

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Демченко Ярослав Владиславович

**Крутильные аэроупругие колебания цилиндра в
газовом потоке**

Специальность 1.1.9.Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Диссертация подготовлена на кафедре гидромеханики механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Научные руководители: **Веденеев Василий Владимирович**,
доктор физико–математических наук,
профессор
Иванов Олег Олегович,
кандидат физико–математических наук

Официальные оппоненты: **Рябинин Анатолий Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Санкт-Петербургский государственный
университет, кафедра гидроаэромеханики
профессор
Щеглов Георгий Александрович,
доктор технических наук, профессор,
Московский государственный
технический университет имени
Н.Э. Баумана, кафедра
«Аэрокосмические системы», профессор
Коломенский Дмитрий Сергеевич,
кандидат технических наук,
Сколковский институт науки и технологий,
Центр технологий материалов,
старший преподаватель

Защита состоится 10 июня 2026 года в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.011.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119192, Москва, Мичуринский проспект, д. 1, НИИ механики МГУ, кинозал.

Email: vasiliy_ksnk@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3904>.

Автореферат разослан «___» мая 2026 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико–математических наук

В.В. Косьянчук

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Явление аэроупругих колебаний различных тел хорошо известно и изучается многими авторами по всему миру. Его можно наблюдать в авиационной технике, различных объектах гражданской инфраструктуры, включая здания, мостовые сооружения и т. д. Колебания могут достигать значительных амплитуд, что способно привести к усталостным повреждениям и даже к разрушению конструкции. В силу развития авиации и гражданских объектов задача предотвращения аэроупругих колебаний остаётся востребованной и актуальной.

В последние десятилетия всё более актуальными становятся работы по созданию новых типов ветрогенераторов, в том числе основанных на явлении резонансных аэроупругих колебаний цилиндра, известных в зарубежной литературе как *vortex-induced vibrations*. Такие колебания вызваны формированием дорожки Кармана, которая образуется позади плохо обтекаемых тел при обтекании их поперечным потоком газа или жидкости. Существенное увеличение амплитуд колебаний наблюдается в относительно узком диапазоне скоростей, начало которого обычно соответствует сближению частоты схода вихрей и собственной частоты колебаний тела.

Актуальность подобных исследований обусловлена возможностью использования такого типа ветрогенераторов в труднодоступных регионах — в зонах Крайнего Севера и пустынь, где эксплуатация традиционных роторных ветряков из-за наличия подшипников и трущихся частей затруднена. Поскольку извлечение энергии приводит к дополнительному «эффективному» демпфированию в колебательной системе, возникает важная задача повышения интенсивности колебаний, что может быть достигнуто за счёт увеличения их амплитуды и частоты. Кроме того, расширение диапазона скоростей набегающего потока, в котором цилиндр совершает колебания, также может существенно увеличить эффективность ветроэнергетической установки при эксплуатации ветрогенератора.

В диссертации экспериментально изучается ранее не исследованный тип колебаний, впервые открытый в настоящей работе. При этом наблюдается трёхмерная синхронизация вихрей, сходящих в разных поперечных сечениях цилиндра, колеблющихся с разной амплитудой. Данный тип ветрогенератора прост по своей конструкции и состоит из цилиндра, закреплённого

на упругой балке поперек набегающего потока. Изучаемый тип колебаний, по сравнению с классическим режимом двумерных колебаний, позволяет ветрогенератору работать в более широком диапазоне скоростей набегающего потока, а также колебаться с большей собственной частотой и амплитудой.

Цель и задачи работы

Целью работы является всестороннее исследование открытого типа автоколебаний. Для её достижения были поставлены **следующие задачи**:

1. Теоретически исследовать систему, состоящую из круглого цилиндра конечного размаха, закрепленного на консольной балке. Вывести уравнение поперечных и крутильных колебаний цилиндра для расчета собственных частот.
2. Экспериментально подтвердить существование, помимо классических поперечных колебаний, крутильного типа колебаний. Выявить диапазон безразмерных скоростей потока, в котором существуют развитые автоколебания, определить их амплитуды.
3. Выявить характер схода вихрей в режиме крутильных колебаний. Изучить характер дорожек Кармана, сходящих в симметричных сечениях цилиндра относительно оси вращения цилиндра.
4. Исследовать структуру вихревого следа вдоль размаха цилиндра и её изменение при различных концевых условиях в режиме крутильных колебаний.
5. Исследовать влияние длины цилиндра на амплитуду крутильных колебаний.

Новизна работы

Явление аэроупругих колебаний различных тел активно исследуется в области извлечения энергии и разработки новых типов ветрогенераторов. В частности, оно рассматривалось в исследованиях по извлечению энергии из колебаний, где использовался ветрогенератор, представляющий собой круглый цилиндр, закреплённый на упругой балке. В определённом диапазоне скоростей потока возбуждаются поперечные двумерные колебания, из которых извлекается электрическая энергия (рис. 1а). Обычно для это-

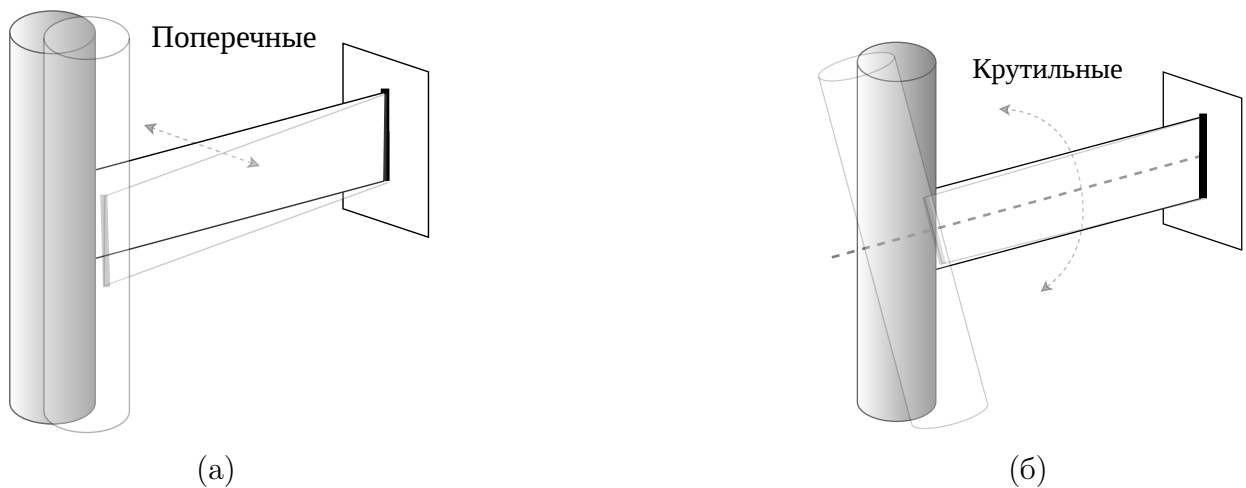


Рис. 1: Два типа колебаний: (а) поперечный и (б) крутильный.

го использовался пьезоэлектрический элемент для преобразования энергии деформации в электрическую.

В диссертации рассмотрен ранее не встречавшийся в литературе тип колебаний, вызванный сходом вихрей. Он обусловлен резонансом аэродинамических сил с крутильными колебаниями цилиндра, при которых балка, играющая роль упругого закрепления, испытывает крутильную деформацию (рис. 1б). Экспериментально получен диапазон безразмерных скоростей потока, в котором существуют развитые автоколебания, и определены их амплитуды.

Отличительной особенностью данного режима является нетипичное формирование вихрей, сходящих с цилиндра. Оказалось, что вихревые дорожки Кармана, генерируемые верхней и нижней частями цилиндра, сходят в противофазе, т. е. сдвинуты по фазе на π . Также в рамках изучения нового типа аэроупругих колебаний исследовалась структура вихревого следа вдоль размаха цилиндра и её изменение при различных концевых условиях. Исследовано влияние длины цилиндра на амплитуду крутильных колебаний.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическое значение заключается в обнаружении и исследовании синхронизации вихревой дорожки Кармана при трёхмерном движении цилиндра, при которой возникает переменный во времени крутящий момент, возбуждающий крутильные колебания. Это может быть использовано для разработки новых экологически чистых источников энергии, актуальных для

труднодоступных регионов, условий пустынь и Арктики.

Обнаруженный новый тип аэроупругих колебаний позволит расширить область применения рассматриваемого типа ветрогенератора на больший диапазон скоростей набегающего потока с более интенсивными колебаниями — большими амплитудами и частотами по сравнению с классическими поперечными колебаниями.

Положения, выносимые на защиту

1. Наряду с поперечным типом автоколебаний цилиндра, вызванных сходом вихрей, существует крутильный тип колебаний, определяемый вращательной частотой системы «упругая балка + цилиндр». Для определенных параметров системы возможно пересечение соответствующих диапазонов захвата частоты и появление смешанного типа колебаний.
2. В режиме крутильных колебаний вихревые дорожки Кармана, генерируемые верхней и нижней частями цилиндра, сходят в противофазе. Фаза схода вихрей скачком меняется вблизи закрепления балки, которая ведёт себя как разделительная пластина, предотвращающая образование вихрей в сечениях вблизи оси вращения цилиндра.
3. Характер схода вихрей по размаху цилиндра существенно неоднороден. Применение присоединённых и отсоединённых аэродинамических шайб круглой формы приводит к ощутимому, но неполному выравниванию фазы схода вихрей вдоль цилиндра.
4. Концевые насадки оказывают различное влияние на распределение фазы схода вихрей в зависимости от типа колебаний: в режиме поперечных колебаний они умеренно сглаживают неоднородность распределения, а в режиме крутильных колебаний их влияние резко усиливается, обеспечивая практически синхронный сход вихрей вдоль верхней и нижней половин цилиндра.
5. Зависимость максимальной амплитуды крутильных колебаний от длины цилиндра немонотонна и имеет локальный минимум.

Методология и методы исследования

Для исследования колебаний цилиндра, закреплённого на упругой балке, использовались проверенные экспериментальные методы. Экспериментальная модель цилиндра помещалась в открытую рабочую часть аэродинами-

ческой трубы с камерой Эйфеля.

Для измерений скорости набегающего потока применялся термоанемометр, показания которого были предварительно откалиброваны с помощью термоанемометрической системы DISA 55DO5 с одноточечным датчиком 55P8. Эта система также использовалась для измерения пульсаций скорости в следе за цилиндром.

Количественное описание колебаний производилось с помощью триангуляционного лазерного датчика высокой точности. Для определения собственной частоты и коэффициента демпфирования свободных колебаний цилиндра без потока применялся метод затухающих колебаний.

Степень разработанности темы

Двумерные поперечные колебания упруго подвешенного или закреплённого цилиндра детально исследованы в литературе: Griffin (1985); Williamson and Roshko (1988); Brika and Laneville (1993); Khalak and Williamson (1996, 1999); Zhou et al. (1999); Jauvtis and Williamson (2004); Sarpkaya (2004). В частности, задача о колебаниях цилиндра, закреплённого на конце упругой балки, экспериментально исследовалась в нескольких работах зарубежных авторов: Dai et al. (2014), Azadeh-Ranjbar et al. (2018), Adhikari et al. (2020), и Zhang et al. (2021).

Azadeh-Ranjbar et al. (2018) исследовали влияние длины цилиндра на амплитуду колебаний, вызванных сходом вихрей. Им удалось показать, что при уменьшении длины цилиндра амплитуда увеличивается, а диапазон амплитудного отклика смещается в сторону более высоких скоростей. Кроме того, авторы провели визуализацию течения в следе за цилиндром на различных высотах вдоль размаха цилиндра — она показала неоднородный характер схода вихрей вдоль его поверхности.

Morse, Govardhan and Williamson (2008) изучили влияние концевых условий на колебания цилиндра. Они предположили негативное воздействие концевого эффекта на амплитудную характеристику колебаний, вызванных сходом вихрей, но выяснили, что без аэродинамической шайбы амплитуда колебаний выше и колебания устойчивее во всём диапазоне.

Bourguet and Mathis (2023) изучили влияние концевых условий (плоский/полусферический торец либо торец с аэродинамической шайбой) и трёх степеней турбулентности потока (ламинарное течение и два турбулентных режима, генерируемых сеткой) на поперечные колебания круглого

цилиндра, вызванные сходом вихрей. Авторы выявили воздействие конечных условий на число Струхала неподвижного цилиндра и положение кривой амплитудного отклика колебаний. Также им выявлен более регулярный характер колебаний при свободном торце (по сравнению с вариантом с аэродинамической шайбой).

Ни в одной работе не наблюдалось возбуждение иного типа колебаний, вызванных сходом вихрей с соответствующим диапазоном захвата частоты, помимо классических поперечных колебаний. В связи с этим все представленные в работе результаты являются новыми.

Достоверность и апробация работы

Высокая достоверность результатов работы обеспечена за счёт комплексного подхода: применения классических методов аэрофизических исследований, строгой калибровки измерительного оборудования, использования апробированных экспериментальных методик, а также подтверждения полученных данных путём сопоставления с результатами аналогичных работ других специалистов по аэроупругости.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных семинарах и международных и всероссийских научных конференциях: Семинар по механике сплошных сред имени А.Г. Куликовского и А.А. Бармина под руководством В.П. Карликова, А.Н. Осипцова, А.А. Афанасьева и Н.В. Никитина; Семинар кафедры газовой и волновой динамики под руководством Р.И. Нигматулина, Н.Н. Смирнова, А.В. Звягина; Научный семинар имени С.М. Белоцерковского под руководством В. В. Вышинского, А. В. Головнева, М. А. Киселёва, Г. А. Щеглова; Всероссийская конференция молодых учёных-механиков YSM (Сочи – 2023, 2024, 2025); Ломоносовские чтения (Москва – 2023, 2024, 2025); Конференция-конкурс молодых ученых НИИ механики МГУ (Москва – 2024, 2025); Конференция Ломоносов (Москва, виртуально – 2024, 2025); Школа-конференция «Актуальные проблемы механики» (Петергоф – 2025); Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике (Новосибирск – 2025); Конференция — школа молодых ученых с международным участием «Многофазные системы модели, эксперимент, приложения» (Уфа – 2025); Международная конференция – школа молодых ученых «Волны и вихри в сложных средах» (Москва – 2025); Международная конференция – Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность

(HeЗаТеГиУс) (Московская область – 2026); XII International Conference on Structural Dynamics (EuroDyn 2023) (Нидерланды, Делфт, виртуально – 2023); 10th International Conference on Vortex Flow Mechanics (ICVFM 2023) (Китай, Нанкин – 2023); 10th International Symposium on Fluid-Structure Interactions, Flow-Sound Interactions, Flow-Induced Vibration & Noise (FIV 2024) (Бразилия, Игуасу – 2024); the 26th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2024) (Южная Корея, Тэгу – 2024); 7th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control (FSSIC 2025) (Канада, Ошава/Торонто – 2025).

Автор работы был отмечен двумя дипломами 1-ой степени (2024) и дипломом 2-ой степени за лучшую работу аспиранта (2025) на конференции-конкурсе молодых ученых НИИ механики МГУ; дипломом 1-ой степени за лучшую работу аспиранта на Всероссийской конференции молодых ученых-механиков (YSM-2025). Доклад на конференции «Ломоносов - 2025» секции «Математика и механика» был отмечен грамотой секции.

Публикации соискателя по теме диссертации

По результатам исследований опубликовано 4 работы, в том числе 3 публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.1.9.Механика жидкости, газа и плазмы.

Личный вклад

Соискатель лично получил все основные результаты, выносимые на защиту. Им осуществлены постановка исследовательских задач, выбор методологии, подготовка экспериментальной установки, проведение и обработка экспериментальных данных во всех описанных в диссертации экспериментальных работах. Научные руководители приняли участие в обсуждении полученных результатов.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы. Полный объем диссертации составляет 98 страницы, включая 32 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 79 наименований.

Содержание

В разделе **Введение** обосновывается актуальность исследований, проводимых в работе, формулируется цель, ставятся задачи диссертационной работы, излагается научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **Главе 1** приводится обзор литературы, посвященной изучению резонансных аэроупругих колебаний цилиндра, вызванных дорожкой Кармана в потоке газа или жидкости.

В **Главе 2** обсуждаются вспомогательные методы, которые использовались для предсказания, а также для обработки результатов экспериментов. В **разделе 2.1** формулируется постановка задачи для описания математической модели цилиндра, закрепленного на упругой балке. В **разделе 2.2** выводятся уравнения колебаний поперечного и крутильного типа для нахождения собственных частот колебаний цилиндра, которым посвящен **Раздел 2.3**. В **разделе 2.4** описываются, методы обработки результатов экспериментов, а также описывается основной параметр сдвига фаз между положением цилиндра и сходом вихрей, используемый в настоящей работе, для описания характера схода вихрей. В **разделе 2.5** обсуждаются методы определения сдвига фаз между двумя периодическими сигналами для последующего их использования при анализе характера схода дорожек Кармана в следе за цилиндром.

В **Глава 3** экспериментально исследуется ранее не изученный крутильный тип колебаний (Рис. 2), изучаются основные его характеристики, в частности, характер схода дорожек Кармана.

Раздел 3.1 содержит описание экспериментальной установки. Исследования выполнялись в аэродинамической трубе А-10 с камерой Эйфеля и открытой рабочей частью, размещённой в НИИ механики МГУ. Рабочая часть восьмиугольного сечения (Рис. 3) имела высоту 800 мм и длину 1360 мм. Испытывались две стальные балки со следующими параметрами: сечение — 3×33 мм; плотность материала — $\rho = 7850$ кг/м³; модуль Юнга — $E = 224 \times 10^9$ Па; модуль сдвига — $G = 82 \times 10^9$ Па; длины — $l = 325$ мм и $l = 375$ мм, соответствующие безразмерным значениям $l/D = 6.5$ и $l/D = 7.5$ соответственно. Цилиндр изготовлен из дюралюминия и имел следующие характеристики: масса — $m_s = 0.116$ кг; длина — $L = 500$ мм; внешний диаметр — $D = 25$ мм; внутренний диаметр — $D_{int} = 23$ мм. Параметры собственных колебаний системы цилиндр-балка: для балки длиной

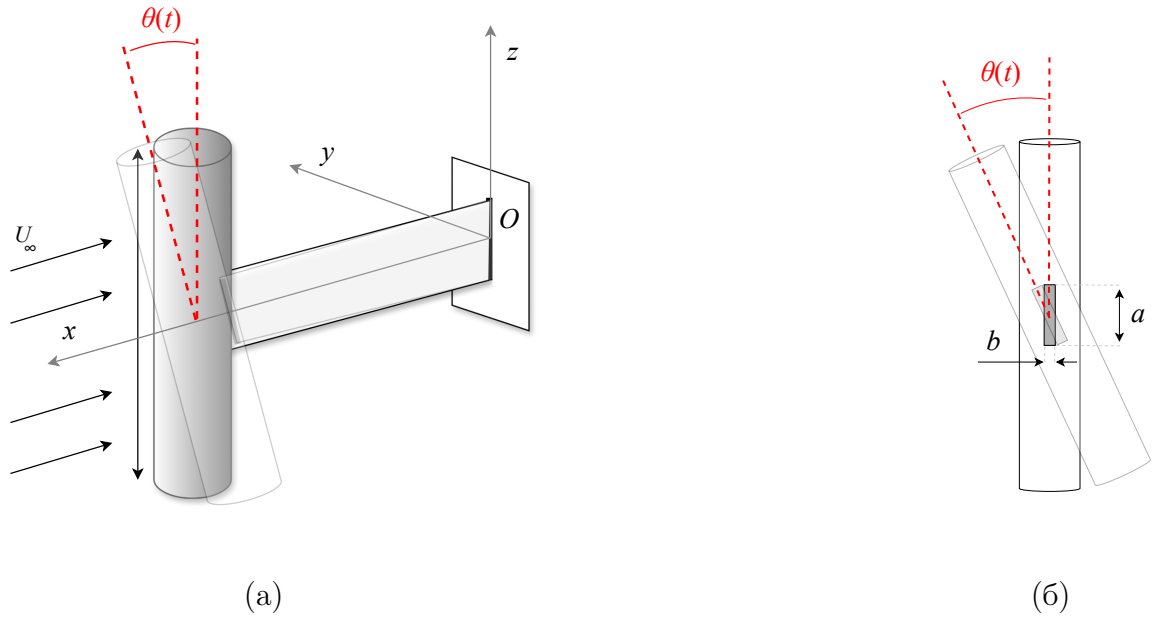


Рис. 2: Крутильные колебания кругового цилиндра закрепленного на конце прямоугольной балки.

325 мм поперечная частота составляет $f_{tr} = 12.67$ Гц, крутильная частота — $f_{rot} = 27.62$ Гц; для балки длиной 375 мм поперечная частота равна $f_{tr} = 10.10$ Гц, крутильная частота — $f_{rot} = 25.60$ Гц. Эксперименты проводились в рабочем диапазоне чисел Рейнольдса $(1 - 9.3) \times 10^3$. Для проведения измерений применялось следующее оборудование: триангуляционный лазерный датчик Riftek RF-603 — для фиксации отклонений верхнего торца цилиндра от положения равновесия (Рис. 3б); термоанемометр Smart Sensor AR866 — для определения скорости набегающего потока; зеркало, установленное на балке, и лазерная указка — для выявления преобладающего типа колебаний (горизонтальная линия соответствовала изгибным деформациям, вертикальная — крутильным) (Рис. 3б); термоанемометр постоянной температуры (СТА) DISA 55DO5 с одноточечным датчиком 55P81 — для измерения пульсаций скорости в следе за цилиндром (Рис. 4).

В разделе 3.2 обсуждаются результаты экспериментов первой части работы. Вначале были проведены измерения частот схода вихрей f_s для неподвижного цилиндра с длиной балки $l/D = 6.5$ в нескольких сечениях вдоль размаха цилиндра. Частота схода вихрей соответствует числу Струхалия $St \approx 0.16$, что меньше $St \approx 0.20$, характерного для цилиндра бесконечного размаха. Такое поведение связано с наличием концевых вихрей из-за сдвигового слоя, сходящего с торцов цилиндра (Zdravkovich et al., 1989).

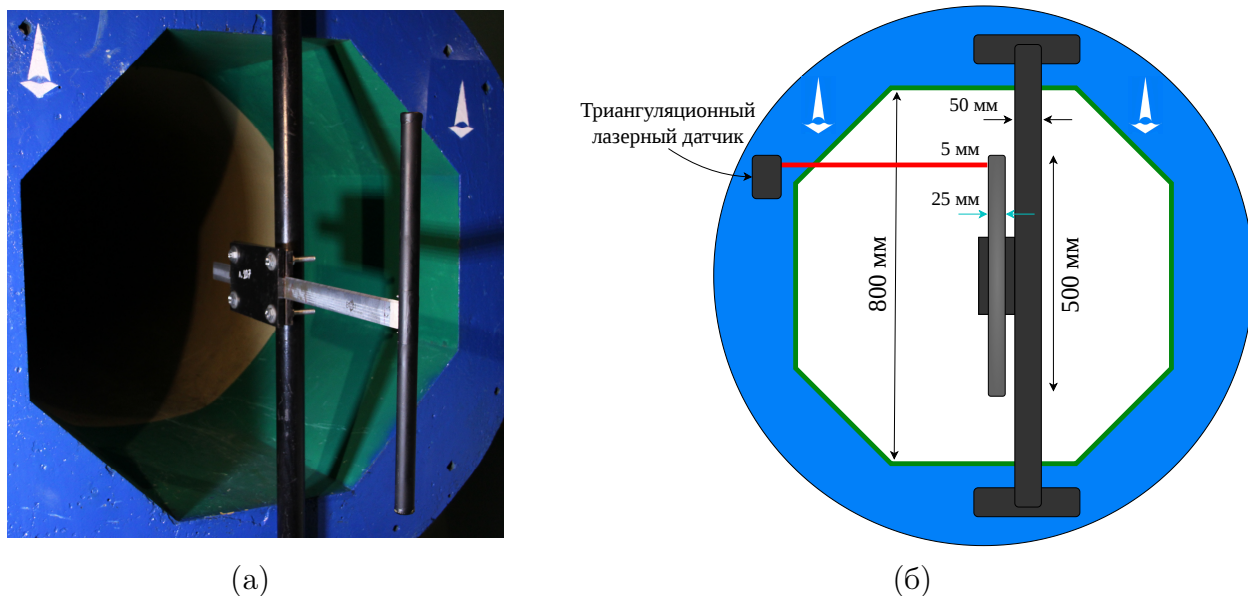


Рис. 3: Экспериментальное оборудование. (а) Круговой цилиндр на поперечной прямоугольной балке в аэродинамической трубе, (б) геометрические свойства экспериментальной установки.

В последующих экспериментах цилиндр свободно колебался. Были найдены зависимости амплитуды колебаний от скорости набегающего потока, на которых видно два четко выраженных режима колебаний (Рис. 5а). Диапазоны амплитудных откликов крутильных колебаний по сравнению с поперечными колебаниями смещены в сторону более высоких скоростей набегающего потока из-за разницы в собственных частотах колебаний (собственные частоты крутильных колебаний более чем в два раза больше поперечных, и поэтому диапазоны не пересекаются). Но с точки зрения безразмерных приведенных скоростей $V_r = U_\infty / f_n D$ (где в качестве характерной частоты используются частоты свободных поперечных и крутильных колебаний, соответственно) пики амплитуд соответствуют близким приведенным скоростям (Рис. 6а).

Следующая серия экспериментов была направлена на анализ потока в следе за цилиндром с использованием синхронных измерений амплитуды колебаний цилиндра триангуляционным лазерным датчиком и пульсаций скорости термоанемометром постоянной температуры. Было доказано, что для крутильных колебаний также существует режим захвата частоты, как видно из Рис. 5б и 6б. Следует отметить, что при построении зависимостей Рис. 6а и 6б приведенные скорости для соответствующих режимов были вычислены с использованием двух разных собственных частот f_{tr} и f_{rot} .

Далее для описания характера схода дорожек Кармана в обоих режи-

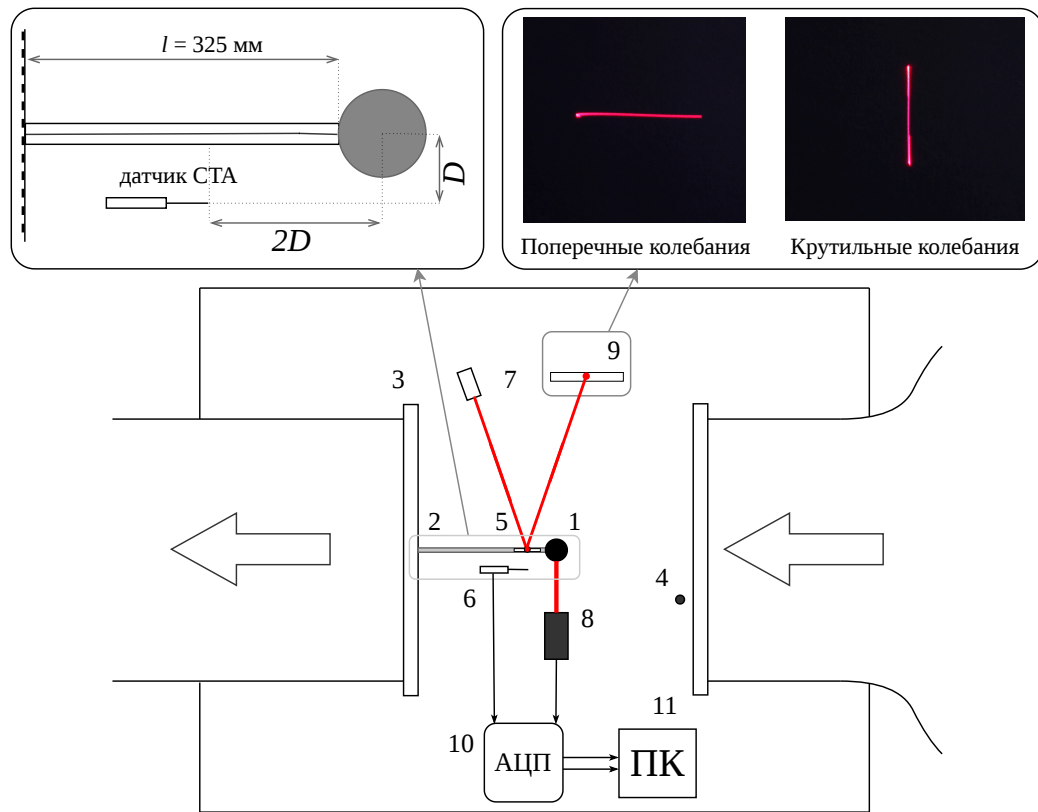


Рис. 4: Схема эксперимента: вид сверху. (1) Круговой цилиндр, (2) жёстко закреплённая балка, (3) жёсткое массивное основание, (4) термоанемометр, (5) зеркало, (6) датчик СТА, (7) лазерная указка, (8) триангуляционный лазерный датчик, (9) экран, (10) аналого-цифровой преобразователь (АЦП), (11) ПК. Отражённый в зеркале след лазерного указателя определяет тип колебаний.

мах колебаний вычислялся фазовый сдвиг φ между положением цилиндра и сходом вихрей. Для этого сигнал термоанемометра фильтровался полосовым фильтром в диапазонах $f_{tr} \pm 0.1$ Гц и $f_{rot} \pm 0.1$ Гц (для случая поперечных или крутильных колебаний, соответственно), а после вычислялась корреляция между сигналами триангуляционного лазерного датчика и термоанемометра в зонах захвата частоты. Величина φ характеризует сдвиг фазы пульсации скорости $s_i = s_i^0 \cos(\omega t + \varphi)$ относительно фазы перемещения $w_i = w_i^0 \cos(\omega t)$. Используя полученные значения φ , были вычислены разности фаз $\Delta\varphi = \varphi_{bottom} - \varphi_{top}$ между вихревыми дорожками Кармана в поперечных сечениях, расположенных симметрично относительно оси вращения цилиндра. Таким образом, было показано, что для поперечных колебаний сдвиг фаз $\Delta\varphi \approx 0$, что свидетельствует о симметричном сходе дорожек Кармана в симметричных верхних и нижних сечениях. В то время как для крутильных колебаний разница фаз $\Delta\varphi \approx \pi$, свидетельствующая

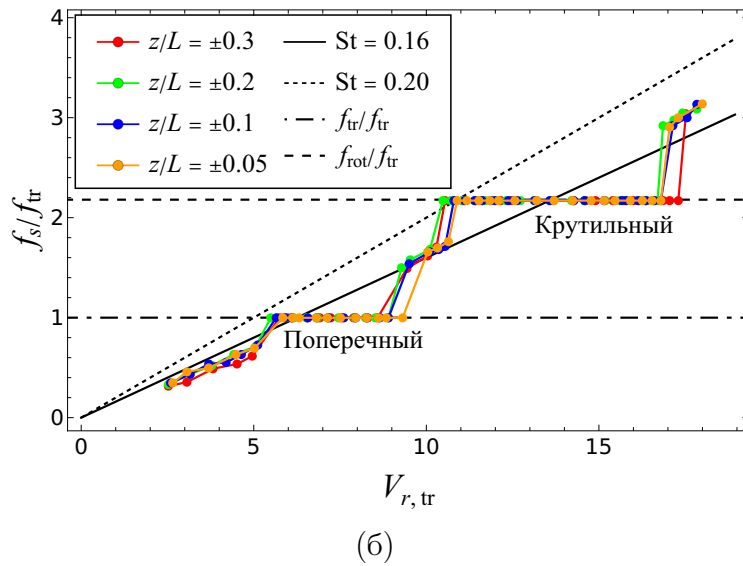
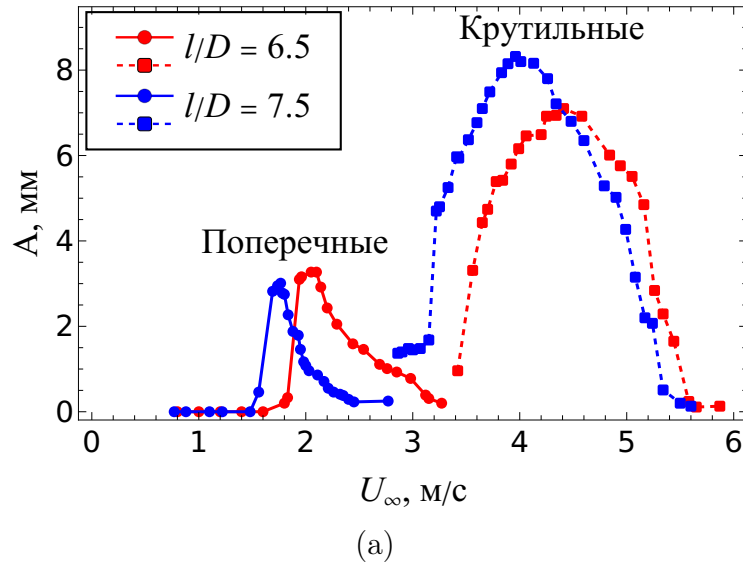


Рис. 5: Амплитудный отклик и изменение частоты схода вихрей. (а) Амплитуда колебаний A (мм) и (б) Частота схода вихрей f_s (Гц) в зависимости от скорости потока U_∞ (м/с) для балки длиной $l/D = 6.5$.

о противофазном сходе дорожек Кармана в симметричных сечениях относительно оси вращения.

Глава 4 посвящена более детальному исследованию структуры вихревого следа вдоль размаха цилиндра и её изменению при различных концевых условиях в режиме крутильных колебаний.

В **разделе 4.1** посвящена более детальному исследованию структуры вихревого следа вдоль размаха цилиндра и её изменению при различных концевых условиях в режиме крутильных колебаний. В разделе 4.1 представлено описание экспериментальной установки, использованной во второй части исследования. Эксперименты выполнялись на той же аэро-

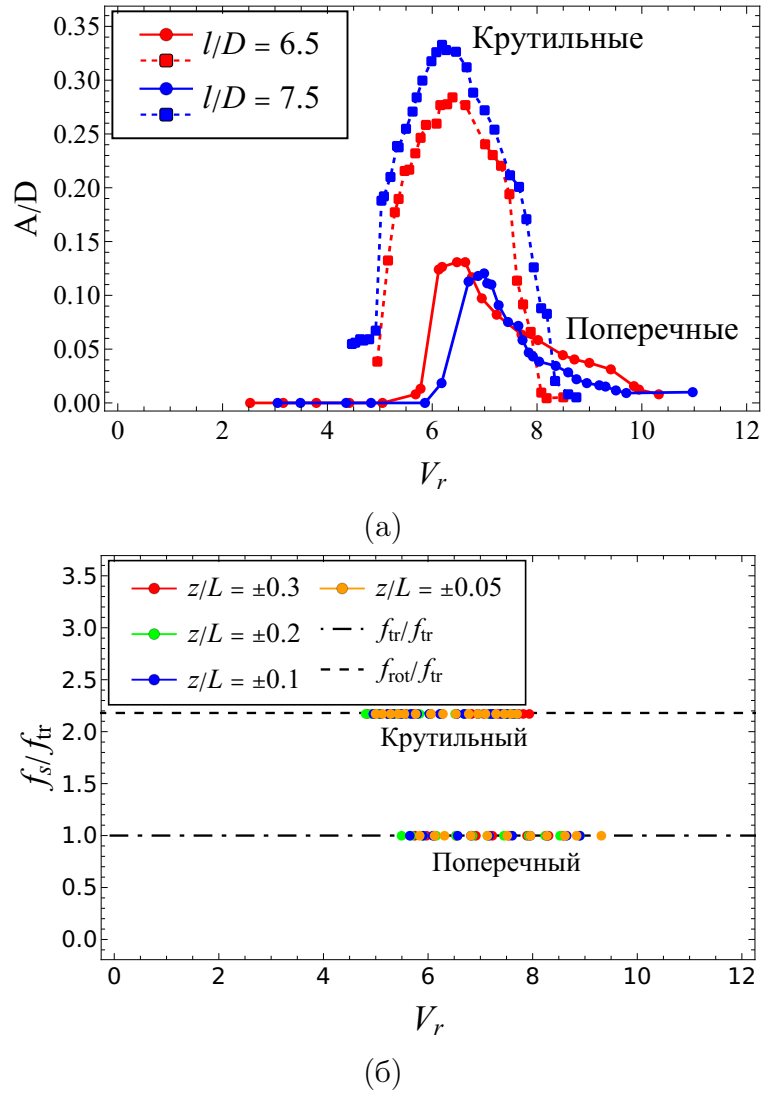
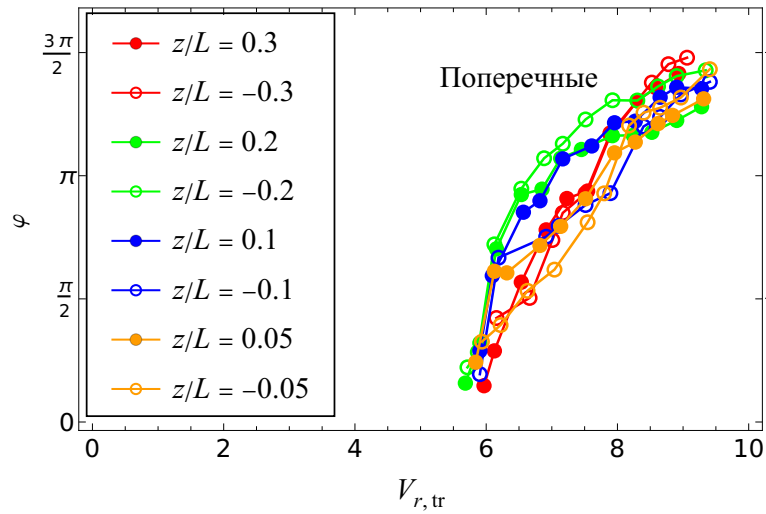


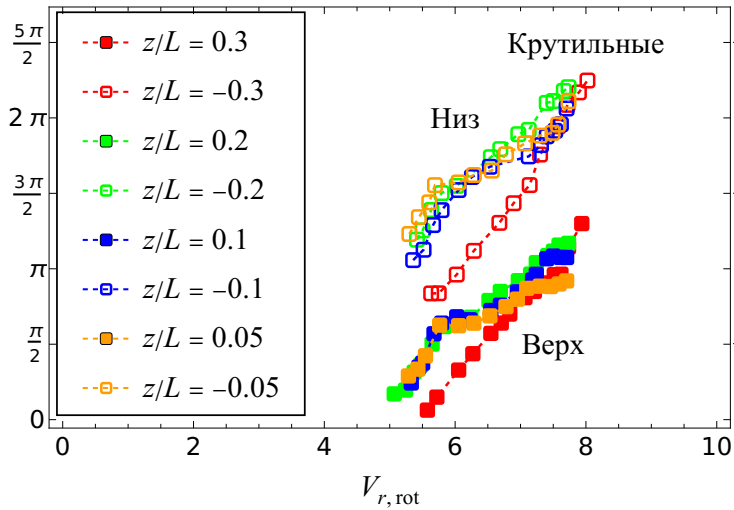
Рис. 6: Амплитудный отклик и изменение частоты схода вихрей. (а) Безразмерная амплитуда A/D и (б) Отношение f_s/f_{tr} в зависимости от приведённой скорости V_r в областях захвата частоты для балки длиной $l/D = 6.5$.

динамической трубе с применением прежней экспериментальной модели. При этом цилиндр переместили ближе к выходной части конфузора, для нивелирования возможного влияния расширяющегося сдвигового слоя на границе равномерного потока в открытой рабочей части на описываемые далее концевые эффекты, а также модифицировали основание для крепления цилиндра. Длина балки оставалась неизменной и составляла $l/D = 6.5$. Измерительные приборы использовались те же, что и ранее, за исключением термоанемометра для измерения скорости набегающего потока: его заменили на модель Testo 405i. Для варьирования концевых условий использовались четыре типа торцевых насадок (Рис. 8):

1. Свободный торец (Тип I);



(a)



(б)

Рис. 7: Фазовый сдвиг φ между сигналами анемометра и триангуляционного лазерного датчика в зависимости от приведённой скорости V_r при длине балки 325 мм и на высоте анемометра $z/L = \pm 0.05, \pm 0.1, \pm 0.2$ и ± 0.3 от оси вращения. (а) Поперечные колебания, (б) крутильные колебания. Круглые и квадратные маркеры соответствуют поступательным и вращательным колебаниям соответственно; заполненные и пустые маркеры соответствуют верхнему и нижнему сечениям соответственно.

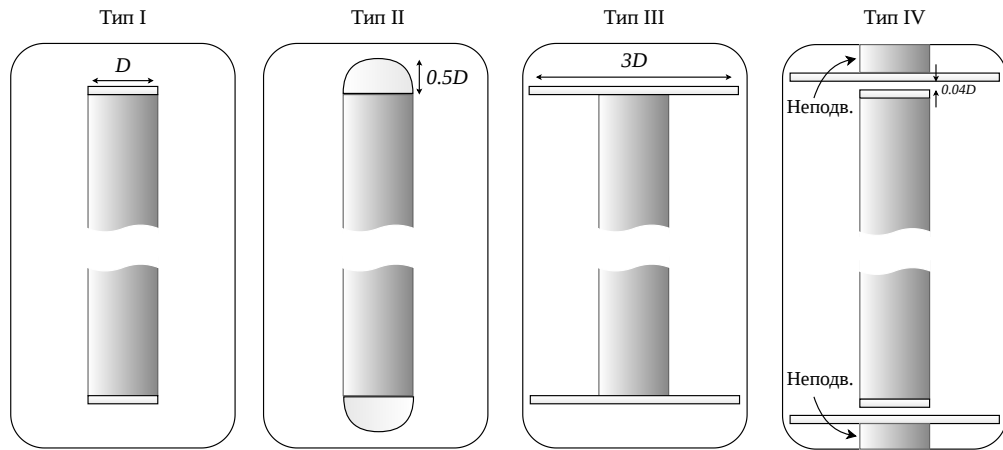


Рис. 8: Четыре типа концевых насадок для создания различных концевых условий.

2. Полусферическая торцевая насадка (Тип II);
3. Присоединённая круглая аэродинамическая шайба диаметром $3D$ (Тип III);
4. Отсоединённая аэродинамическая шайба диаметром $3D$, расположенная на расстоянии $G = 0.04D$ от торца цилиндра (Тип IV) (Рис. 8).

Присоединённые и отсоединённые аэродинамические шайбы имеют одинаковую толщину $0.04D$.

В разделе 4.2 приводятся основные результаты данной части работы. Были построены графики для различных конечных условий безразмерной амплитуды A/D в зависимости от приведенной скорости $V_{r, tr}$, вычисленной с использованием только поперечной собственной частоты f_{tr} (Рис. 9).

Для анализа характера схода вихрей в следе за цилиндром вычислялась разность фаз между движением цилиндра и сходом вихрей с использованием преобразования Гильберта. В результате были найдены зависимости изменения соответствующих сдвигов фаз φ и $\Delta\varphi$ по размаху цилиндра (Рис. 10). Имеет место заметная неравномерность распределения фазы срыва вихрей вдоль цилиндра (для случаев свободного торца и полусферы). При поперечных колебаниях присоединённые и отсоединённые аэродинамические шайбы несколько сглаживают это распределение; при крутильных колебаниях их влияние значительно сильнее, в результате чего процесс срыва вихрей становится практически синхронным. Что касается $\Delta\varphi$, то в режиме крутильных колебаний дорожки Кармана в симметричных сечениях сходят в противофазе для всех случаев торцевых насадок.

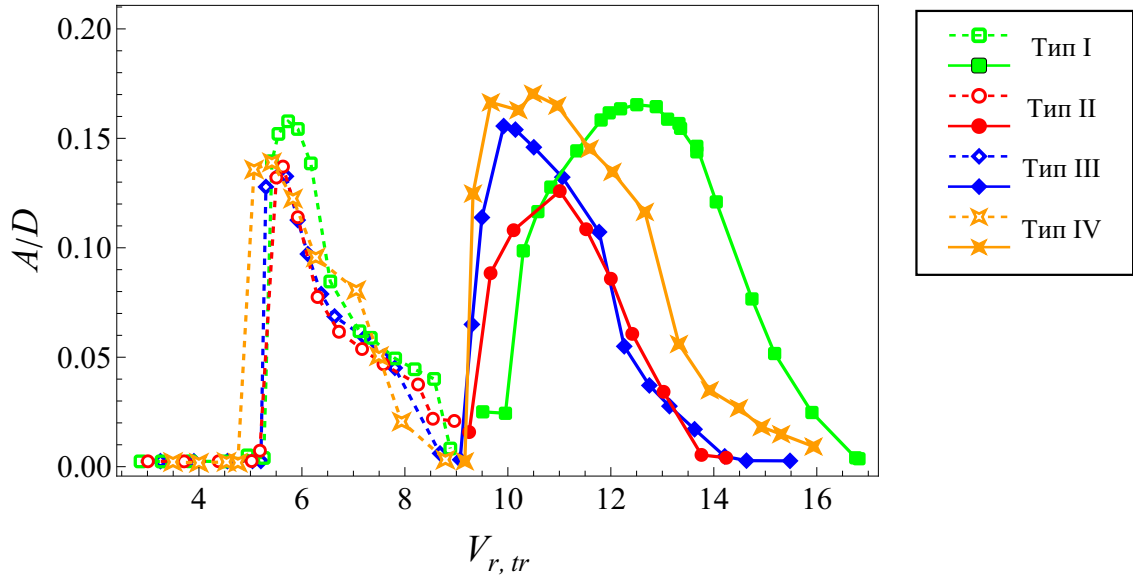


Рис. 9: Амплитудный отклик для различных конечных условий. Зависимость безразмерной амплитуды A/D от приведенной скорости $V_{r, tr}$. Заполненные и пустые маркеры соответствуют крутильным и поперечным колебаниям, соответственно.

Глава 5 посвящена экспериментальному исследованию влияния длины цилиндра на амплитуду крутильных колебаний.

В **разделе 5.1** представлена экспериментальная установка, использованная в третьей части исследования. Методика измерений и конфигурация оборудования полностью соответствовали тем, что применялись в **разделе 4.1**. Ключевое отличие заключалось в том, что в данном случае изучалась серия цилиндров различной длины. При этом конечные условия на торцах образцов соответствовали случаю свободного торца. **Раздел 5.2** посвящён анализу основных результатов проведённой серии экспериментов. В рамках исследования режима крутильных колебаний были построены графики, отражающие зависимость (Рис. 12): безразмерной амплитуды A/D ; амплитуды угла поворота цилиндра θ от приведённой скорости $V_{r, rot}$ для разных значений относительного удлинения цилиндра L/D . На основании полученных данных построена зависимость максимальной амплитуды A_{max}/D и максимального угла поворота θ_{max} от безразмерной длины L/D (Рис. 13).

Выявленные закономерности характеризуются следующими особенностями:

- зависимости A_{max}/D и θ_{max} от L/D носят немонотонный характер и имеют локальные минимумы при $L/D = 20$;

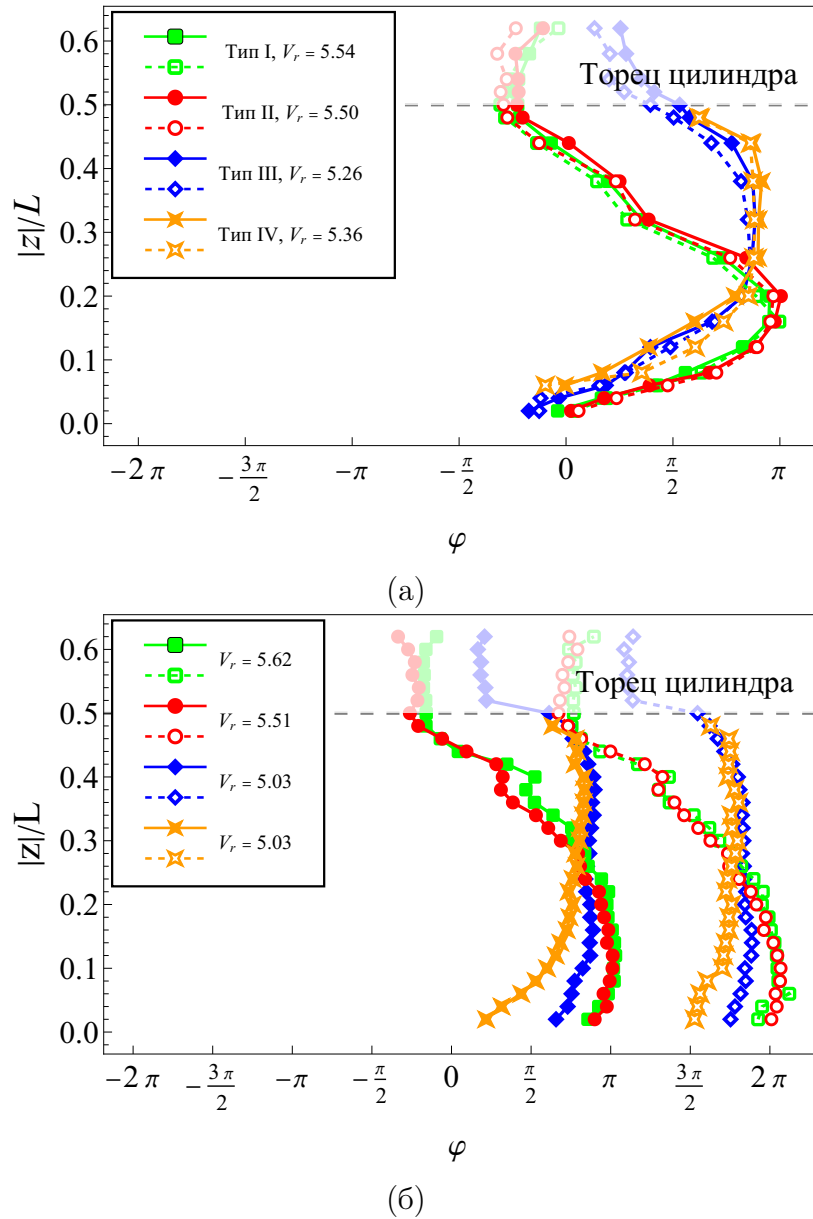


Рис. 10: Фазовый сдвиг φ для (а) поперечных колебаний и для (б) крутильных колебаний в зависимости от расстояния от поперечного сечения цилиндра до оси вращения $|z|/L$. Данные на графиках получены при постоянных скоростях потока, которые соответствуют пику амплитуды A/D для обоих типов колебаний и для каждого типа концевых условий. На графиках заполненные и незаполненные маркеры соответствуют верхнему и нижнему поперечным сечениям, соответственно.

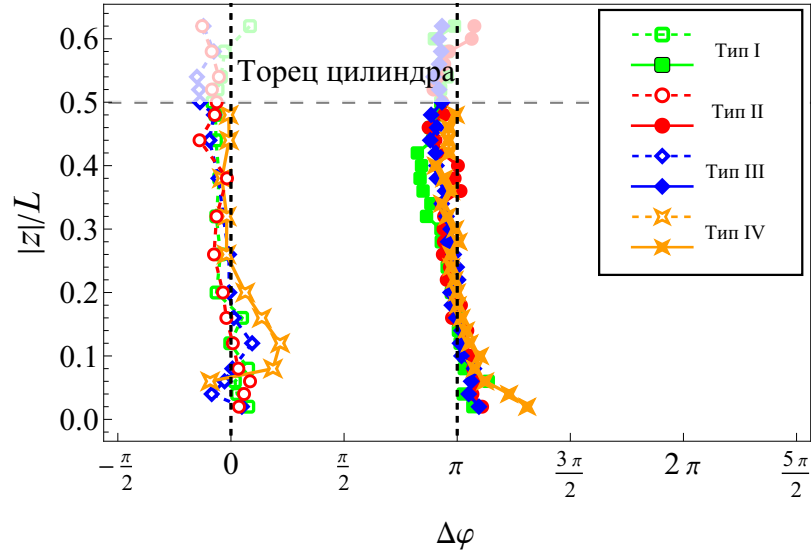
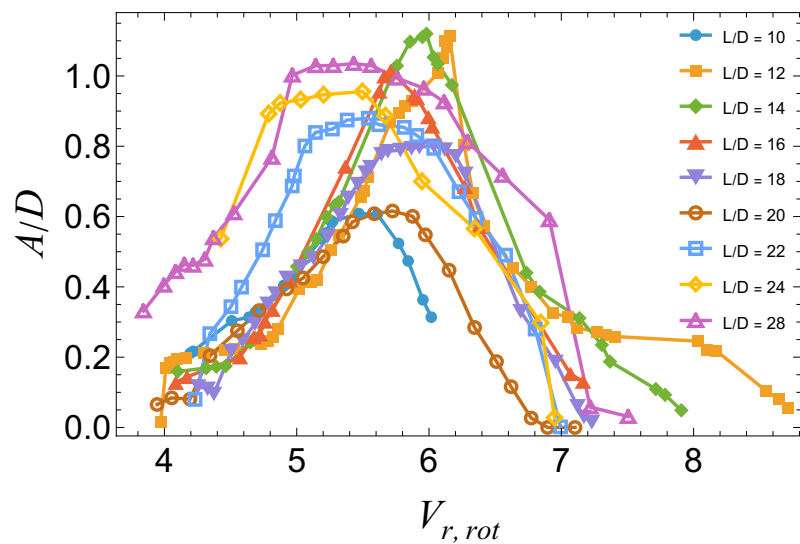


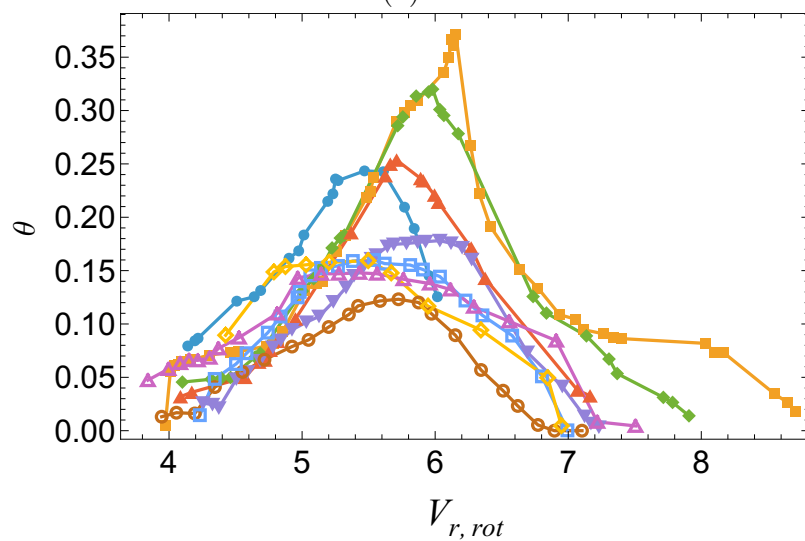
Рис. 11: Разница фазовых сдвигов $\Delta\varphi$ в зависимости от расстояния от поперечного сечения цилиндра до оси вращения $|z|/L$. Данные на графиках получены при постоянных скоростях потока, которые соответствуют пику амплитуды A/D для обоих типов колебаний и для каждого типа конечных условий. Заполненные и незаполненные маркеры соответствуют крутильным и поперечным колебаниям, соответственно.

- максимальное значение безразмерной амплитуды $A_{max}/D \approx 1.11$ достигается при $L/D = 12$ и $L/D = 14$;
- наибольшая амплитуда угла поворота $\theta_{max} \approx 0.37$ рад. наблюдается при $L/D = 12$.

Кроме того, для цилиндров с относительным удлинением $L/D = 24$ и $L/D = 28$ обнаружено следующее явление: в сравнительно узком диапазоне приведённых скоростей возникает незатухающий смешанный тип колебаний (Рис. 14). Он проявляется как резонанс, обусловленный одновременным возбуждением поперечных и крутильных колебаний.



(a)



(б)

Рис. 12: (а) Зависимость амплитуды угла поворота θ и (б) безразмерной амплитуды A/D колебаний цилиндра от приведенной скорости $V_{r,rot}$ для различных относительных удлинений цилиндра L/D .

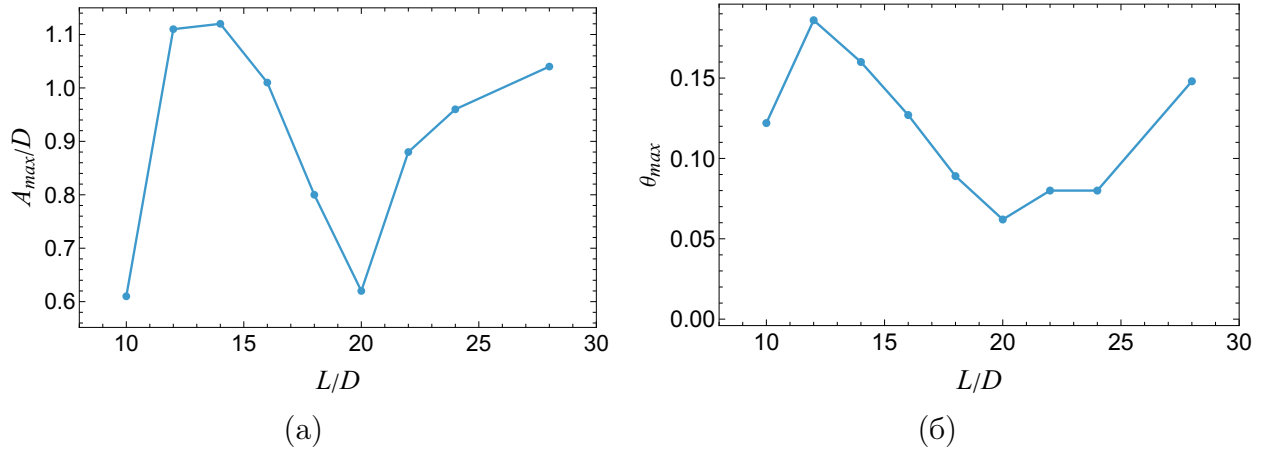


Рис. 13: Зависимость максимальной амплитуды колебаний торца цилиндра A_{max}/D (а) и максимального угла поворота θ_{max} (рад) цилиндра (б) от относительного удлинения L/D .

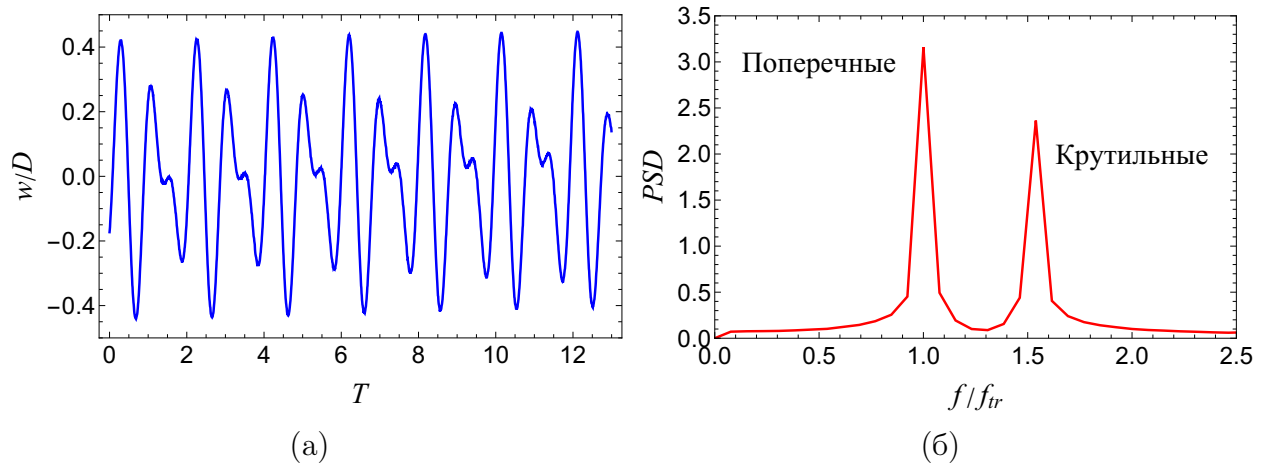


Рис. 14: Режим незатухающего смешанного типа колебаний. (а) Зависимость смещения верхнего торца цилиндра от положения равновесия w/D от безразмерного времени $T = t f_{tr}$; (б) Зависимость спектральной плотности мощности записанного сигнала (PSD) от безразмерной частоты f/f_{tr} .

Заключение

В диссертационной работе был исследован ранее не изученный тип резонансных колебаний, вызванных сходом вихрей. Рассмотрены его основные характеристики, в частности характер схода дорожек Кармана. Были получены следующие результаты:

1. Экспериментально открыт новый тип крутильных колебаний. Получен диапазон безразмерных скоростей потока, в котором существуют развитые автоколебания, и определены их амплитуды.

2. В режиме крутильных колебаний дорожки Кармана, сходящие в различных сечениях цилиндра, имеющих разную амплитуду колебаний, синхронизируются в единую трёхмерную структуру. При этом вихревые дорожки Кармана, генерируемые верхней и нижней частями цилиндра, сходят синхронно в противофазе.
3. Доказано наличие режима захвата частоты для исследованного типа крутильных колебаний.
4. Характер схода вихрей по размаху цилиндра существенно определяется концевыми условиями и типом резонансных колебаний. Для типов «Свободный торец» и «Полусфера» выявлена заметная неравномерность распределения фазы схода вихрей. При поперечных колебаниях аэродинамические шайбы умеренно сглаживают это распределение, а при крутильных — их влияние резко усиливается, делая процесс схода вихрей практически синхронным (вдоль верхней и нижней половин цилиндра).
5. Фаза схода вихрей скачком меняется вблизи закрепления балки, которая ведёт себя как разделительная пластина, предотвращающая образование вихрей в сечениях вблизи оси вращения цилиндра.
6. Исследовано влияние длины цилиндра на крутильные автоколебания. Наибольшая амплитуда $A_{max}/D \approx 1.11$ достигается при $L/D = 12$ и $L/D = 14$; амплитуда угла поворота $\theta_{max} \approx 0.37$ рад. достигается при $L/D = 12$. Зависимости имеют локальные минимумы, достигающиеся при $L/D = 20$.
7. Впервые экспериментально обнаружен режим незатухающего смешанного типа колебаний, когда резонанс наступает в результате одновременного возбуждения поперечных и крутильных колебаний.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. *Demchenko, Y.V., Vedeneev, V.V., Zubkov A.F.* Torsional aero-elastic oscillations of an elastically mounted circular cylinder //Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2647. – №. 11. – P. 112004. — EDN: GNMCVG. Импакт фактор 0,180 (SJR). (0,924 п.л. / авторский вклад 80%: 0,739 п.л.)
2. *Demchenko, Y.V., Ivanov O.O., Vedeneev, V.V.* Experimental investigation of rotational vortex-induced vibrations of a circular cylinder attached to an elastic beam //Journal of Fluids and Structures. – 2025. – Vol. 133. – P. 104266. — EDN: UMSYFO. Импакт фактор 3,50 (JIF). (1,502 п.л. / авторский вклад 75%: 1,127 п.л.)
3. *Demchenko, Y.V., Ivanov O.O.* The effect of end conditions on rotational vortex-induced vibrations //Physics of Fluids. – 2026. – Vol. 38. - №. 2. – P. 024108 – DOI: 10.1063/5.0309117. Импакт фактор 4,30 (JIF). (1,733 п.л. / авторский вклад 85%: 1,473 п.л.)

Прочие публикации:

4. *Демченко Я. В.* Влияние длины цилиндра на крутильные аэроупругие колебания //Волны и вихри в сложных средах. Сборник материалов 16-й международной конференции - школы молодых ученых. Москва: ООО «ИСПО-принт», 2025. С. 59-61. EDN: SCNIIL (0.27 п.л. / авторский вклад 100%: 0.27 п.л.)