

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*



**Иванов Олег Олегович**

**Резонансное взаимодействие упругих тел с потоком  
жидкости и газа**

Специальность: 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре гидромеханики механико-математического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Научные руководители:

**Веденеев Василий Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент

**Голубятников Александр Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Марчевский Илья Константинович**, доктор физико-математических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, профессор кафедры «Прикладная математика»

**Рябинин Анатолий Николаевич**, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный университет, профессор кафедры гидроаэромеханики

**Бычков Олег Павлович**, кандидат физико-математических наук, Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, старший научный сотрудник отделения аэроакустики и экологии летательных аппаратов (НИО-9)

Защита диссертации состоится 15 декабря 2023 г. в 14 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: pelevina.daria@gmail.com

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/011.5/2749>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
МГУ.011.5, к.ф.-м.н.



Д.А. Пелевина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Задачи взаимодействия упругих тел или конструкций с потоками жидкости и газа важны как с точки зрения развития фундаментальной науки, так и в связи с целым рядом практических приложений. В работе экспериментальными методами изучается две проблемы.

Первая связана с возникновением аэроупругих колебаний упруго закрепленного цилиндра в воздушном потоке и модификации этих колебаний за счет постановки рядом с цилиндром твердых тел. Хорошо известен факт возникновения резонансных колебаний цилиндрических тел в потоке за счет периодического срыва вихрей. В строительных конструкциях, мачтовых, мостовых и трубопроводных системах возникновение колебаний крайне нежелательно, так как это может приводить к накоплению усталостных повреждений и разрушению. С другой стороны, нередко элементам конструкции позволительно совершать колебания ограниченной амплитуды, поэтому важно правильно оценивать амплитуду колебаний плохообтекаемого элемента конструкции, в том числе вблизи других элементов.

Другой важный аспект изучения аэроупругих колебаний связан с разработкой новых методов преобразования энергии движения среды в электрическую. Сейчас активно развиваются электрические генераторы, построенные на новых физических принципах, например, преобразующих энергию колебаний плохообтекаемого тела в потоке жидкости или газа за счет схода вихрей. Классические ветрогенераторные системы не всегда являются оптимальным решением для генерации электроэнергии. Наличие в них движущихся или скользящих частей предполагают регулярное обслуживание. В устройствах, преобразующих резонансные колебания плохообтекаемого тела за счет схода вихрей, в силу отсутствия таких частей не возникает этой проблемы, что может быть важно при использовании в

местах с запыленным воздухом, в пустынях, на арктических территориях. Кроме того, такие устройства достаточно просты, мобильны, такие системы легко масштабируемы, их можно использовать, в том числе, в таких местах, где нет возможности использовать традиционные ветрогенераторы.

Еще одной важной проблемой для подобных энергетических установок является обеспечение достаточной амплитуды колебаний, причем обычно чем она больше, тем больше эффективность установки. Съем электроэнергии создает дополнительный эффект демпфирования в таких системах, поэтому важно разрабатывать новые методы по увеличению амплитуды колебаний в таких системах.

Вторая проблема связана со снижением трения при движении тел в воде или воздухе. При уменьшении сопротивления, например, контейнеровозов, танкеров, самолетов и т.д., даже на один процент достигается ощутимый экономический эффект. Сопротивление тел можно разделить на сопротивление формы и сопротивление трения. Оптимизация форм при оценке сопротивления обтекаемых тел во многом достигла своего потолка, поэтому наиболее перспективным направлением представляется разработка методов для уменьшения трения. Более того, для современных коммерческих судов сопротивление трения может достигать 70% от общего сопротивления, т.е. задача модификации и снижения трения является, безусловно, актуальной. Одним из методов снижения трения является применение вязкоупругих, или податливых, покрытий. История исследований влияния податливых покрытий на турбулентный пограничный слой и снижение трения началась в 60-х годах XX века с работ М.О. Крамера, начавшего данные исследования и получившего снижение сопротивления тела на невероятные 60%. Различные независимые группы исследователей после него получали противоречивые результаты по повышению или снижению трения, без какой-либо повторяемости и воспроизводимости результатов. Например, в исследованиях Е. Блика (Looney W. R., Blick E. F.

//J. of Spacecraft and Rockets, 1966 и др.) было зафиксировано снижение сопротивления до 50%, однако следующие эксперименты на тех же конфигурациях податливых покрытий не было найдено какого-либо снижения (Hefner J. N., Weinstein L. M. //Journal of Spacecraft and Rockets, 1976 и др.) Кроме ошибок в эксперименте, одной из причин неповторяемости можно выделить отсутствие документирования физических свойств использованных покрытий, в том числе при высоких частотах колебаний.

Б.Н. Семеновым (Semenov B. N. // Res. Dev. in turb. Man., 1991) была предложена методика для выбора оптимальных податливых покрытий, которые могут дать снижение турбулентного трения. На серии изготовленных согласно его методике монолитных покрытий было получено снижение трения до 18% (Kulik et al. //Res. Dev. in turb. Man., 1991) при испытаниях по буксировке модели катером в озере. Группой К.-С. Чои (Choi et al. //Proc. R. Soc. of Lond. A, 1997) вместе с В.М. Куликом и Б.Н. Семеновым были поставлены эксперименты с той же моделью и тем же материалом покрытий в гидродинамической трубе в диапазоне скоростей 2–7 м/с, и было получено снижение трения до 7%. Важно, что впервые второй научной группой были подтверждены результаты, демонстрирующие снижение трения податливыми покрытиями.

В связи с появлением новых методов измерения динамических вязкоупругих свойств покрытий, разработанных В.М. Куликом и А.В. Бойко, возможности в исследовании в данной области расширились, и такие исследования получили новое развитие.

Теория В.М. Кулика (Kulik V. M. //Int. J. Heat and Fluid Flow, 2012). для нахождения отклика материала на внешнее воздействие (пульсации давления) использует не распространенные простые модели вязкоупругости (обычно – Кельвина-Фойгта), а данные о свойствах материала в зависимости от частоты воздействия, которые находятся экспериментально. Для слоя вязкоупругого материала определенной толщины с известными физическими свойствами

после решения динамической задачи вязкоупругости определяется нормальная податливость материала (его деформационный отклик на воздействие пульсацией давления) в зависимости от различных скоростей и частот турбулентных пульсаций давления. Созданные колебания поверхности материала создают колебания жидкости с другой фазой, причем если последняя будет противоположна фазе турбулентной пульсации, то произойдет ее гашение, то есть снижение уровня турбулентности и, следовательно, трения. Полагается, что наибольшим этот эффект будет в областях больших значений податливости вязкоупругого материала. Для выбора материала используется методика Б.Н. Семенова.

**Цель и задачи работы.** В данной работе были поставлены три цели:

1. Исследовать колебания упругого цилиндра вблизи твердых стенок для поиска методов увеличения амплитуды колебаний, а следовательно, и эффективности конструируемых ветрогенераторов.
2. Разработать экспериментальные методы по измерению трения и профилей скорости в пограничном слое.
3. На основе комплекса гидродинамической трубы создать базу для тестов различных образцов податливых покрытий, проверить теорию, разработанную В.М. Куликом, описывающую взаимодействие вязкоупругих покрытий и турбулентного пограничного слоя.

В связи с этим были сформулированы задачи:

1. Экспериментально исследовать в аэродинамической трубе влияние пластины конечных размеров, расположенной вблизи упругого резинового шнура, на резонансные колебания.
2. Исследовать возможность создания весов по типу «плавающего элемента» для измерения трения для существующей модели и минимизировать возможные ошибки измерения. Разработать

экспериментальные методы по измерению трения и профилей скорости в пограничном слое.

3. Экспериментально исследовать взаимодействие вязкоупругих покрытий различной толщины из кремнийорганической резины Mold Max 10 на турбулентное трение в пограничном слое в гидродинамической трубе.

#### **Новизна работы.**

Задача об колебаниях упруго закрепленного цилиндра вблизи бесконечной плоскости хорошо исследована в связи с приложениями к трубопроводным системам, расположенных на дне моря, но в литературе не встречается анализа влияния конечной пластины или подобных тел на колебания цилиндра. В диссертации рассмотрена новая постановка задачи о влиянии пластины конечной длины на колебания упругого шнура и получен новый результат усиления таких колебаний при их определенном взаимном расположении.

В исследовании, связанном с податливыми покрытиями, изучено влияние однослойных монолитных вязкоупругих покрытий из кремнийорганической резины на турбулентный пограничный слой. Был проведен анализ такого взаимодействия для покрытия, динамические свойства которого были тщательно задокументированы. Для таких достаточно жестких покрытий ранее были сделаны лишь единичные исследования. В то же время, такие покрытия имеют основную перспективу практического внедрения: они стойки к внешним воздействиям (100% модуль упругости  $\sim 10^5$  Па), не порождают дополнительных мод неустойчивости (Reutov V. P., Rybushkina G. V. //Phys. Fluids, 1998), сравнительно дешевы в изготовлении. В такие покрытия также могут быть внедрены химически активные компоненты, препятствующие обрастанию корпуса судов. Результаты работы дали подтверждение применимости теории В.М. Кулика (Kulik V. M. //Int. J. Heat and Fluid Flow, 2012).

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Результаты работы важны для расширения знаний в классе связанных аэрогидроупругих задач. Новый эффект усиления колебаний цилиндра должен учитываться при проектировании конструкций, т.к. необходимо учитывать большую, чем ранее оценивалось, амплитуду колебаний цилиндра. Кроме того, естественно использовать описанный эффект при проектировании малых ветро- или гидроэнергетических установок, преобразующих энергию колебаний в электрическую.

В рамках исследований по податливым покрытиям была отработана методика для тестирования податливых покрытий, была частично подтверждена теория В.М. Кулика, предсказывающая параметры покрытия, при которых его воздействие на турбулентный пограничный слой наиболее эффективно. Хотя полученный экспериментальный результат показал повышение трения, полученные данные могут стать отправной точкой для создания базы данных покрытий и их влияния на турбулентный пограничный слой.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Для колебаний цилиндра вблизи пластины существуют зоны уменьшения и увеличения амплитуды по сравнению с амплитудой колебаний для одиночного цилиндра. Зафиксировано максимальное увеличение амплитуды на 39%.
2. Зона захвата (или синхронизации) частоты сдвигается в сторону больших скоростей и увеличивается в размерах, а частота схода вихрей с цилиндра уменьшается при уменьшении зазора между цилиндром и пластиной.
3. Оптимальное место плавающего элемента весов на экспериментальной модели определяется внешними градиентами давления. Сила, обусловленная давлением за счет неправильного выставления плавающего элемента (незаподлицо), оказывает существенное влияние на измеряемую величину: так, при выступе элемента на 0.5% от толщины турбулентного пограничного слоя ошибка будет составлять порядка 25%.



Увеличение зазоров уменьшает скорость роста ошибки как функции от размера выступа плавающего элемента.

4. Использование исследованной силиконовой резины дает повышение сопротивления до 6.5%, измеренного прямым взвешиванием модели с пластинами, а также до 4% при применении модифицированного метода Клаузера к профилям осредненной продольной скорости. Полученные результаты соответствуют предсказаниям теории.

#### **Методология и методы исследования.**

Для исследования колебаний упругого шнура вблизи пластины конечной ширины использовались экспериментальные методы: резиновый шнур устанавливался в рабочую часть аэродинамической трубы, скоростной режим контролировался ручным термоанемометром, показания которого были предварительно проверены с помощью термоанемометрической системы DISA 56C01 СТА. Для качественного описания колебаний в системе «шнур+пластина» производилась визуализация лазерным ножом (поток засеивался аэрозолем – сценическим дымом), количественное описание колебаний производилось лазерным триангуляционным датчиком высокой точности, частота схода вихрей фиксировалась термоанемометром постоянной температуры. Для определения коэффициента демпфирования из свободных затухающих колебаний шнура без потока использовалась математическая модель осциллятора с вязким трением.

Исследования взаимодействия податливых покрытий и турбулентного пограничного слоя производились экспериментально на гидродинамической трубе НИИ механики МГУ. Для оценки вклада силы трения на пластинах было численно смоделировано обтекание модели с твердыми гладкими пластинами в гидродинамической трубе на основе RANS-уравнений с моделью турбулентности  $k-\varepsilon$  в пакете ANSYS CFX, валидированное экспериментом. Прямое измерение силы сопротивления модели совершалось специально изготовленными однокомпонентными весами. Измерение

осредненной продольной скорости в турбулентном пограничном слое происходило лазерным доплеровским измерителем скорости. Для нахождения локального трения на модели использовался модифицированный метод Клаузера (также известный как метод диаграмм Клаузера). Численное моделирование обтекания различных конфигураций плавающего весового элемента производилось на основе RANS-уравнений в пакете ANSYS CFX, а подбор жесткости его элементов проводился с использованием численного моделирования нагружения линейно-упругого тела в пакете Abaqus.

### **Степень разработанности темы.**

Задачи о колебаниях упругого цилиндра обычно рассматривались в постановке изолированного колеблющегося тела (Williamson and Roshko (1988); Brika and Laneville (1993); Khalak and Williamson (1996, 1999); Zhou et al. (1999); Jauvtis and Williamson (2004), колебания вблизи или непосредственно за жестким цилиндром такого же размера (Assi et al. (2006), (2010)), вблизи плоскости (Yang et al. (2009) , Wang et al. (2013), Chung et al. (2016)), однако не рассматривались колебания цилиндра вблизи пластин конечных размеров.

В задаче о взаимодействии пограничного слоя с вязкоупругим покрытием был достигнут определенный успех в исследовании возможностей затягивания ламинарно-турбулентного перехода (Carpenter (1990), Бойко и др. (2011)), но в случае развитого турбулентного случая пока не удалось построить и верифицировать экспериментами теорию для нахождения снижающих сопротивление материалов. Несмотря на имеющиеся на данный момент эксперименты с твердыми монокристаллическими покрытиями, все еще нет систематических экспериментальных результатов для построения полуэмпирической теории взаимодействия (Kulik et al. (1991), K.-S. Choi et al. (1997), Vandyopadhyay et al. (2005), Кулик и др. (2018)), и важно проводить множество экспериментов, с отрицательными или положительными результатами по отношению к снижению сопротивления.

### **Достоверность и апробация работы.**

Достоверность результатов работы обусловлена использованием классических методов исследования в аэрогидродинамическом эксперименте; хорошей согласованностью полученных результатов, полученных лично автором, с данными других ученых в части исследования подобных конфигураций эксперимента; использованием откалиброванных и настроенных измерительных приборов и применения проверенных экспериментальных техник, согласованием численного моделирования и эксперимента.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных семинарах и международных и всероссийских научных конференциях: семинар по механике сплошных сред под руководством академика РАН А.Г. Куликовского, профессора В.П. Карликова, член-корр. О.Э. Мельника, профессора А.Н. Осипцова, семинар кафедры газовой и волновой динамики под руководством академика РАН Р.И. Нигматулина, проф. Н.Н. Смирнова, проф. А.В. Звягина; European Drag Reduction and Flow Control Meeting (Рим – 2017, Бад Херренальб – 2019), European Turbulence Conference (Стокгольм – 2017), Всероссийская конференция с международным участием «Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва» (Новосибирск – 2017), Всероссийская конференция молодых учёных-механиков (Сочи – 2017, 2020, 2021, 2023), Ломоносовские чтения (Москва – 2017, 2019, 2020, 2021), XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых (Новосибирск–Шерегеш – 2020), Конференция-конкурс молодых ученых НИИ механики МГУ (2020), XLVIII International Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics» (Санкт-Петербург, виртуально – 2020), ASME Pressure Vessels & Piping (виртуально – 2021), XII International Conference on Structural Dynamics (EuroDyn2023) (Делфт, 2023).

### **Публикации соискателя по теме диссертации.**

По результатам исследований опубликовано 4 работы общим объемом 5.2 п.л., в том числе 3 статьи (объемом 4.6 п.л.) в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.1.9 – "Механика жидкости, газа и плазмы" и индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus.

**Личный вклад.** Автор принимал личное участие в постановке задач и методе исследований. При непосредственном участии автора создавались либо модифицировались тестовые модели для аэро- и гидродинамической труб. Все экспериментальные исследования произведены лично автором либо при его непосредственном участии. Основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, сформулированы автором лично. Личный вклад автора в работах [1] составляет 1/2, в [2,3] – 3/4.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 105 страниц основного текста, 2 таблицы, 39 рисунков. Список использованной литературы включает 153 наименования.

### **Содержание**

Во **Введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели, ставятся задачи работы, показана научная новизна работы, ее научная и практическая значимость.

В **Главе 1** дан обзор литературы, состоящий из двух частей: первая посвящена резонансным колебаниям круглого, упруго закрепленного цилиндра в потоке жидкости или газа, вторая – проблеме снижения турбулентного трения вязкоупругими покрытиями и их взаимодействию с пограничным слоем.

В **Главе 2** обсуждаются вопросы методики измерений, которые производились в описываемых в диссертации экспериментах. В **разделе 2.1**

обсуждается нахождение величины демпфирования упругого резинового шнура. В **разделе 2.2** даются результаты применения лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) к измерению скорости и профилей пограничного слоя в гидродинамической трубе. **Раздел 2.3** посвящен нахождению локального трения из профиля осредненной скорости турбулентного пограничного слоя модифицированным методом Клаузера. В **разделе 2.4** даются результаты численного моделирования обтекания базовой модели с весами на основе «плавающего элемента», вычислены ошибки измерения трения для различных неправильных расположений элемента.

В **Главе 3** излагается суть исследований по аэроупругим колебаниям упругого шнура в потоке воздуха и их модификации с помощью постановки пластины конечной ширины вблизи от шнура.

В **разделе 3.1** описывается схема экспериментальной установки. Рассматривается обтекание упругого цилиндра – резинового круглого шнура 2 (**Рис.1**, слева), установленного в центре рабочей части аэродинамической трубы А4 НИИ механики МГУ, имеющей поперечное сечение 500x300 мм, вблизи пластины 1 или без нее. Изначальный диаметр  $D$  (в нерастянутом положении) шнура составляет 6.6 мм, в растянутом – 6 мм, причем для данного растяжения первая собственная частота равна 15.05 Гц. Пластина имеет длину 35 мм и толщину 2 мм, ее передняя и задняя кромки скруглены по эллипсу с полуосями 3 и 1 мм. Характерные резонансные скорости находятся в диапазоне 0.4–0.6 м/с или числам Рейнольдса 180–260. Измерения скорости производились ручным термоанемометром RZ GM8903, амплитуды колебаний – триангуляционным лазерным датчиком 3 модели Riftek RF-603, измерение частоты схода вихрей – термоанемометром постоянной температуры DISA 55D05 с одноточечным датчиком 55P81. Визуализация производилась лазерным ножом 4 с помощью дымогенератора и скоростной камеры 5.

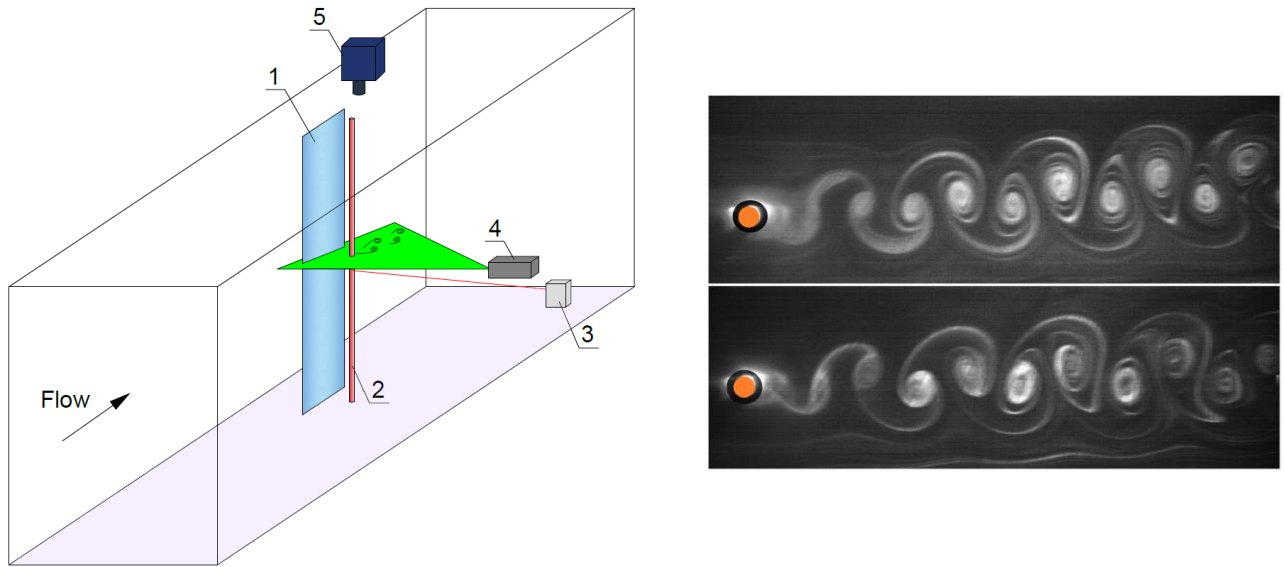


Рис.1. Схема расположения шнура и пластины в рабочей части аэродинамической трубы (слева) и визуализация вихревой дорожки за неподвижным жестким цилиндром (справа сверху) и колеблющимся (справа снизу).

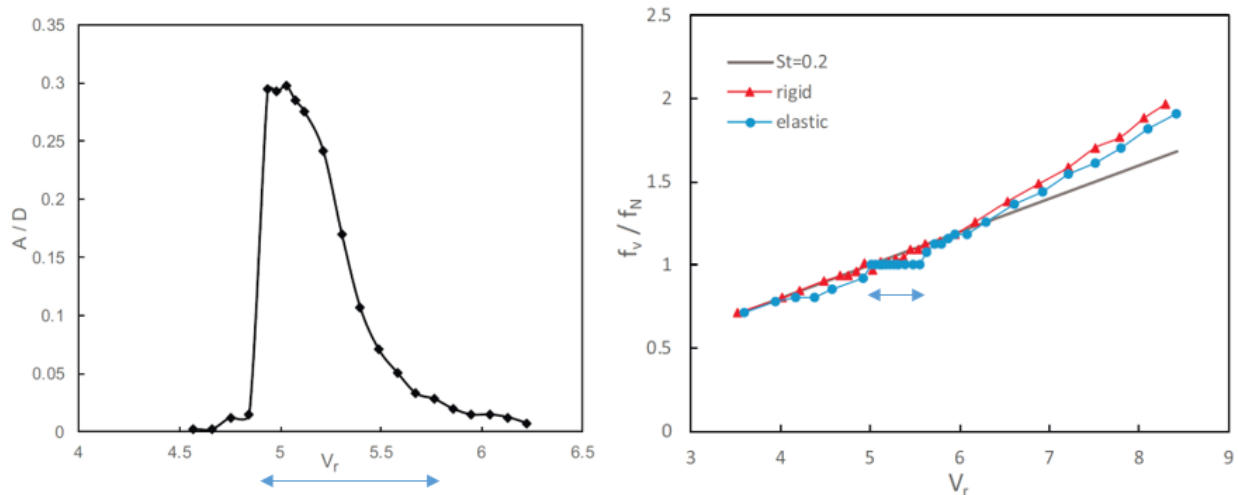


Рис.2. Амплитуда колебаний одиночного шнура (слева) и частота схода вихрей с него, в зависимости от приведенной скорости потока. Двойной стрелкой обозначен интервал синхронизации частоты.

В разделе 3.2 описаны результаты, полученные при обтекании одиночного цилиндра. Для него было получено (Рис.2), что относительная амплитуда колебаний  $A_0/D$  достигает максимума 0.3 для значения приведенной скорости  $V_r = V/(fD) \sim 5$ , где  $f$  – частота колебаний цилиндра.

Следует отметить, что амплитуда колебаний зависит от конструкционного демпфирования в системе и отношения плотности материала цилиндра к плотности воздуха. Зависимость амплитуды от скорости, приведенная на Рис.2, достаточно типична для рассматриваемой задачи и характерна для колебаний цилиндров в воздухе (Skop R.A., Griffin O.M. //J. Sound and Vibration, 1973).

Сравнение визуализаций течения за упругим осциллирующим и жестким покоящимся цилиндрами (Рис. 1, справа) не выявило качественных изменений с точностью до небольших искажений вихревой дорожки.

В разделе 3.3 описывается вторая серия экспериментов, в котором в рабочей части аэродинамической трубы была установлена под нулевым углом атаки жесткая металлическая пластина, описанная выше. Для удобства введем систему координат (Рис.3), связанную с задней кромкой пластины (ЗКП):  $S = \text{spacing}$  – смещение центра цилиндра по потоку относительно ЗКП,  $G = \text{gap}$  – величина зазора в поперечном расстоянии между поверхностями пластины и цилиндра.

Были произведены измерения амплитуд колебаний цилиндра в зависимости от скорости набегающего потока и взаимного расположения цилиндра и пластины (т.к. от  $S$  и  $G$ ).

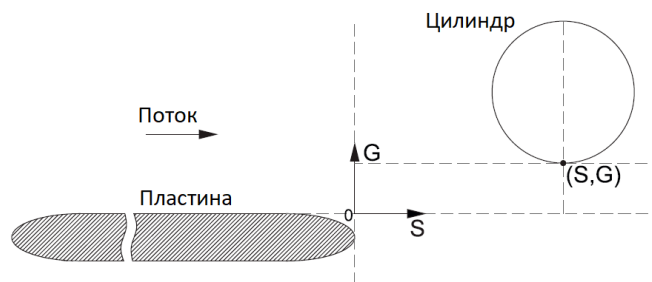


Рис.3. Введение системы координат  $(S,G)$ .

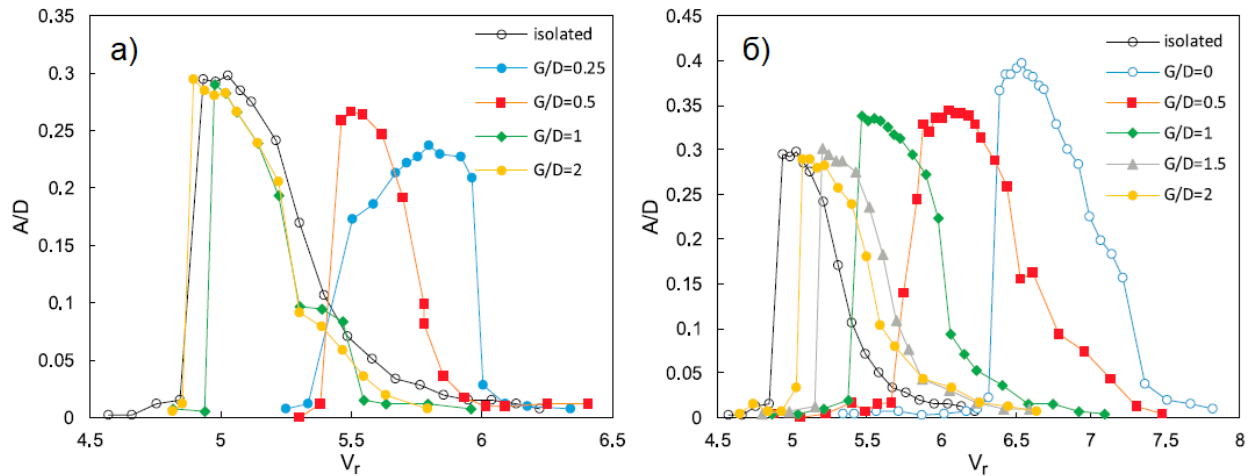


Рис.4. Влияние зазора и смещения на амплитуду колебаний и зону захвата частоты. а) смещение фиксировано,  $S/D = -2.2$ ; б)  $S/D = 0.5$ ; Черная кривая с полыми кругами – амплитуда колебаний для одиночного цилиндра.

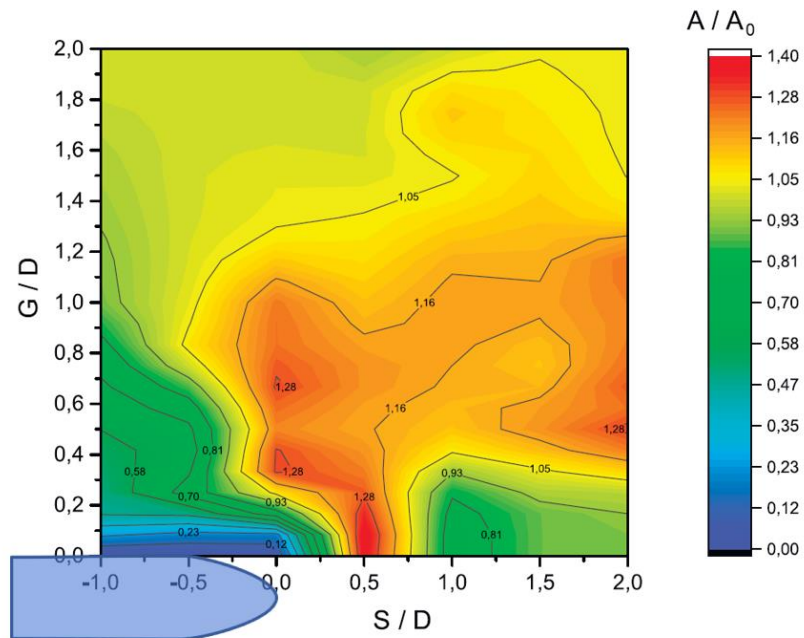


Рис.5. Тепловая карта приведенной амплитуды колебаний цилиндра в зависимости от  $S$  и  $G$ . Синим полупрозрачным цветом обозначено положение пластины.

Если  $S < 0$  (Рис. 4а), что соответствует случаю нахождения цилиндра «над» пластиной, то осциллирующий цилиндр демонстрирует поведение, характерное для исследованных ранее в литературе случаев расположения



вблизи бесконечной плоскости, при уменьшении зазора максимальная амплитуда колебаний также уменьшается. В случае, когда центр цилиндра находится в непосредственной близости к ЗКП, наблюдается новое явление – увеличение амплитуды колебаний цилиндра по сравнению с амплитудой одиночного цилиндра. Так для  $S/D = 0.5$  (Рис. 4б) наблюдается увеличение амплитуды для всех зазоров, причем чем меньше  $G$ , тем эффект выражен сильнее. Максимум достигается для точки  $G/D=0.083$ , где относительное увеличение амплитуды  $(A-A_0)/A$  равно 39.2%.

Все результаты измерений максимальных амплитуд колебаний при различных  $S$  и  $G$  суммированы на Рис.5. Как видно, существует достаточно протяженная область, где колебания ощутимо интенсивней, чем колебания одиночного цилиндра.

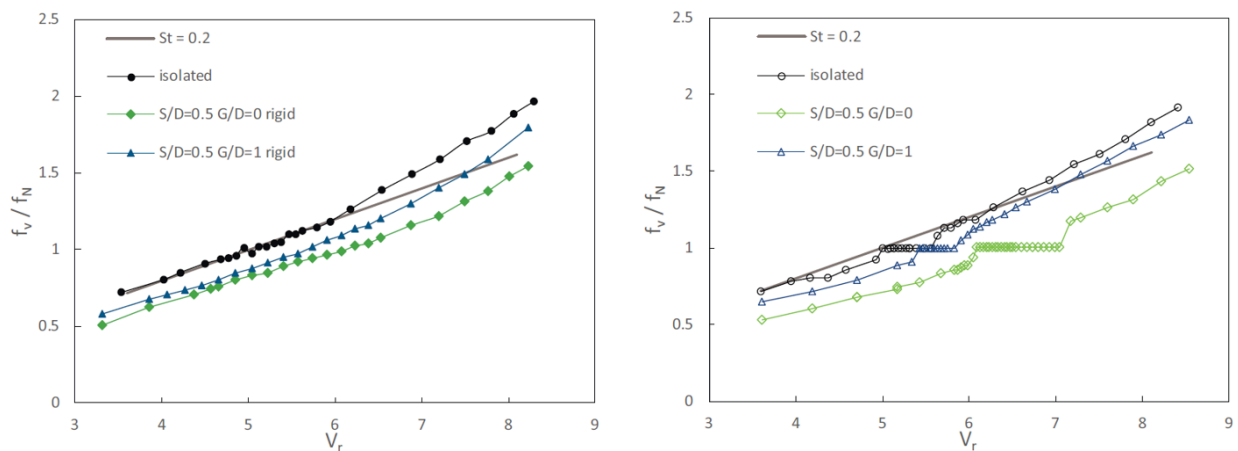


Рис.6. Частота схода вихрей, отнесенная к первой собственной частоте шнура, в зависимости от скорости и положения цилиндра. Слева – результаты для жесткого цилиндра, справа – для упругого шнура. Прямая линия –  $St=0.2$ .

Еще одним важным обнаруженным эффектом является нахождение сдвига диапазона синхронизации в сторону больших скоростей, а также отклонением частоты схода вихрей от линии, на которой число Струхалия  $St$  равно 0.2. При  $S < 0$  этот эффект не столь выражен, как для  $S > 0$ , для которых он существенен. Это может быть важно при проектировании ветрогенераторов или конструкций, в которых, например, тросы, ванты, колонны могут

располагаться вблизи от края стены, скалы и т.п., т.к. диапазон желаемых или, наоборот, нежелательных колебаний будет располагаться при других скоростях, если пользоваться теорией для изолированного цилиндра.

Серьезное влияние пластина оказывает и на характер вихревой дорожки. При измерении частоты схода вихрей с цилиндра было отмечено, что частота перестает подчиняться закону Струхала  $St=0.2$  (Рис.6) и уменьшается при уменьшении зазора, причем это верно как для твердого неколеблющегося цилиндра, так и для упругого.

**Глава 4** посвящена проблеме снижения трения в турбулентном пограничном слое вязкоупругими покрытиями и проведенным автором экспериментам на гидродинамической трубе.

Нормальная компонента динамической податливости

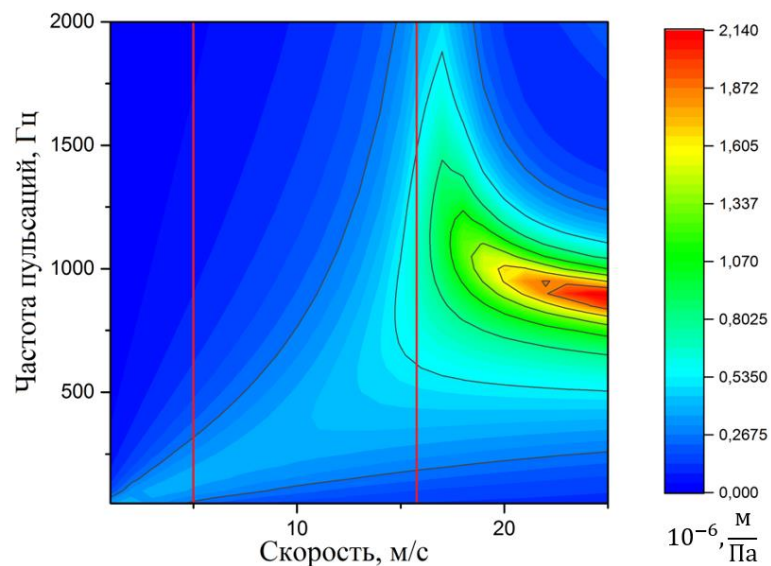


Рис.7. Значения нормальной динамической податливости в зависимости от частоты турбулентном пульсаций и скорости.

В разделе 4.1 дано описание экспериментальной установки, тестовой модели и тестовых пластин. Эксперименты проходили на гидродинамической трубе НИИ механики МГУ с рабочей частью длиной 2000 мм и сечением 1000x120 мм. Модель имела форму двумерного симметричного крыла длиной

1190 мм, шириной 100 мм и высоту 119 мм. На плоской секции модели возможно было закреплять последовательно по две тестовые пластины размером 300x119 мм с каждой стороны. В экспериментах изучалось влияние кремнийорганической резины Mold Max 10 на изменение трения. Резиновый слой пластин имел толщину 4, 6, 8 и 10 мм, зависимости модуля упругости и коэффициента потерь от частоты возмущения для данного материала были ранее измерены и задокументированы.

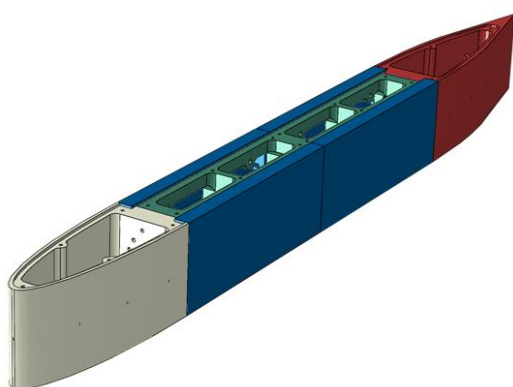


Рис.8. Тестовая модель. Синим цветом выделены тестовые пластины.

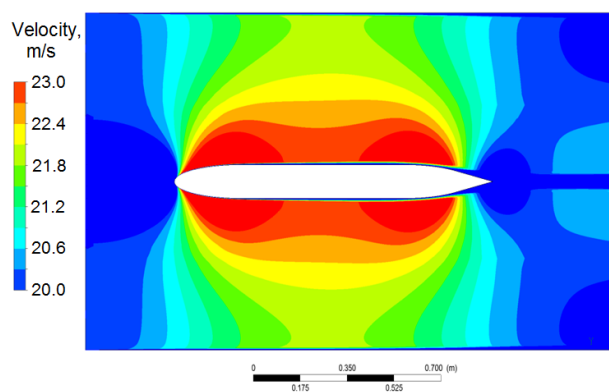


Рис.9. Поле скоростей рядом с тестовой моделью,  $V = 20$  м/с.

В разделе 4.2 дано изложение предсказаний теории В.М. Кулика (V.M. Kulik. // Heat and Fluid Flow, 2012) для данного материала покрытий. Типичная картина значения податливости, т.е. деформационного отклика на воздействие пульсацией давления, приведена на Рис.7 в зависимости от частоты пульсаций давления и скорости внешнего потока. Видно, что область наибольшего взаимодействия потока и покрытия находится при скоростях более 15 м/с: в районе 17.5 м/с идет взаимодействие по широкому диапазону частот (назовем режим «широкополосным»), а при скоростях более 20 м/с наблюдается резонансное взаимодействие («резонансный» режим): податливость достигает наибольших значений для частот порядка 800–900 Гц. Отметим, что теория не дает предсказания, какого качества будет

взаимодействие: оно может приводить как к снижению трения, так и к повышению, показать действительный его характер должен эксперимент или усовершенствованная теория.

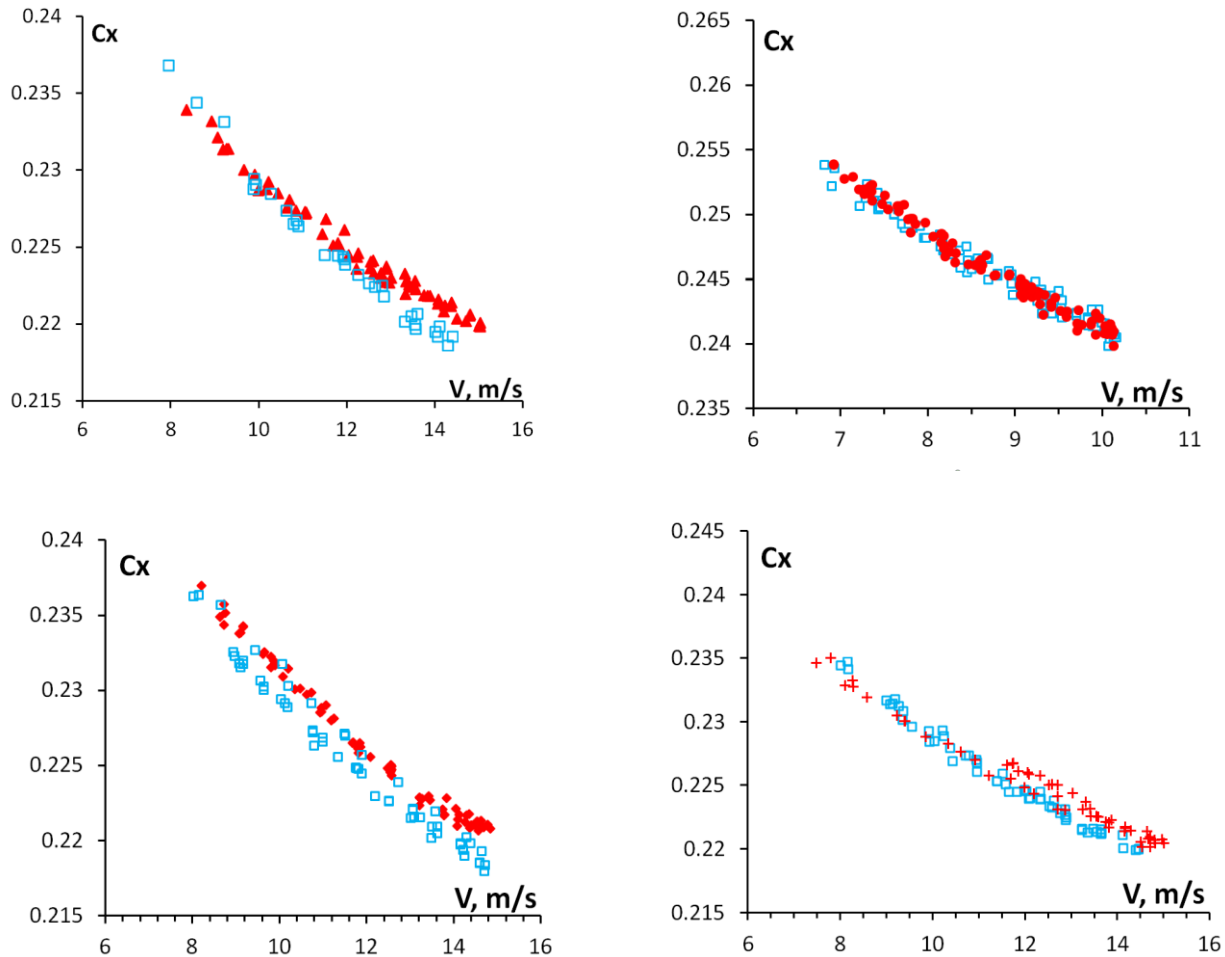


Рис. 10. Коэффициент полного сопротивления для металлических пластин (квадраты) и покрытий: 4 мм (треугольники), 6 мм (кружки), 8 мм (ромбы), 10 мм (кресты).

В разделе 4.3 описаны эксперименты, в которых с помощью однокомпонентных тензометрических весов находилась сила сопротивления модели, имеющей форму симметричного крыла (Рис.8). Для определения вклада сил трения на тестовых пластинах в силу общего сопротивления была проведена серия численных моделирований течения в гидродинамической трубе с установленной моделью (Рис.9), откуда было получено, что для

скоростей 5–20 м/с этот вклад составляет около 19%. Поэтому, например, снижение трения на пластинах в 5% приведет к соответствующему изменению на 0.95% в полной силе сопротивления.

Были произведены тесты (Рис.10) на скоростях воды 7–15 м/с (соответствующие числа Рейнольдса, рассчитанные по длине модели, равны  $(7.3–15.7) \times 10^6$  ( $7,3–15,7$ )  $\times 10^6$ ) с пластинами с покрытиями и с эталонными металлическими пластинами. Результаты этих тестов показывают увеличение безразмерного коэффициента трения  $C_x = 2F / \rho V_\infty^2 S$  ( $S$  – площадь миделевого сечения модели) – 2–6.5%.

**Раздел 4.4** посвящен измерениям лазерным доплеровским измерителем скорости (ЛДИС). Определялись профили продольной скорости турбулентного пограничного слоя над тестовыми пластинами, из которых с помощью модифицированного метода Клаузера (Rodríguez-López et al. //Exp. Fluids, 2015) определялись коэффициенты локального трения. На расстоянии 29 мм вниз по потоку от кромки носа предварительно была закреплена эпоксидным пластилином по всей своей длине турбулизирующая проволока диаметром 1 мм для того, чтобы получить развитый турбулентный пограничный слой над второй тестовой пластиной. Измерения пограничных слоев происходили в точках  $x=358, 458, 558$  мм от кромки первой тестовой пластины (или 594, 694, 794 мм от турбулизатора). Преимущественно измерения были сделаны в первой точке, т.к. в ее окрестности градиент давления наиболее мал (безразмерный градиент давления  $\delta^* \nabla p / \tau$ , где  $\delta^*, \tau$  – толщина вытеснения пограничного слоя и осреднённое трение на стенке, соответственно, имеет порядок  $5 \times 10^{-2}$ ). Для нахождения локального трения использовался метод Клаузера, а именно, минимизировалась ошибка между профилем скорости Маскера и экспериментальными точками. Константы логарифмического закона  $k, B$  принимались равными 0.41 и 5, соответственно.

Полученные коэффициенты локального трения  $\Sigma_x$  для покрытий различной толщины в зависимости от числа Рейнольдса  $Re_2 = V_\infty \theta / \nu$ , вычисленного по толщине потери импульса  $\theta$ , приведены на Рис.11. Сплошная линия соответствует формуле  $\Sigma_x = 0.0256 (Re_2)^{-1/4}$ , справедливой для абсолютно жесткой пластины. Было получено, что покрытия разной толщины увеличивают трение вплоть до 4%.

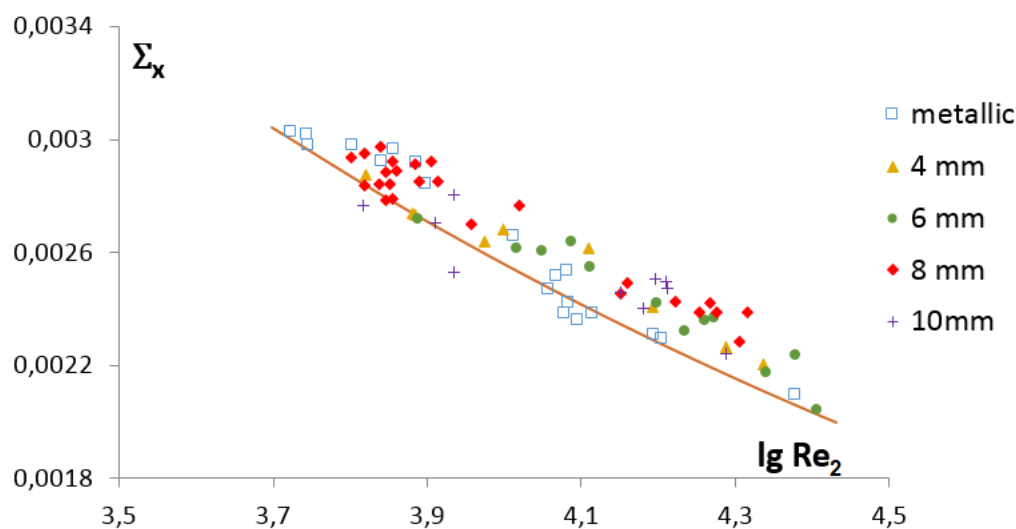


Рис.11. Зависимость безразмерного коэффициента трения от числа Рейнольдса, вычисленного по толщине потери импульса.

В разделе 4.5 сравниваются результаты двух этапов измерений, обсуждается их взаимосвязь с теоретическими предсказаниями. В проведенных экспериментах удалось достичь скоростей, захватывающих начало «широкополосного» режима взаимодействия (режим рабочих скоростей показан двумя вертикальными прямыми на Рис.7). Было обнаружено существование такого взаимодействия: измерения трения, проведенные первым и вторым способом, дают одинаковый результат – повышение трения. Можно утверждать, что получено согласие между теорией и экспериментом.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

### **Основные результаты и выводы диссертации**

1. Экспериментально исследованы колебания одиночного упругого цилиндра в потоке воздуха. Полученные зависимости амплитуды колебаний и частоты схода вихрей для колеблющегося и неподвижного цилиндров согласуются с ранее известными результатами.
2. Для конфигурации, в которой вблизи с колеблющимся упругим цилиндром находится пластина конечной ширины, наряду с ранее наблюдавшимся уменьшением амплитуды колебаний при уменьшении зазора между поверхностями цилиндра и пластины, обнаружен противоположный эффект усиления колебаний, причем амплитуда в определенной точке была на 39% больше, чем максимальная амплитуда для изолированного одиночного цилиндра.
3. Была создана тестовая база для исследования податливых покрытий. Проведенные исследования по взаимодействию податливых покрытий разной толщины двумя способами показали согласованные результаты по увеличению локального трения: первым способом на 4–6.5%, вторым – на 1–4%.
4. Получено подтверждение теории В.М. Кулика, описывающей взаимодействие вязкоупругого слоя с турбулентным пограничным слоем.

## Публикации автора по теме диссертации.

**Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus:**

1. *Ivanov O.O., Vedeneev V.V.* Vortex-induced vibrations of an elastic cylinder near a finite-length plate // *Journal of Fluids and Structures*. – V. 107. – 2021. – 103393. – DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2021.103393. Impact factor SJR: 1.154. (2.4 п.л. / авторский вклад 1.2 п.л.)
2. *Ivanov O.O., Vedeneev V.V.* Influence of Finite-Length Plate Proximity on Vortex-Induced Vibrations of Elastic Cable // *Proceedings of the ASME 2021 Pressure Vessels & Piping Conference. Volume 3: Fluid Structure Interaction; High Pressure Technology*. – DOI: 10.1115/PVP2021-62812. Impact factor SJR: 0.224. (1.1 п.л. / авторский вклад 0.83 п.л.)
3. *O. O. Ivanov, V. V. Vedeneev, V. M. Kulik, and A. V. Boiko.* The influence of compliant coatings on skin friction in the turbulent boundary layer // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – V. 894. – 012036. – DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012036. Impact factor SJR: 0.210. (1.2 п.л./ авторский вклад 0.9 п.л.)

## Другие научные труды

1. *Иванов О.О.* Экспериментальное исследование колебаний упругого цилиндра вблизи пластины конечной ширины // *Труды конференции-конкурса молодых ученых 20 - 22 октября 2020 г.* Издательство Московского университета. – 2020. – С. 90-97. (0.5 печ.л. / авторский вклад 0.5 п.л.)