

УДК 621.039.5:532

## Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик для валидации численных расчетов возбуждения конструкций потоком жидкости

А.В. Будников<sup>1</sup>, Е.И. Шмелев<sup>1</sup>, Д.А. Куликов<sup>1</sup>, А.В. Логинов<sup>1</sup>, С.М. Дмитриев<sup>2</sup>,  
Н.А. Прибатурин<sup>3</sup>, П.Д. Лобанов<sup>3</sup>, А.С. Суворов<sup>4</sup>, А.В. Стуленков<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова»,  
Бурнаковский проезд, 15, г. Нижний Новгород 603074, Россия

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,  
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия

<sup>3</sup>Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук,  
пр. Академика Лаврентьева, 1, г. Новосибирск 630090, Россия

<sup>4</sup>Институт прикладной физики Российской академии наук,  
ул. Ульянова, 46, г. Нижний Новгород 603950, Россия

Поступила 18.07.2019

Принята к печати 19.08.2019

Вибрация конструкций под воздействием нестационарных гидродинамических сил, обусловленных обтеканием потоком поверхностей конструкций, может неблагоприятно сказываться на прочности и усталостной долговечности. Снижение неблагоприятного воздействия гидродинамических сил в настоящее время становится возможным по результатам связанных трехмерных расчетов гидродинамики (CFD) и вибрации. Однако для адекватного описания в связанной задаче определяющих физических процессов должны использоваться специфические именно для задачи гидроупругих колебаний расчетные модели и подходы. Для обоснования и валидации таких подходов разработана экспериментальная модель и выполнена серия исследований процесса возбуждения конструкции потоком воды.

В качестве конструкции рассматривалась модель, состоящая из двух последовательно установленных цилиндров в поперечном потоке рабочей среды. В процессе испытаний, в зависимости от скорости потока, измерялись уровни вибраций и пульсаций давления в потоке и нестационарных полей скорости. Относительно простая конструкция рассматриваемой модели позволила применить различные бесконтактные системы измерений нестационарных процессов для кроссвалидации получаемых экспериментальных данных и для оценки неопределенностей в процессе испытаний.

На основании полученных данных синхронных измерений анализировалось взаимное влияние потока и динамики конструкции, обусловленное эффектом синхронизации между частотой срыва (или ее гармониками) и собственной частотой цилиндров. Таким образом, выполненные исследования позволили получить информацию одновременно и о динамических характеристиках потока, и о параметрах, характеризующих вибрацию, для случая консольного закрепления стержней.

Полученные экспериментальные данные используются для определения требований к точности проведения численных расчетов гидродинамических сил и для валидации одно- и двусторонне связанных методов численного расчета возбуждений конструкций потоком.

**Ключевые слова:** валидация, вибрация, *PIV* и *LDV* методы, лазерный виброметр, собственная частота.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

**Адрес для переписки:**

А.В. Логинов  
Опытное конструкторское бюро машиностроения  
имени И.И. Африкантова,  
Бурнаковский проезд, 15, г. Нижний Новгород 603074, Россия  
e-mail: loginoff.86@gmail.com

**Address for correspondence:**

A.V. Loginov  
Afrikantov OKB Mechanical Engineering,  
Burnakovskiy proezd, 15, Nizhny Novgorod 603074, Russia  
e-mail: loginoff.86@gmail.com

**Для цитирования:**

А.В. Будников, Е.И. Шмелев, Д.А. Куликов, А.В. Логинов, С.М. Дмитриев,  
Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, А.С. Суворов, А.В. Стуленков  
Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик  
для валидации численных расчетов возбуждения конструкций  
потоком жидкости.

Приборы и методы измерений.

2019. – Т. 10, № 3. – С. 223–232.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

**For citation:**

A.V. Budnikov, E.I. Shmelev, D.A. Kulikov, A.V. Loginov, S.M. Dmitriev,  
N.A. Pribaturin, P.D. Lobanov, A.S. Suvorov, A.V. Stulenkov  
[Measurements of the Hydrodynamic and Vibrational Characteristics  
to Validate Numerical Calculations of the Structure Excitation  
by Fluid Flow].

*Devices and Methods of Measurements.*

2019, vol. 10, no. 3, pp. 223–232 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

# Measurements of the Hydrodynamic and Vibrational Characteristics to Validate Numerical Calculations of the Structure Excitation by Fluid Flow

A.V. Budnikov<sup>1</sup>, E.I. Shmelev<sup>1</sup>, D.A. Kulikov<sup>1</sup>, A.V. Loginov<sup>1</sup>, S.M. Dmitriev<sup>2</sup>, N.A. Pribaturin<sup>3</sup>, P.D. Lobanov<sup>3</sup>, A.S. Suvorov<sup>4</sup>, A.V. Stulenkov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company, "Afrikantov OKB Mechanical Engineering",  
Burnakovsky proezd, 15, Nizhny Novgorod 603074, Russia

<sup>2</sup>R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University,  
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia

<sup>3</sup>S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences,  
Akademiyan Lavrentiev Ave., 1, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>4</sup>Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,  
Ul'yanov str., 46, Nizhny Novgorod 603950, Russia

Received 18.07.2019

Accepted for publication 19.08.2019

## Abstract

Structure vibration under the influence of unsteady hydrodynamic forces caused by the flow around their surfaces can adversely affect durability and rupture life. Reducing the adverse effects of hydrodynamic forces is currently possible with the help of linked *CFD* and vibration calculations. However, for an adequate description of the associated processes one should use calculation models and approaches specific to the hydro-vibration problem. To justify and validate such approaches, an experimental model was developed and a series of structure excitation tests in water flow was carried out.

The model comprises two cylinders installed sequentially in water crossflow. Vibration levels, pressure and velocity fluctuations were measured in the tests as a functions of the flow velocity. The application of different non-intrusive measurement techniques was possible due to relatively simple test model construction which may be used for cross-validation and experimental uncertainty quantification.

Flow-structure interaction, caused by synchronization effect of the flow separation frequency (or its spectral components) and eigenfrequency of cylinder, was analyzed based on simultaneously measured data. The tests performed gave the information about dynamical characteristics of the flow and vibration parameters of cantilevered cylinders. The experimental results are used for identification of required accuracy of hydrodynamic forces calculation by *CFD* and validation of one- and two-way linked methods for flow excitation frequency calculation.

**Keywords:** validation, vibration, *PIV*, *LDV*, laser vibration meter, eigenfrequency.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

---

### Адрес для переписки:

А.В. Логинов  
Опытное конструкторское бюро машиностроения  
имени И.И. Африкантова,  
Бурнаковский проезд, 15, г. Нижний Новгород 603074, Россия  
e-mail: loginoff.86@gmail.com

### Address for correspondence:

A.V. Loginov  
Afrikantov OKB Mechanical Engineering,  
Burnakovsky proezd, 15, Nizhny Novgorod 603074, Russia  
e-mail: loginoff.86@gmail.com

---

### Для цитирования:

А.В. Будников, Е.И. Шмелев, Д.А. Куликов, А.В. Логинов, С.М. Дмитриев,  
Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, А.С. Суворов, А.В. Стуленков  
Измерения гидродинамических и вибрационных характеристик  
для валидации численных расчетов возбуждения конструкций  
поток жидкости.  
Приборы и методы измерений.  
2019. – Т. 10, № 3. – С. 223–232.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

### For citation:

A.V. Budnikov, E.I. Shmelev, D.A. Kulikov, A.V. Loginov, S.M. Dmitriev,  
N.A. Pribaturin, P.D. Lobanov, A.S. Suvorov, A.V. Stulenkov  
[Measurements of the Hydrodynamic and Vibrational Characteristics  
to Validate Numerical Calculations of the Structure Excitation  
by Fluid Flow].  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2019, vol. 10, no. 3, pp. 223–232 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-3-223-232

## Введение

Гидродинамические силы, возникающие при обтекании потоком теплоносителя поверхностей конструкций, приводят к вибрации конструкций. Вибрационные нагрузки, возбуждаемые потоком теплоносителя, сопровождаются такими проблемами, как фреттинг-износ, усталостное нагружение  $U$ -трубок парогенераторов и теплообменного оборудования. В ряде случаев подобные нагрузки, неблагоприятно сказываясь на прочности и усталостной долговечности конструкции, в конечном счете, могут привести к ее разрушению. Как правило, случаи разрушения конструкций подробно анализируются и описываются, см., например, [1–3].

Оценки виброн нагружения конструкций потоком теплоносителя могут быть выполнены путем решения связанной трехмерной задачи гидродинамики и динамики конструкции. Применение связанных вычислений позволяет на качественно новом уровне оптимизировать на этапе проектирования конструкцию для обеспечения улучшенных ресурсных характеристик элементов оборудования. Связанные вычисления для анализа вибрации обладают рядом специфических требований к гидродинамическому расчету. В частности, гидродинамический (CFD) расчет должен разрешать силы, действующие не только на гидродинамической частоте, но и силы на собственной частоте конструкции. Кроме того, в случае больших перемещений конструкции под действием потока (возникающих, например, при синхронизации) моделирование гидродинамики должно учитывать данные перемещения путем решения двусторонне связанной задачи гидродинамики потока и колебаний конструкции. Сложность вычислений определяется проблемой разделения пульсаций гидродинамической силы от численных ошибок в расчетах и физической неустойчивости, обусловленных характером течения. В этой связи разработка рекомендаций по проведению связанных расчетов представляется актуальной задачей.

Важным этапом решения связанной задачи является этап валидации результатов численного расчета по экспериментальным данным. Для экспериментальной проверки взаимного влияния процессов обтекания и процессов колебания тела должны быть предусмотрены соответствующие методы контроля. Следует отметить, что экспе-

риментальным и теоретическим исследованиям вибраций плохообтекаемых тел, возбуждаемых потоком, посвящено достаточно много работ. Подробный обзор данной проблематики приводится, например, в монографиях [4–7]. При этом информация о результатах совместных измерений вибрации и гидродинамических параметров потока, которые можно было бы использовать для валидации численных расчетов трубных пучков, крайне ограничена.

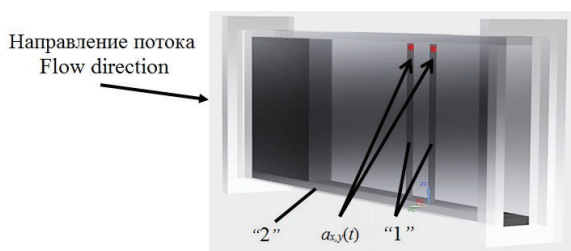
Следует отметить работу [8], в которой исследуется возбуждение цилиндров при поперечном обтекании потоком для валидации метода расчета гидроупругого взаимодействия. Авторы приводят результаты измерений как гидродинамики потока, так и перемещения для одного из цилиндров. При данных испытаниях исследуемый цилиндр был жестким и имел подвижное закрепление. Перемещения цилиндра оценивались на основе показаний тензорезисторов, установленных в районе заделки. Подобный подход делает затруднительным валидацию изгибных форм колебаний конструкции.

В работе [9] акцент делается на исследованиях гидродинамики течения в трубном пучке различными методами: *PIV* – *Particle Image Velocimetry* (анемометрия по изображениям частиц); *LDV* – *Laser Doppler Velocimetry* (лазерная доплеровская анемометрия) и другими. Измерения вибрации при данных испытаниях не проводились. С учетом перечисленных факторов, представляется актуальной задача одновременного получения экспериментальных данных, содержащих спектральные характеристики вибрации и гидродинамики потока для плохообтекаемых конструкций.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований возбуждения вертикальных металлических стержней поперечным потоком воды для случая консольного закрепления стержней. Спецификой выполненных исследований является одновременное измерение динамических характеристик потока и параметров, характеризующих вибрацию. Относительно простая конструкция экспериментальной модели позволила использовать набор бесконтактных систем измерений полей параметров, что обеспечило представительность полученных экспериментальных данных для валидации программ трехмерного расчета гидродинамики и вибрации.

## Описание стенда и исследуемой модели

Для валидации связанных расчетов гидродинамики и вибрации рассматривается модель, состоящая из двух последовательно установленных цилиндров в поперечном потоке рабочей среды (рисунок 1). Два цилиндра в поперечном потоке являются простейшим вариантом для описания течения в трубном пучке, который широко исследуется на протяжении последних десятилетий (один из последних обзоров приведен в работе [10]).



**Рисунок 1** – 3D модель канала с цилиндрами в поперечном потоке. Расположение точек измерений вибрации

**Figure 1** – 3D model of the channel with two in-line cylinders in the cross flow. Locations of vibration measurements

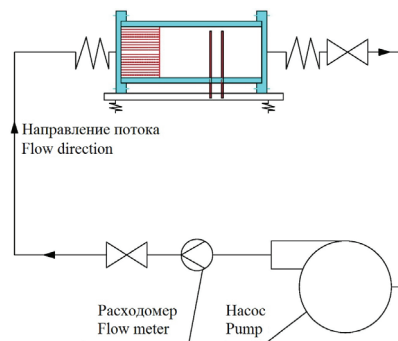
Основным гидродинамическим процессом при поперечном обтекании цилиндра является дорожка Кармана, характеризующаяся частотой срыва вихрей с поверхности цилиндров  $f_s$ . Процесс обтекания сопровождается возбуждением конструкции на частоте срыва  $f_s$ , а также на ее собственных частотах  $f_n$ . Основные размеры модели и ее жесткостные характеристики выбраны таким образом, чтобы появилась возможность исследовать режимы течения как до синхронизации частоты срыва (или ее гармоник) с собственной частотой конструкции, так и режим с синхронизацией.

Цилиндры «1» в модели имеют консольное закрепление и располагаются соосно. Модель цилиндра отличается от моделей, приведенных в [10], где рассматриваются модели жестких цилиндров. Консольное закрепление цилиндра по отношению к жесткому варианту позволяет снизить значение собственной частоты  $f_n$ , что делает возможным исследовать пульсации скорости лазерными методами в частотном диапазоне в области  $f_n$ .

Длина цилиндров равна 200 мм. Расстояние между цилиндрами составляет порядка  $6d$  (где

$d$  – диаметр цилиндра). Рассматриваемые цилиндры выполнены из металлической тонкостенной трубки. Цилиндры «1» размещаются в прямоугольном канале «2» (рисунок 1) циркуляционной трассы стенда, через которую организован поток рабочей среды (вода при комнатной температуре). Нижняя стенка канала выполнена из стали, а верхняя и боковые стенки канала – из оргстекла. В канале испытываемые цилиндры жестко закреплены снизу, а верхний конец цилиндров свободен. Канал спроектирован таким образом, что его собственные частоты были намного выше, чем первые собственные частоты цилиндров. В целом, конструкция канала с плохообтекаемыми телами оптимизирована для последующего расчетного моделирования гидродинамических и механических процессов.

Принципиальная схема стенда изображена на рисунке 2. Изменение скорости потока на входе в канал в диапазоне от 0,3 до 2 м/с обеспечивается за счет изменения частоты вращения насоса. Число Рейнольдса  $Re$ , вычисленное исходя из диаметра цилиндров и скорости потока на входе в канал, варьируется от  $10^3$  до  $10^4$ . В ходе экспериментов измеряются значения статического давления и температуры с погрешностями  $\pm 0,006$  кгс/см<sup>2</sup> и  $\pm 0,25$  °С соответственно.



**Рисунок 2** – Принципиальная схема стенда

**Figure 2** – The schematic diagram of the test facility

## Системы измерений

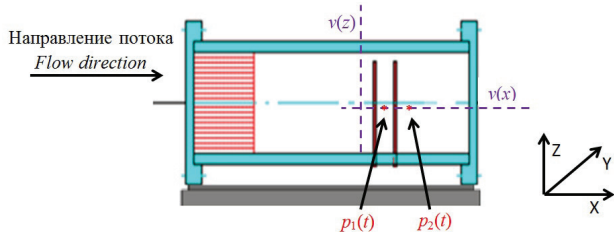
Различные системы измерений пульсаций скорости и давления, а также измерений вибрации используются для исследования нестационарных параметров потока и колебаний цилиндров.

Во внутренних полостях цилиндров расположены миниатюрные акселерометры, применяемые для измерения вибрации тела. Акселерометры располагаются в верхней части



цилиндров и позволяют измерять виброускорение  $a_{x,y}(t)$  в двух взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок 1). Как следствие, обеспечена возможность одновременных измерений колебаний цилиндров и нестационарных полей скорости вблизи тел. В процессе измерений контролируется уровень вибрации канала.

Исследования гидродинамики течения осуществляются *PIV* методом. Применяются системы на основе импульсного лазера *LaVision* с лазером *NANO L PIV 135-15*, а также непрерывного лазера *DTL-413* с высокоскоростной камерой *Fastec HiSpec 5*. В качестве частиц-трассеров используются полиамидные частички размером 10–30 мкм. Измерения скорости осуществляются в вертикальной  $v(z)$  и горизонтальной  $v(x)$  плоскостях перед первым и вторым цилиндрами, а также после второго цилиндра. Работоспособность метода *PIV* в условиях описанной модели подтверждена путем дублирования измерений скорости методом *LDV*. Для проведения исследований использована лазерная доплеровская измерительная система ЛАД-05 производства ИТ СО РАН. Помимо *PIV* и *LDV* измерений скорости измеряются пульсации давления  $p_{1,2}(t)$  с использованием датчика *PCB 106B52* на стенке канала по высоте в среднем сечении. На рисунке 3 изображены точки измерений пульсаций скорости и давления.



**Рисунок 3** – Расположение точек измерения пульсаций скорости и давления

**Figure 3** – Locations of velocity and pressure pulsations measurements

Тестирование работоспособности датчиков вибрации и пульсаций давления выполнено путем дублирования измерений с помощью сканирующего трехкомпонентного лазерного виброметра и гидрофонов 8103 *B&K* соответственно в условиях синхронизации съема информации используемыми системами. Это обеспечило возможность кроссвалидации и оценки неопределенностей получаемых экспериментальных данных.

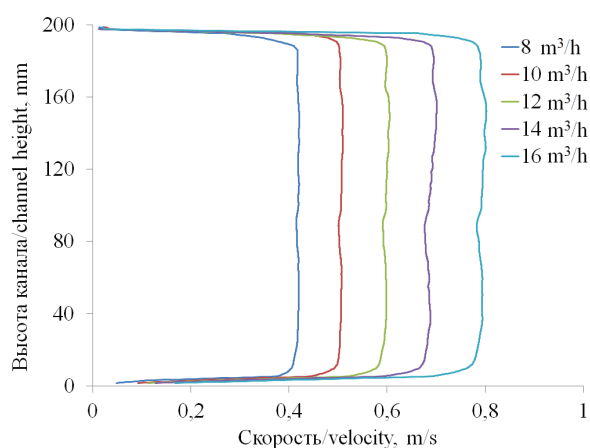
## Результаты измерений

Измерения проведены для различных скоростей потока. По временной реализации измеренных параметров вычислена спектральная плотность мощности (далее спектр).

### Определение граничных и начальных условий

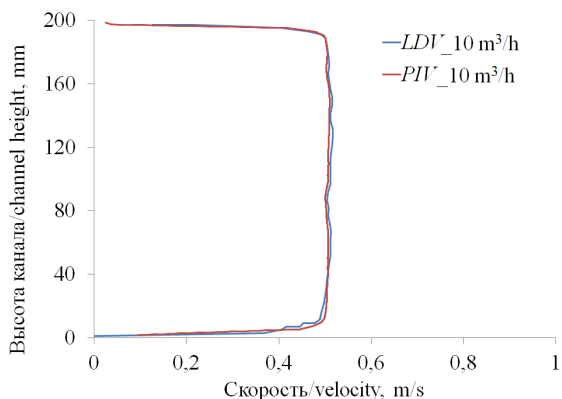
Определение граничных и начальных условий является необходимым этапом проведения испытаний, способным существенным образом повлиять на точность валидации нестационарных процессов в дальнейшем.

С точки зрения моделирования гидродинамических процессов важным аспектом является измерение фактического профиля скорости на входе в канал. Измерения выполнены *PIV* методом с использованием импульсного лазера. На рисунке 4 приводятся профили скорости в вертикальном сечении перед цилиндрами для различных расходов рабочей жидкости. Как следует из рисунка, профиль потока практически по всей высоте канала достаточно близок к равномерному при скоростях до 0,8 м/с. Наблюдаемые отклонения вблизи стенки отчасти связаны с ограничениями *PIV* метода при визуализации потока в пристеночном слое. Корректность полученных данных подтверждается профилями скорости, полученными при помощи метода *LDV*. Сравнение профилей скорости, полученных разными методами, приведено на рисунке 5.



**Рисунок 4** – Профили скорости в вертикальном сечении перед первым цилиндром, полученные *PIV* методом

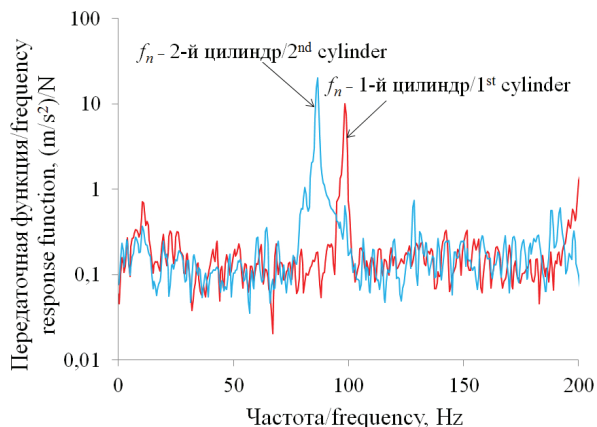
**Figure 4** – The velocity profiles in the vertical section before the 1<sup>st</sup> cylinder



**Рисунок 5** – Профили скорости в вертикальном сечении перед первым цилиндром, полученные методами *PIV* и *LDV*

**Figure 5** – The velocity profiles in the vertical section before the 1<sup>st</sup> cylinder measured by *PIV* and *LDV* methods

Для учета условий установки цилиндров в канал выполнен анализ виброотклика цилиндров при искусственном ударном возбуждении корпуса модели. Такие параметры как демпфирование в системе, жесткость закрепления цилиндров в канале являются определяющими при разработке структурной модели и способны повлиять на значение собственной частоты и амплитуды колебаний цилиндров. Данные параметры в процессе испытаний вычислены на базе измерений передаточных функций отклика конструкции на точечное искусственное возбуждение. На рисунке 6 приводится спектр передаточной функции виброотклика цилиндров в канале с водой. Значение первой собственной частоты первого и второго цилиндров составило 98 и 88 Гц соответственно. Коэффициент демпфирования цилиндров составил  $\eta = 0,01$ , присоединенная масса для цилиндров равна 1,1.

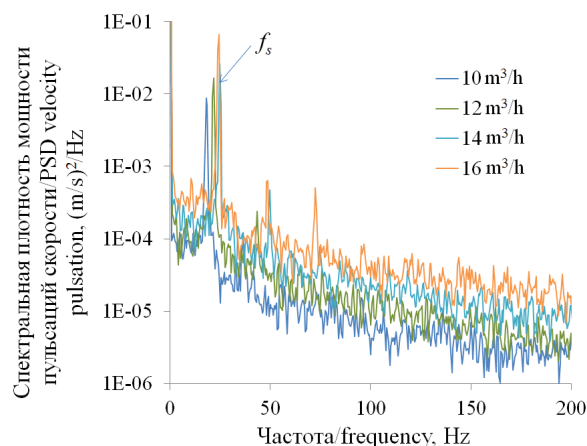


**Рисунок 6** – Передаточная функция виброотклика цилиндров при искусственном возбуждении корпуса модели

**Figure 6** – Frequency response function for the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> cylinders under the impact excitation of the channel

### Измерение гидродинамических характеристик потока

*LDV* метод дает возможность определить помимо усредненного поля скорости также и временные зависимости. На рисунке 7 приводятся графики со спектрами пульсаций скорости в непосредственной близости от цилиндров. Можно отметить, что значения срывной частоты, полученные экспериментальным способом, хорошо коррелируют с аналитическим решением. В частности, при расходе  $8 \text{ м}^3/\text{ч}$  аналитическое значение  $f_s = 14,4 \text{ Гц}$  при  $St = 0,2$ , при этом по спектрам для первого цилиндра  $f_s = 15 \text{ Гц}$ . Для второго цилиндра срывная частота не так явно выделяется на фоне непрерывной части спектра. В целом, увеличение скорости сопровождается пропорциональным увеличением частоты срыва, а также увеличением амплитуды пульсаций скорости.



**Рисунок 7** – Спектры пульсаций скорости для различных расходов между цилиндрами

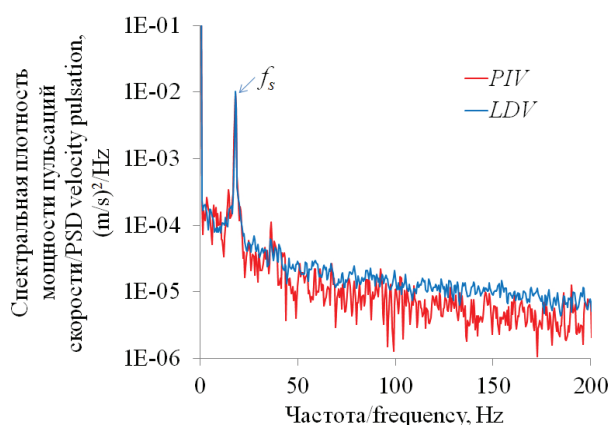
**Figure 7** – The velocity pulsation spectra for the different flow rates after the first cylinder

Пульсационная составляющая скорости также может быть оценена *PIV* методом на базе непрерывного лазера. Данный метод является аналогом высокочастотных *PIV* систем на базе импульсного лазера. На одном из режимов проведено сравнение измерения спектра пульсации скорости вблизи первого цилиндра методами *PIV* и *LDV* (рисунок 8). Отличие амплитуды на срывной частоте составило менее 10 %.

Следует отметить, что течения в диапазоне  $8\text{--}14 \text{ м}^3/\text{ч}$  являются режимами до синхронизации. По мере приближения срывной частоты или ее гармоник к собственной частоте кон-

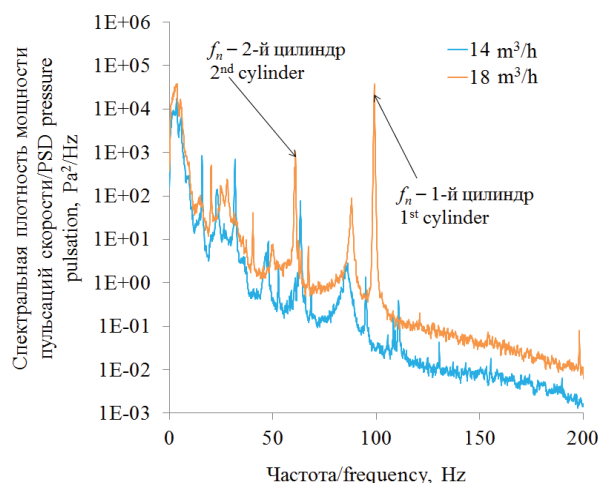
струкции наблюдается эффект синхронизации. Синхронизация сопровождается резким увеличением уровней вибрации, изменением спектрального состава сил, а также взаимной подстройкой частоты срыва и собственной частоты [4, 9].

Для первого цилиндра при поперечном обтекании синхронизация обусловлена совпадением гармоники частоты срыва с собственной частотой и наблюдается при расходе  $16 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Взаимная подстройка частоты срыва и собственной частоты достигает 1 Гц. При этом увеличение скорости не сопровождается увеличением частоты срыва, характерным в режимах до синхронизации. В режиме синхронизации в спектре пульсаций давления (рисунок 9) появляется пик на частоте, равной собственной частоте цилиндра, и гармонический ряд, связанный с данным процессом. В спектрах пульсаций скорости, полученных с помощью методов *PIV* и *LDV*, также можно идентифицировать собственную частоту цилиндра. В свою очередь в диапазоне расхода до  $20 \text{ м}^3/\text{ч}$  перевести второй цилиндр в режим синхронизации не удалось. Применение различных систем позволило детально исследовать механизм возникновения синхронизации. Следует отметить, что метод *LDV* имеет большую чувствительность при регистрации пульсаций скорости по сравнению с *PIV* методом. Это позволяет, используя *LDV* метод, идентифицировать в спектрах пульсаций скорости собственную частоту даже на режимах до синхронизации.



**Рисунок 8** – Спектры пульсаций скорости, полученные методами *PIV* и *LDV*

**Figure 8** – Pressure pulsation spectra measured by *PIV* and *LDV* methods



**Рисунок 9** – Спектры пульсации давления для расходов  $14 \text{ м}^3/\text{ч}$  (до режима синхронизации) и  $18 \text{ м}^3/\text{ч}$  (в режиме синхронизации)

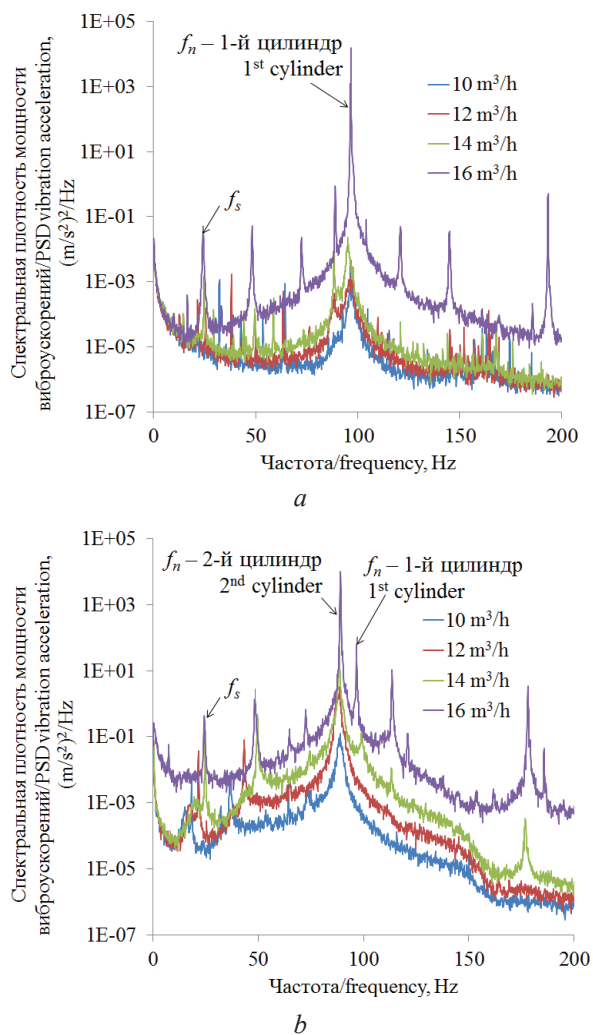
**Figure 9** – Pressure pulsation spectra for the  $14 \text{ м}^3/\text{ч}$  (before lock-in) and  $18 \text{ м}^3/\text{ч}$  (the lock-in mode) flow rates

#### Измерение вибрационных характеристик цилиндров

Измерения вибрационных характеристик цилиндров, возбуждаемых потоком, выполнено синхронно с измерением гидродинамических характеристик. В качестве примера на рисунке 10 приведены узкополосные спектры виброускорений цилиндров для продольного направления в зависимости от расхода рабочей среды. На спектрах можно выделить на фоне широкополосной части частоты срыва  $f_s$  и собственные частоты  $f_n$  цилиндров. Данные характеристики получены с использованием акселерометров. Погрешность измерений в диапазоне частот от 5 до 200 Гц не превышала 20 %.

Для более детального анализа рассматриваются зависимости вибрации от расхода рабочей среды на срывной частоте и собственной частоте цилиндров. Здесь амплитуда вибрации определена с учетом колебаний цилиндров как в поперечном, так и продольном направлениях. Соответствующие зависимости приводятся на рисунке 11. Как следует из графиков, по мере увеличения расхода амплитуда вибрации на срывной и собственных частотах увеличивается. Данные зависимости целесообразно использовать для количественного сравнения численных значений и результатов измерений. Следует отметить, что по мере увеличения скорости также меняется коэффициент демпфирования в системе [11, 12]. В режиме до синхронизации существенного вли-

яния скорости потока на коэффициент демпфирования  $\eta$  не выявлено. В свою очередь, режим синхронизации сопровождается существенным уменьшением демпфирования в системе до 0,002.

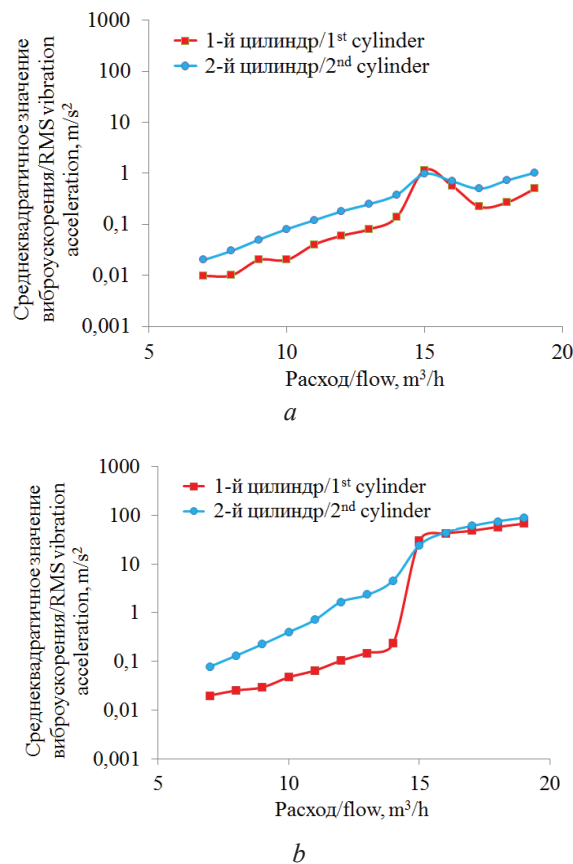


**Рисунок 10** – Спектры виброускорений для 1-го (a) и 2-го (b) цилиндров в продольном направлении в зависимости от расхода рабочей среды

**Figure 10** – Vibration acceleration level spectra for the 1<sup>st</sup> (a) and 2<sup>nd</sup> (b) cylinders for the different flow rates for the transverse direction

На рисунке 12 приведены спектры виброускорений, полученные с помощью лазерного виброметра и акселерометров на одном из режимов течения. Разница по результатам измерений вибрации не превышает 40 % на частоте срыва и собственной частоте цилиндров. В частотном диапазоне ниже 10 Гц при измерениях лазерным виброметром установлен ВЧ фильтр. Необходимо отметить, что гидродинамическая сила, возбуждающая цилиндры и обусловленная срывом вихрей, имеет квазислучайную природу.

Измерение такого рода сигналов лазерным виброметром требовало усреднения большого числа выборок для минимизации влияния всплесков, вызванных остаточными пузырьками воздуха и примесями в воде. С учетом погрешностей измерений наблюдаемые отличия вычислений виброускорений свидетельствует о достаточно хорошей сходимости экспериментальных данных. Синхронность измерений обеспечена за счет внешнего триггера.

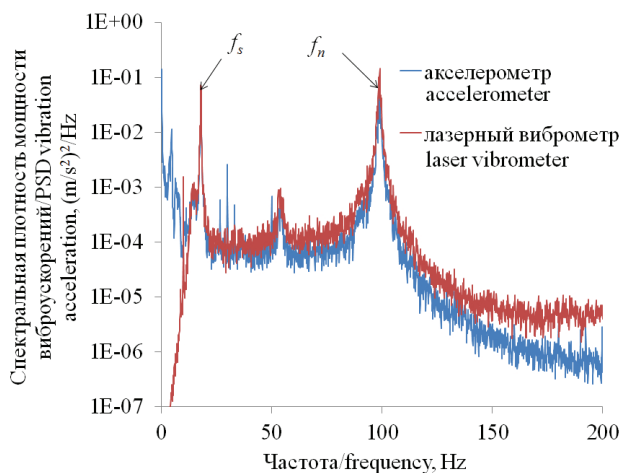


**Рисунок 11** – Зависимости вибрации от расхода на срывной (a) и собственной частотах (b) цилиндров

**Figure 11** – Cylinders vibration acceleration as a function of the flow rate at the shedding frequency (a) and the natural frequency (b)

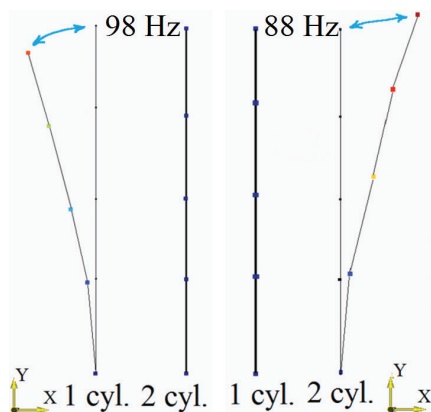
Сканирующий лазерный виброметр позволил измерить через воду вибрацию цилиндров в нескольких точках по высоте. Это позволило оценить форму колебания цилиндров под действием потока на частоте срыва и собственной частоте. Форма колебаний цилиндров имеет преимущественно изгибный характер по отношению к точке закрепления. На рисунке 13 изображены формы колебаний цилиндров для собственной частоты.





**Рисунок 12** – Спектры виброускорений цилиндра, полученные с помощью лазерного виброметра и акселерометров

**Figure 12** – Vibration acceleration spectra obtained by a laser vibrometer and accelerometers



**Рисунок 13** – Формы колебаний цилиндров на собственной частоте под действием потока

**Figure 13** – Shape of cylinders oscillations at the natural frequency induced by the flow

Полученную информацию о динамических характеристиках цилиндров, возбуждаемых потоком, в дальнейшем планируется использовать для валидации связанных численных расчетов колебаний конструкции на гидродинамическое возбуждение.

## Заключение

Представлены результаты применения различных систем измерения для определения взаимного влияния нестационарных гидродинамических сил и вызванных этими силами колебаний конструкции. Используется эксперименталь-

ная модель, состоящая из двух последовательно установленных цилиндров в поперечном потоке рабочей среды.

В процессе испытаний выполнены измерения уровней вибрации цилиндров и пульсаций давления в зависимости от скорости потока. Конструкция рассматриваемой модели позволила применить различные бесконтактные системы измерений нестационарных процессов для кросс-валидации получаемых экспериментальных данных и для оценки неопределенностей.

Впервые получены экспериментальные данные о взаимном влиянии гидродинамики потока и динамики конструкции, обусловленные эффектом синхронизации между частотой срыва (или ее гармониками) и собственной частотой, для случая консольного закрепления цилиндров.

Отличие амплитуды пульсаций скорости на срывной частоте, измеренной методом анемометрии по изображениям частиц и методом лазерной доплеровской анемометрии, составило менее 10 %. Синхронные измерения вибрации акселерометрами и лазерным виброметром показали, что точность измерений вибрации составляет 40 %.

Полученные экспериментальные данные в дальнейшем планируется использовать для определения требований к точности проведения численных расчетов гидродинамических сил и для валидации одно- и двусторонне связанных методов численного расчета возбуждений конструкций потоком.

## References

1. Pettigrew M., Taylor C., Fisher N., Yetisir M., Smith B.A.W. Flow-induced vibration: recent findings and open questions. *Nuclear Engineering and Design*, 1998, vol. 185, pp. 249–276. DOI: 10.1016/S0029-5493(98)00238-6
2. Shin Y.S., Wambsganss M.W. Flow-induced vibration in Imfbr steam generators: a state-of-the-art review. *Nuclear Engineering and Design*, 1977, vol. 40, iss. 2, pp. 235–284. DOI: 10.1016/0029-5493(77)90038-3
3. Paidoussis M. Real-life experiences with flow-induced vibration. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, vol. 22, iss. 6–7, pp. 741–755. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2006.04.002
4. Kaneko S., Nakamura T., Inada F. Flow-Induced Vibrations Classifications and Lessons from Practical Experiences. Elsevier, *Second Edition*, 2014, 410 p.
5. Paidoussis M.P. Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. *Academic press*, 1998, vol. 1, 572 p.

6. Paidoussis M.P. Fluid-structure interactions: slender structure interactions and axial flow. Academic press, 2004, vol. 2, 888 p.

7. Devnin S.I. Fluid elasticity of structures in the detached flow. Sudostroenie, St. Petersburg, Russia, 1975, 184 p.

8. Shinde V. Fluidelastic instability in heat exchanger tube arrays and a Galerkin-free model reduction of multiphysics systems. *Engineering Sciences (physics). Ecole Polytechnique*, 2015, 207 p.

**DOI:** 10.13140/RG.2.1.2349.5761

9. William J., Fichet V., Goreaud N. Advanced comparison of CFD Fluent code with experimental data on a transverse flow across rod bundle using LDV,

PIV, Optical Flow and POD, 23 Congrès Français de Mécanique, Lille, 2017, 24 p.

10. Sumner D. Two circular cylinders in cross-flow: A review. *Journal of Fluids and Structures*, 2010, vol. 26, iss. 6, pp. 849–899.

**DOI:** 10.1016/j.jfluidstructs.2010.07.001

11. Chen S.S., Jendrzeczyk J.A. Flow velocity dependence of damping in tube arrays subjected to liquid cross flow. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1981, vol 103, pp. 130–135. **DOI:** 10.1115/1.3263377

12. Pettigrew M.J., Rogers R.J., Axisa F. Damping of Heat Exchanger Tubes in Liquids: Review and Design Guidelines. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2011, vol. 133, iss. 1, 014002, pages 11. **DOI:** 10.1115/1.4000711