

УДК 621.311.25:621.039

Экспериментальное исследование колебаний стержня в продольном потоке жидкости

Н.А. Прибатурин^{1,2}, П.Д. Лобанов², И.В. Щепихин²,
В.Г. Меледин², А.И. Светоносков²

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
Новосибирский филиал

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: nialp@mail.ru, lobanov@itp.nsc.ru

С помощью оригинального сенсора, построенного на основе электроимпедансного метода, проведено экспериментальное исследование колебаний консольно-закрепленного стержня — имитатора твэла — в кольцевом канале при продольном восходящем течении жидкости. Приведены данные о траекториях перемещения оси стержня, изменении амплитуды и частоты колебаний стержня в зависимости от скорости осевого потока жидкости. Проведено сравнение данных по вибрации стержня, полученных с помощью электроимпедансного метода и скоростной видеосъемки.

Ключевые слова: вибрация, вызванная потоком; эксперимент, гидродинамическая структура потока.

Введение

Течение жидкости приводит к возникновению гидродинамических сил, которые могут вызывать вибрацию конструкций. Изучение процесса взаимодействия «жидкость—твердое тело» относится к активно развивающейся области механики. Вибрационные нагрузки могут приводить к возникновению потенциально опасных ситуаций, например, фреттинг-коррозии твэлов или теплообменных трубок в парогенераторах энергетических установок [1], а также к повреждению элементов контура реакторной установки [2–4].

В настоящее время не существует общепринятой физической модели колебаний сборки вертикальных стержней в продольном потоке жидкости и основанного на ней математического описания процесса. Расчет колебаний стержней требует совместного анализа их жесткости, способа крепления и позиционирования относительно друг друга. Экспериментальные исследования до сих пор остаются практически единственным способом детального изучения характеристик динамического отклика пучка стержней на воздействие потока жидкости. Экспериментальным и теоретическим исследованиям вибраций тел, обтекаемых потоком, посвящен ряд работ. Обзоры по данной тематике приводятся в монографиях [5–7].

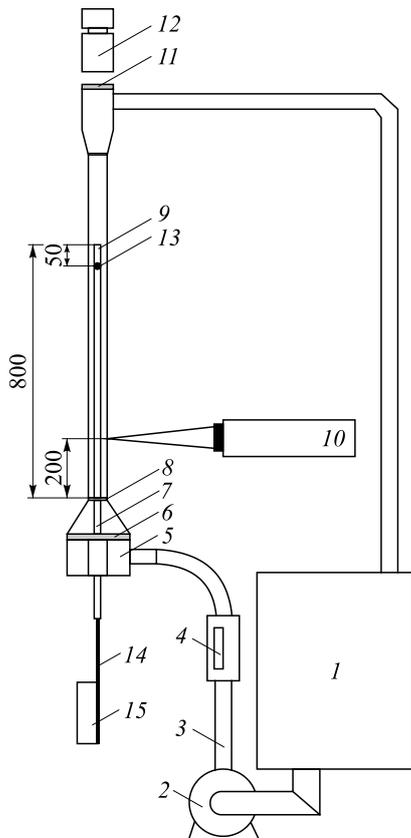
© Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Щепихин И.В., Меледин В.Г., Светоносков А.И., 2021

Цель настоящей работы — апробация нового метода измерения вибрации одиночного, консольно-закрепленного стержня в вертикальном цилиндрическом канале при восходящем течении жидкости с различной скоростью.

Экспериментальный стенд

Принципиальная схема стенда, на котором проводились экспериментальные исследования, приведена на рис. 1. Жидкость из бака 1 подается циркуляционным насосом 2 на вход вертикально установленного рабочего участка. Для организации течения жидкости использовался насос с максимальной производительностью $17 \text{ м}^3/\text{ч}$. На подводящем трубопроводе 3 расположен ультразвуковой расходомер «Карат-РС-32» 4 с заявленной погрешностью не более 2 % от измеряемой величины. Подача потока жидкости в рабочий участок осуществлялась через три патрубка диаметром 20 мм, расположенных под углом 120 градусов друг относительно друга снизу рабочего участка. Из патрубков поток попадал в полость входного коллектора 5 диаметром 60 мм и длиной 55 мм, по центру которого была установлена втулка, диаметром 20 мм, уменьшающая взаимодействие потоков жидкости, истекающих из патрубков. Далее был установлен хонекомб 6, выравнивающий поток жидкости. За ним находилась конусная вставка, обеспечивающая плавный переход от цилиндрической части коллектора внутренним диаметром 60 мм к диаметру внешней трубы рабочего участка. Такая конструкция входной секции обеспечивала равномерное поле скорости на входе в кольцевой канал. Длина внешней трубы канала составляла 1200 мм.

Рабочий участок представляет собой цилиндрический канал внутренним диаметром 26 мм. По оси канала расположен стержень 7, выполненный в виде трубки диаметром 12 мм. Материал трубки-стержня — Д16Т, толщина материала трубки однородна по высоте и равна 1 мм. Верхний торец трубки заглушен конической пробкой 9, второй конец трубки выведен через штуцер за пределы рабочего участка и был открыт. Имеющий такой вид стержень центрировался относительно цилиндрического канала решеткой из алюминия 8, к которой был приварен. Толщина материала решетки составляла 2 мм, высота — мм. Поперечное сечение канала в месте соединения стержня с решеткой и общий вид решетки показаны на рис. 2. Для обеспечения консольного расположения стержня при обтекании решетки продольным потоком жидкости он был закреплен в канале в двух местах: с помощью центрирующей решетки 8 и прижимной гайки на входном коллекторе 5. Длина свободной части трубки составляла 800 мм. Для проведения измерений непосредственно внутрь трубки со стороны ее нижнего торца вставлялся датчик фиксации перемещения оси свободного



датчик фиксации перемещения оси свободного

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

- 1 — бак, 2 — насос, 3 — напорная линия, 4 — расходомер, 5 — входной коллектор, 6 — выравнивающая решетка, 7 — трубка-стержень, 8 — решетка, 9 — кончик стержня, 10 — лазерный доплеровский измеритель скорости, 11 — оптическое стекло, 12 — скоростная камера, 13 — датчик, 14 — штанга с емкостным датчиком перемещений, 15 — электронная аппаратура.

конца трубки. При этом датчик был неподвижен относительно экспериментального стенда и не касался внутренних стенок трубки. Верхний участок кольцевого канала был выполнен из прозрачного материала для обеспечения измерений перемещения оси стержня альтернативным методом с помощью скоростной видеосъемки. Съемка выполнялась через окно 11 с помощью скоростной камеры JET 19 с частотой 1200 кадров в секунду 12. Для определения распределения скорости течения жидкости и ее пульсаций в кольцевом зазоре между стержнем и цилиндрическим каналом использовался лазерный доплеровский измеритель скорости 10.

Стенд оснащен необходимыми системами диагностики параметров его работы и поддержания постоянной температуры теплоносителя. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода, температура которой поддерживалась на уровне 25 °С с точностью $\pm 0,2$ °С.

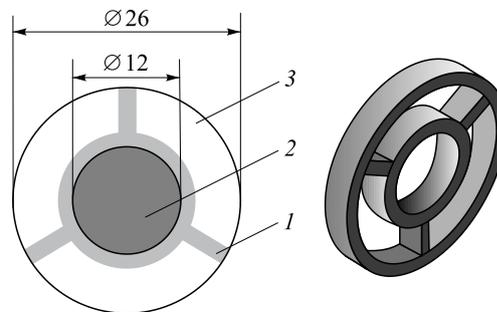
Описание и калибровка емкостного датчика

Измерение вибрации стержня было выполнено на основе электроимпедансного метода. С помощью емкостного датчика 13, установленного внутри стержня, регистрировалось отклонение последнего от оси вертикального положения. Разработанный емкостной датчик состоит из четырех сенсоров, расположенных на выносной штанге 14, которая вставляется внутрь трубки 7. Длина штанги, выполненной из дюралюминия, составляла 1000 мм, внешний диаметр — 6 мм, толщина стенки — 1 мм. Собственная частота штанги равнялась 4 Гц. Принцип работы датчика основан на измерении емкости между сенсором и поверхностью имитатора твэла, емкость в свою очередь зависит от расстояния между сенсором и внутренней стенкой имитатора. Датчик включает в себя миниатюрные платы размером 100×5×1 мм. Размер модуля, собранного из плат, составляет 5×5×100 мм. Сенсоры расположены вдоль края плат и имеют длину 27–30 мм. После преобразования четырех емкостей по осям x и y в четыре расстояния и применения методов триангуляции вычислялось положение центра оси стержня относительно неподвижных сенсоров. Сенсоры были подключены к блоку электроники 15 и внешнему блоку аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Аналоговый сигнал усиливался непосредственно на плате блока электроники, что позволило существенно уменьшить шумы. При постобработке полученные данные преобразовывались в координаты центра оси стержня относительно неподвижного датчика.

Статическая калибровка датчика проводилась на стенде, состоящем из двухкоординатного столика, оснащенного двумя микрометрами часового типа; цена деления равнялась 0,01 мм, погрешность составляла $\pm 0,01$ мм. На столик жестко закреплялся отрезок трубки длиной 150 мм внутренним диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм. Внутри трубки располагался емкостной датчик, закрепленный независимо от столика за основание стенда. Датчик в процессе калибровки оставался неподвижным, а столик с жестко закрепленной трубкой перемещался. В результате координаты центра трубки изменялись и измерялись с помощью микрометров. После перемещения трубки в очередную точку калибровки фиксировалось напряжения на сенсорах. Измерение напряжений осуществлялось с помощью многоканального внешнего АЦП (L-CARD E14-440). Калибровка была проведена по 82 точкам. На рис. 3 представлены данные, полученные в результате калибровки. Здесь по оси R отложено

Рис. 2. Схема поддерживающей решетки.

1 — решетка, 2 — трубка,
3 — поверхность внешней трубы.



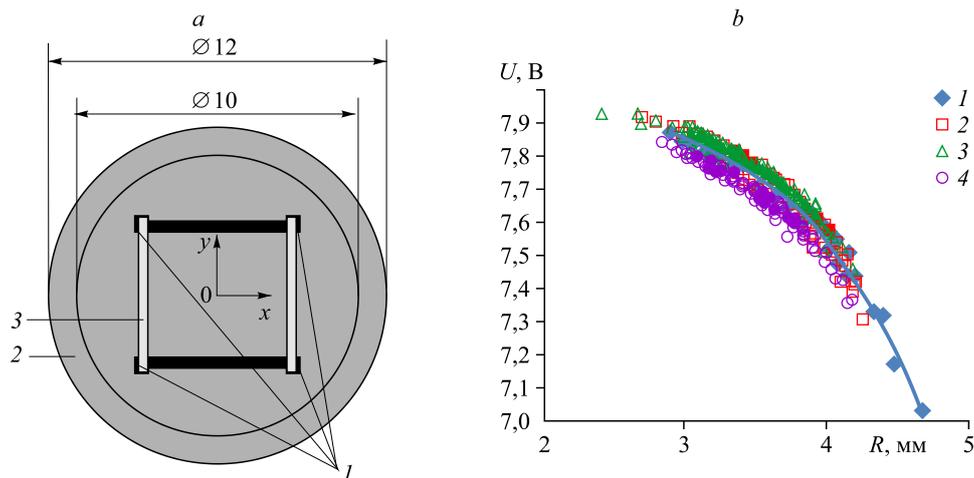


Рис. 3. Схема расположения датчика и данные статической калибровки датчика.
 а: 1 — сенсоры, 2 — трубка, 3 — платы; б — s1 (1), s2 (2), s3 (3), s4 (4).

расстояние в мм от центра трубки до сенсора, по оси U — напряжение на сенсорах в вольтах. Сплошной линией показана аппроксимирующая кривая, рассчитанная с использованием полиномов третьей степени. Данные приведены для всех четырех сенсоров (s1–s4). Случайная и систематическая неопределенности измерений составляют 0,02 и 0,02 мм соответственно.

Испытания датчика также проводились в динамическом режиме при течении жидкости через рабочий участок. Для этого выносная штанга устанавливалась на трехпозиционное координатное устройство. Координатное устройство было вибрационно развязано с измерительным контуром. Контроль точности выставления оси сенсоров по центру рабочего канала осуществлялся за счет одновременной оптической регистрации двумя камерами, установленными под углом 90 градусов относительно друг друга, и меток на поверхности рабочего участка. В ходе такой динамической калибровки было определено отсутствие передачи вибрации от свободного конца трубки-стержня к измерительному датчику и от стенда к рабочему участку.

Результаты экспериментов

Измерение свободных колебаний вертикального стержня в цилиндрическом канале проверялось в ходе предварительных экспериментов. Для этой цели рабочий участок заполнялся водой и свободный конец стержня вручную отклонялся от равновесия в поперечном направлении на малую величину порядка 2 мм. Затем при помощи скоростной съемки и емкостного датчика фиксировались свободные затухающие колебания стержня в воде. Аналогичные измерения свободных колебаний стержня были проведены и в воздушной среде. Примеры свободных колебаний стержня в воздухе и воде представлены на рис. 4, там же приведен соответствующий им спектр колебаний. Как видно из рис. 4, смещение свободного конца стержня является периодическим с уменьшением амплитуды с течением времени, спектр мощности представляет одну доминантную частоту, для воздуха она составляет 14,3 Гц, для воды — 8,5 Гц. Эти величины совпадают с частотой свободных колебаний консольно-закрепленного стержня. По сравнению со свободными колебаниями в воздухе колебания стержня в трубе с водой характеризуются наличием присоединенной массы, что изменяет степень демпфирования колебаний, приводя к их сильному затуханию.

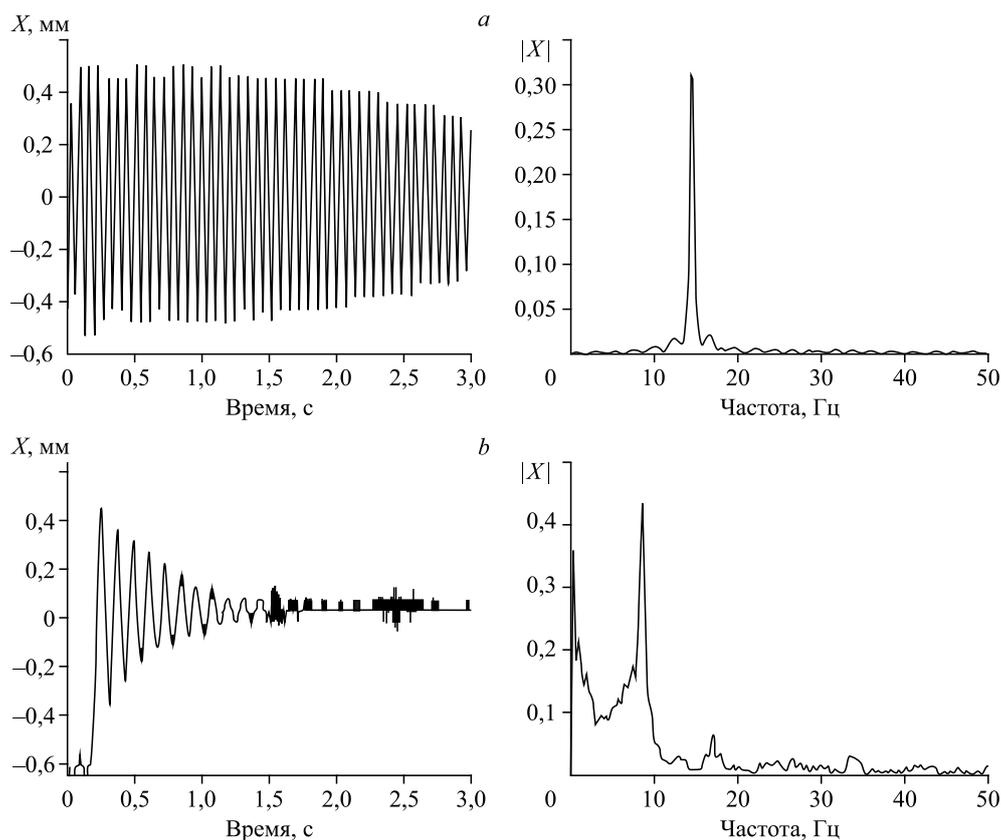


Рис. 4. Свободные колебания стержня и их спектр в воздухе (а) и воде (б).

Важным моментом при измерении вибрации в потоке жидкости является степень однородности течения жидкости в канале. Помимо использования технических средств стабилизации потока жидкости на входе в кольцевой канал были проведены измерения средней и пульсационной скорости жидкости в различных сечениях по высоте рабочего участка для подтверждения условий установившегося потока в измерительной области. Эти измерения были выполнены с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости «ЛАД-05». Данные измерений осевой скорости на расстоянии 200 мм от входа в канал приведены на рис. 5 для двух значений расхода жидкости. Здесь координата y изменяется

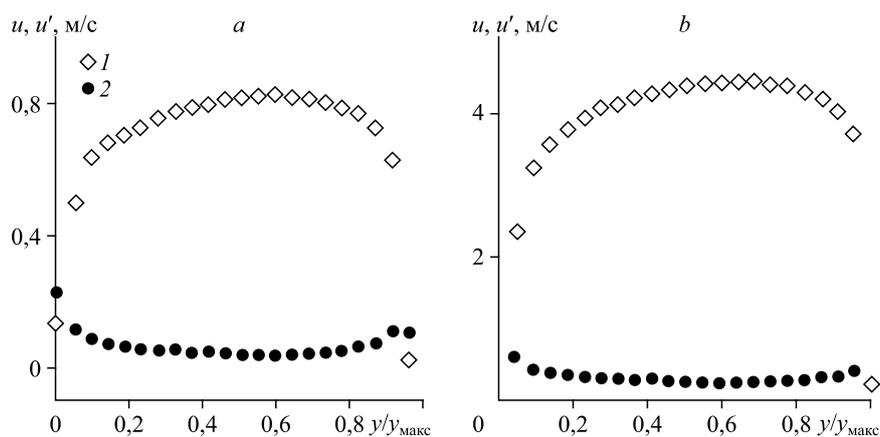


Рис. 5. Распределение скорости жидкости (1) и ее пульсации (2) по сечению кольцевого канала.

Расход жидкости $V_{\text{ж}} = 0,7$ (а), 3,8 (б) м/с.

от внешней стенки кольцевого канала к внешней стенке имитатора твэла ($y = y_{\text{макс}}$). Из графиков распределения скорости по поперечному сечению кольцевого канала видно, что в случае меньшего расхода максимальная скорость течения жидкости достигает порядка 0,8 м/с, а в случае большего расхода жидкости — около 4 м/с. Профили распределения скорости подобны для разных расходов: профиль скорости несимметричен и смещен в сторону имитатора твэла, что характерно для течения жидкости в кольцевом канале. Приведенные распределения скорости течения во входном участке канала являются определяющими с точки зрения обоснования режима течения и применения в качестве входных параметров для численных расчетов.

Исследования колебаний стержня при его обтекании продольным потоком жидкости проводились при изменении расхода жидкости в диапазоне $Q_{\text{ж}} = 1,1 \div 6 \text{ м}^3/\text{ч}$ с шагом $0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствовало изменению среднерасходной скорости течения жидкости $V_{\text{ж}}$ в диапазоне $0,7 \div 3,8 \text{ м/с}$ ($Re = 9800 \div 53200$). Скоростной напор $\rho V_{\text{ж}}^2/2$, где ρ — плотность жидкости, находился в пределах $245 \div 7220 \text{ Па}$. Измерения колебаний стержня емкостным датчиком были синхронизированы с фиксацией перемещения головки стержня с помощью скоростной видеокамеры. Было определено, что при всех расходах жидкости наблюдается сложный колебательный процесс, в котором происходит смена периодов с высокой и низкой амплитудой колебаний. На рис. 6 приведены типичные временные зависимости перемещения оси стержня при его продольном обтекании жидкостью со скоростью 0,7 м/с, полученные с помощью емкостного датчика (1) и скоростной съемки (2). Сравнение этих зависимостей указывает на их хорошее совпадение. Для обработки последовательности видеок кадров использовалась процедура поиска по маске, которая дает попиксельную точность. При этом неопределенность измерения положения оси трубки составляла порядка $\pm 0,02 \text{ мм}$.

На рис. 7 приведены траектории перемещений оси стержня, восстановленные по результатам измерений емкостным датчиком, при минимальном и максимальном расходах жидкости за время, равное 1 секунде. Как видно, ось стержня флуктуирует около вертикальной оси канала, амплитуда перемещений тем больше, чем выше скорость течения жидкости. На рис. 8 приведены гистограммы смещения центра имитатора твэла за полное время выборки для двух расходов жидкости. Следует отметить, что полученные для разных расходов данные довольно сильно отличаются. Для минимального расхода жидкости основной колебательный процесс ограничен диапазоном амплитуды перемещения порядка 0,15 мм, с редкими выбросами до 0,2–0,3 мм. Среднее значение отклонения $R_{\text{ср}}$

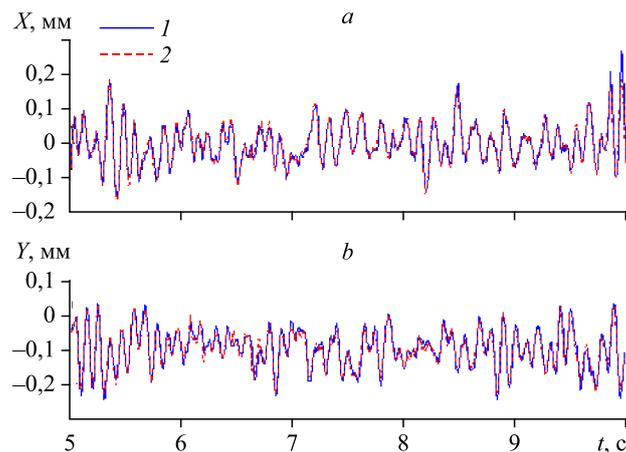


Рис. 6. Перемещение стержня по осям x (а) и y (б).

$V_{\text{ж}} = 0,7 \text{ м/с}$; 1 — сигнал датчика,
2 — результат обработки видеоданных.

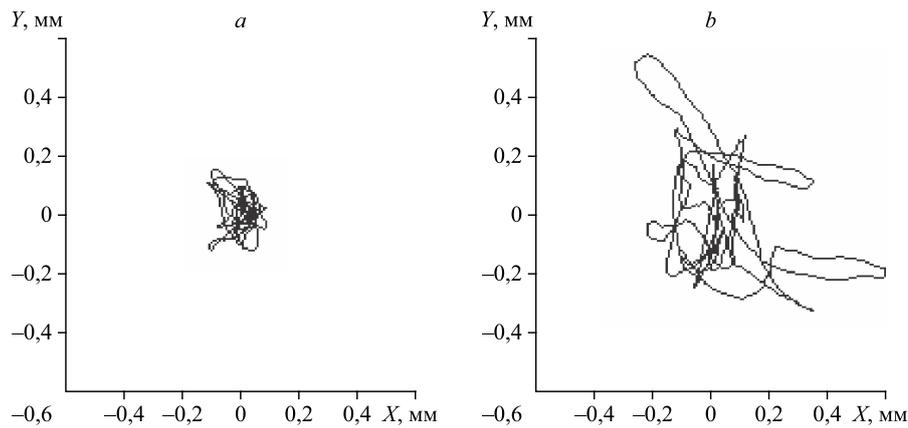


Рис. 7. Траектория перемещения оси стержня при $V_{ж} = 0,7$ (a), 3,8 (b) м/с.

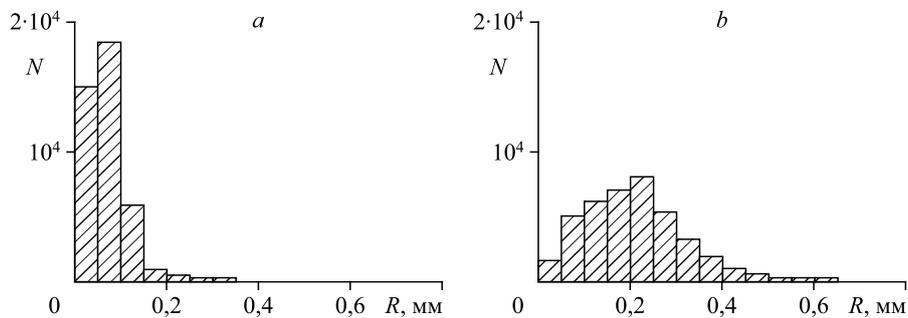


Рис. 8. Гистограммы амплитуд отклонения стержня от его оси при $V_{ж} = 0,7$ (a), 3,8 (b) м/с.

составляет около 0,06 мм. Для более высокого расхода жидкости границы перемещения оси стержня в колебательном процессе увеличиваются примерно в два раза, а выбросы доходят до величины порядка 0,7–0,8 мм. Среднее значение амплитуды перемещения стержня в данном режиме превышает 0,2 мм.

График зависимости средней амплитуды перемещения оси стержня, отнесенной к диаметру стержня, от скорости жидкости представлен на рис. 9. Видно, что при постепенном увеличении расхода жидкости от минимального до максимального значения наблюдается практически линейное увеличение среднего отклонения оси стержня от ее равновесного значения.

На рис. 10 приведена амплитудно-частотная зависимость колебаний стержня для минимального и максимального расходов жидкости. Проведенные исследования с использованием двух методов измерений вибрации стержня показали их соответствие между собой. Видно, что максимальную амплитуду имеют моды колебаний с частотами до 10 Гц. Для спектральных характеристик сигнала пик наблюдается в районе 9–10 Гц.

Увеличение скорости жидкости приводит к появлению дополнительных шумов в области

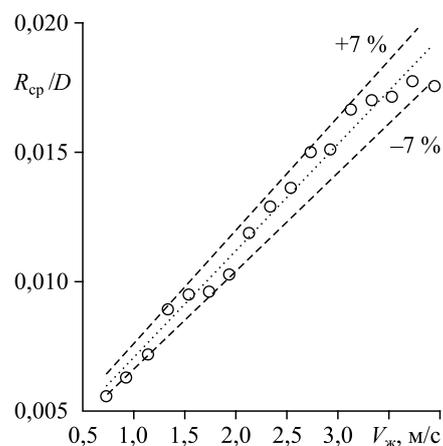


Рис. 9. Среднее значение отклонения оси стержня в зависимости от скорости жидкости.

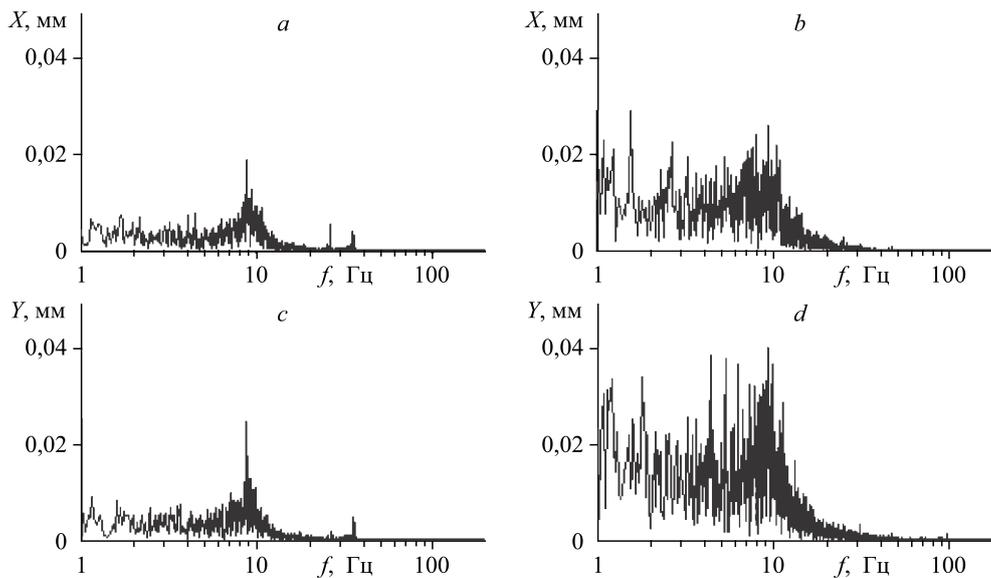


Рис. 10. Спектральные характеристики сигналов датчика при $V_{ж} = 0,7$ (a), 3,8 (b) м/с.

малых частот и к увеличению максимальной амплитуды колебаний. При уменьшении скорости жидкости частота колебаний стержня приближается к частоте собственных колебаний стержня в воде.

Заключение

На основе электроимпедансного метода выполнено экспериментальное исследование колебаний консольно-закрепленного стержня — имитатора твэла — в кольцевом канале в продольном восходящем потоке жидкости. Проведено сравнение данных по характеристикам колебаний стержня при течении жидкости с различными скоростями, полученных на основе разработанного датчика и скоростной видеосъемки. Показано совпадение результатов. На основе анализа полученных данных продемонстрирована перспективность использования предложенного электроимпедансного метода измерения для экспериментальных исследований колебаний в потоке жидкости конструктивных элементов энергетических реакторов.

Список литературы

1. **Assessment** of CFD codes for nuclear reactor safety problems — Revision 2. NEA, CSNI, 12. 2014. 226 p.
2. **Pettigrew M., Taylor C., Fisher N., Yetisir M., W.Smith B.A.** Flow-induced vibration: recent findings and open questions // Nuclear Engng and Design. 1998. Vol. 185. P. 249–276.
3. **Shin Y., Wambsgans M.** Flow-induced vibration in LMFBR steam generators: a state-of-the-art review // Nuclear Engng and Design. 1977. Vol. 40. P. 235–284.
4. **Paidoussis M.** Real-life experiences with flow-induced vibration // J. 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. 2nd edition. Elsevier, 2014. 432 p.
6. **Paidoussis M.P.** Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Academic press, 1998. Vol. 1. 572 p.
7. **Paidoussis M.P.** Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Academic press, 2004. Vol. 2. 942 p.

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2021 г.,
после доработки — 7 мая 2021 г.,
принята к публикации 18 мая 2021 г.