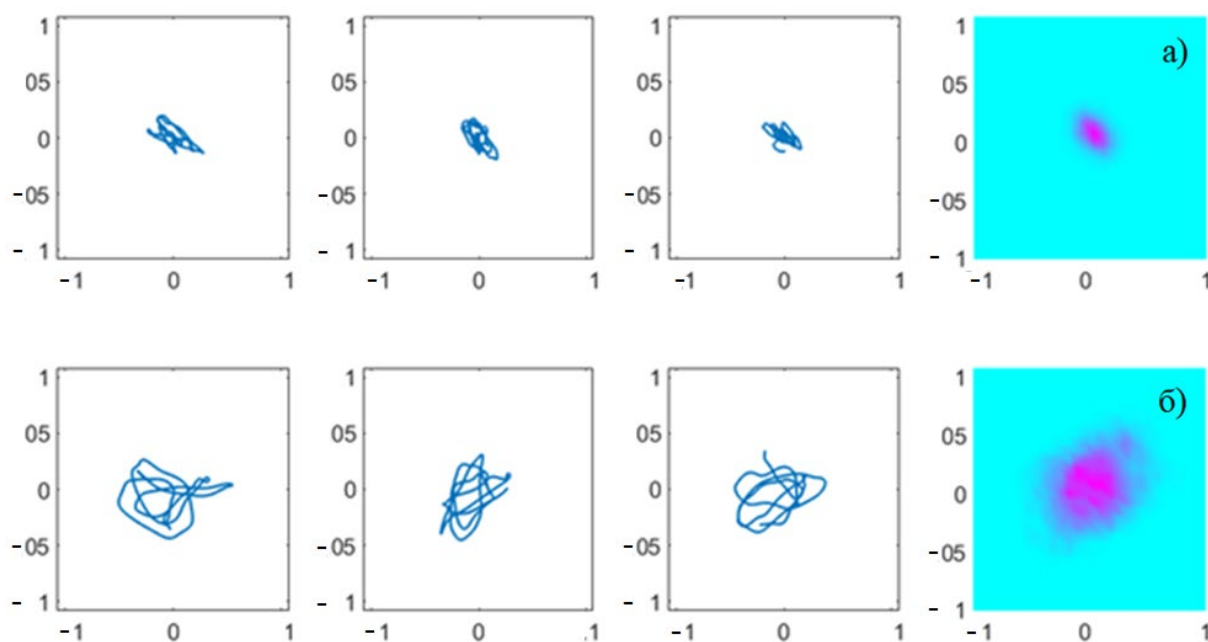


Рис. 2. Колебания стержня: а) $Q_{\text{ж}} = 1,1 \text{ м}^3/\text{ч}$; б) $Q_{\text{ж}} = 6 \text{ м}^3/\text{ч}$

Заключение

Скоростная съемка и автоматическая обработка изображений с помощью методов машинного зрения позволили провести экспериментальное исследование амплитудно-частотных параметров колебаний консольно-закрепленного стержня в восходящем потоке жидкости. Получены данные о временных зависимостях отклонения стержня от вертикальной координаты. Полученные данные могут быть использованы для верификации связанных расчетных методов гидродинамики и механики конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M. Pettigrew, C. Taylor, N. Fisher, M. Yetisir, B.A.W. Smith. Flow-induced vibration: recent findings and open questions // Nucl. Eng. Des. 1998. V. 185. Pp. 249–276.
2. Paidoussis M. Real-life experiences with flow-induced vibration // J. of fluids and structures. 2006. V. 22. Pp. 741–755.
3. Shin Y., Wambsganss M. Flow-induced vibration in LMFBR steam generators: a state-of-the-art review // Nucl. Eng. Des. 1977. V. 40. Pp. 235–284.
4. Paidoussis M.P. Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Volume 1, Academic press, 1998. 572 p.
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, Sec. Ed., 2014. 432 p.

© Н. А. Прибатурин, П. Д. Лобанов, А. С. Светоносков, И. В. Щетихин, 2024