

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Люсин Виталий Дмитриевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛОПИРУЮЩИХ ТЕЛ**

Специальность 01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2014

Работа выполнена на кафедре гидроаэромеханики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник кафедры гидроаэромеханики СПбГУ Рябинин Анатолий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Емельянов Владислав Николаевич, заведующий кафедрой плазмогазодинамики и теплотехники БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова

кандидат физико-математических наук, Соловьев Сергей Юрьевич, заместитель начальника отделения гидродинамики ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Защита состоится « » 2014 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.30 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

Автореферат разослан « » 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.232.30, д.ф.-м.н., проф.

Кустова Е. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Некоторые плохообтекаемые тела могут совершать колебания в потоке газа или жидкости. Одной из причин этих колебаний может служить галопирование. Оно обусловлено специфическими зависимостями аэродинамических сил от углов атаки, определяющих ориентацию тела относительно потока. Эксперименты показывают, что некоторые плохообтекаемые тела, двигаясь поперек потока газа или жидкости, подвергаются воздействию аэродинамической силы, действующей в том же направлении, что и проекция скорости тела на перпендикулярное потоку направление. Если рассмотреть систему из упруго закрепленного плохообтекаемого тела, обдуваемого потоком газа или жидкости, то аэродинамические силы не будут являться консервативными и могут приводить к изменению полной энергии системы. А так как направление скорости и аэродинамической силы совпадают, то это будет приводить к набору энергии системой и увеличению амплитуды колебаний.

Актуальность исследования аэродинамики плохообтекаемых тел обоснована, в первую очередь, широкой распространенностью объектов подобных форм в реальных условиях. Примером таких объектов, регулярно подвергающихся ветровой нагрузке или нагрузке водных течений, могут служить различные трубопроводы, мосты,obelisks и дымовые трубы, кабели и тросы. В большинстве случаев эффекты от воздействия потока газа или жидкости на плохообтекаемое тело являются нежелательными и могут приводить, в частности, к разрушениям строительных конструкций и мостов. Наиболее известной катастрофой является обрушение моста Такома Нерроуз. Таким образом, учет влияния ветровой нагрузки на плохообтекаемые тела необходим еще на стадии проектирования различных сооружений.

Цель работы

Представляемая диссертационная работа направлена на

1. анализ влияния удлинения плохообтекаемого тела на его аэродинамические характеристики и склонность к колебаниям;
2. разработку универсальной модели аэроупругого галопирования, позволяющую учитывать специфику тел малого удлинения;
3. получение данных об аэродинамических характеристиках цилиндров с плавными обводами и расчет их режимов колебаний.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. впервые проведены исследования прямоугольных призм различного удлинения на предмет их склонности к галопированию, сделаны выводы о влиянии удлинения призм на их склонность к колебаниям и амплитуду колебаний;
2. исследовано влияние концевых шайб на аэродинамические характеристики тела и склонность к галопированию;
3. разработана новая модель аэроупругого галопирования, учитывающая специфику тел малого удлинения;
4. экспериментально обнаружено наличие двух режимов обтекания у прямоугольного цилиндра с закругленными кромками;
5. разработана модель галопирования тела с двумя режимами обтекания в состоянии покоя.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов обуславливается корректностью поставленных экспериментов, а также сравнением результатов, полученных с помощью модельных расчетов, и экспериментальных результатов.

Практическая ценность работы

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

1. предложенная в работе модель аэроупругого галопирования качественнее приближает экспериментальные данные о аэродинамических силах и точнее рассчитывает амплитуды установившихся колебаний, новая модель позволяет учитывать различные особенности аэродинамических характеристик плохобтекаемых тел;
2. модель галопирования тела с двумя режимами обтекания в состоянии покоя дает возможность, по крайней мере, в некотором диапазоне чисел Рейнольдса, найти режимы установившихся колебаний;
3. все полученные зависимости амплитуд колебаний от скоростей набегающего потока представлены в безразмерном виде, что позволяет переносить результаты на реальные объекты с соблюдением критериев подобия.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально полученные зависимости коэффициента нормальной силы от угла атаки призм различного удлинения.
2. Математическая модель аэроупругого галопирования тел малого удлинения и ее экспериментальная проверка.
3. Результаты экспериментального изучения влияния концевых шайб на галопирование призм.
4. Обнаружение двух режимов обтекания цилиндра с криволинейными кромками.
5. Математическая модель галопирования тела с двумя режимами обтекания.

Апробация работы

Результаты работы обсуждались на:

1. Всероссийской конференции «Прикладные аспекты механики сплошной среды в кораблестроении». Санкт-Петербург, июнь 2010 г.
2. XXII юбилейном семинаре с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям. Санкт-Петербург, июнь 2010 г.
3. Международной конференции по механике и баллистике «VII Окуневские чтения». Санкт-Петербург, июнь, 2011 г.
4. Международной конференции по механике «VI Поляховские чтения». Санкт-Петербург, февраль, 2012 г.
5. Международной конференции по механике и баллистике «VIII Окуневские чтения». Санкт-Петербург, июнь, 2013 г.
6. Научных семинарах лаборатории аэродинамики СПбГУ.

Публикации по теме диссертации

Содержание диссертации опубликовано в восьми работах, в том числе в двух статьях [5,6] в журналах из списка ВАК.

В работах [5,6,7,8] соавтору Рябинину А. Н. принадлежат: постановка задачи, участие в планировании эксперимента и в выборе математической модели галопирования.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 70 наименований и приложения. Работа изложена на 88 страницах машинописного текста и содержит 11 таблиц и 29 рисунков.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы, ее научное и практическое значение. Описан вклад других авторов в развитие тематики. Сформулированы: цель работы, метод исследования и положения выносимые на защиту.

Первая глава посвящена постановке задачи чистого аэроупругого галопирования и получению экспериментальных данных, необходимых для расчета амплитуд установившихся колебаний.

В параграфе 1.1 изложена классическая модель аэроупругого галопирования, предложенная Паркинсоном и его соавторами. Задача чистого галопирования ставится следующим образом. Рассмотрим плохообтекаемое тело (например прямоугольную призму), способную перемещаться только в вертикальном направлении перпендикулярно набегающему потоку (рис. 1). Призма обдувается ровным потоком, скорость которого v направлена по оси x перпендикулярно оси y , вдоль которой может колебаться призма. Призма удерживается упругой подвеской с жесткостью k и с вязким демпфированием, которому соответствует тормозящая сила $r\dot{y}$, всегда направленная противоположно скорости призмы \dot{y} . При движении призмы поперек потока ее скорость относительно среды v_r направлена под некоторым углом относительно фронтальной поверхности призмы. Таким образом, угол атаки меняется в зависимости от собственной скорости тела и скорости потока. Это приводит к изменению аэродинамической силы действующей на призму.

Некоторые плохообтекаемые тела имеют специфические зависимости аэродинамических сил от углов атаки. Это приводит к тому, что при колебаниях аэродинамическая сила будет направлена в ту же сторону, что и собственная скорость призмы. Эта сила будет совершать положительную работу и наращивать энергию упругой системы и, как следствие, увеличивать амплитуду колебаний.

Классическая модель основывается на квазистатическом приближении. Предлагается в уравнении движения колеблющегося тела аэродинамические силы, действующие на него, заменить силами, действующими на такое же тело, но стационарно закрепленное, при соответствующих углах атаки. Для

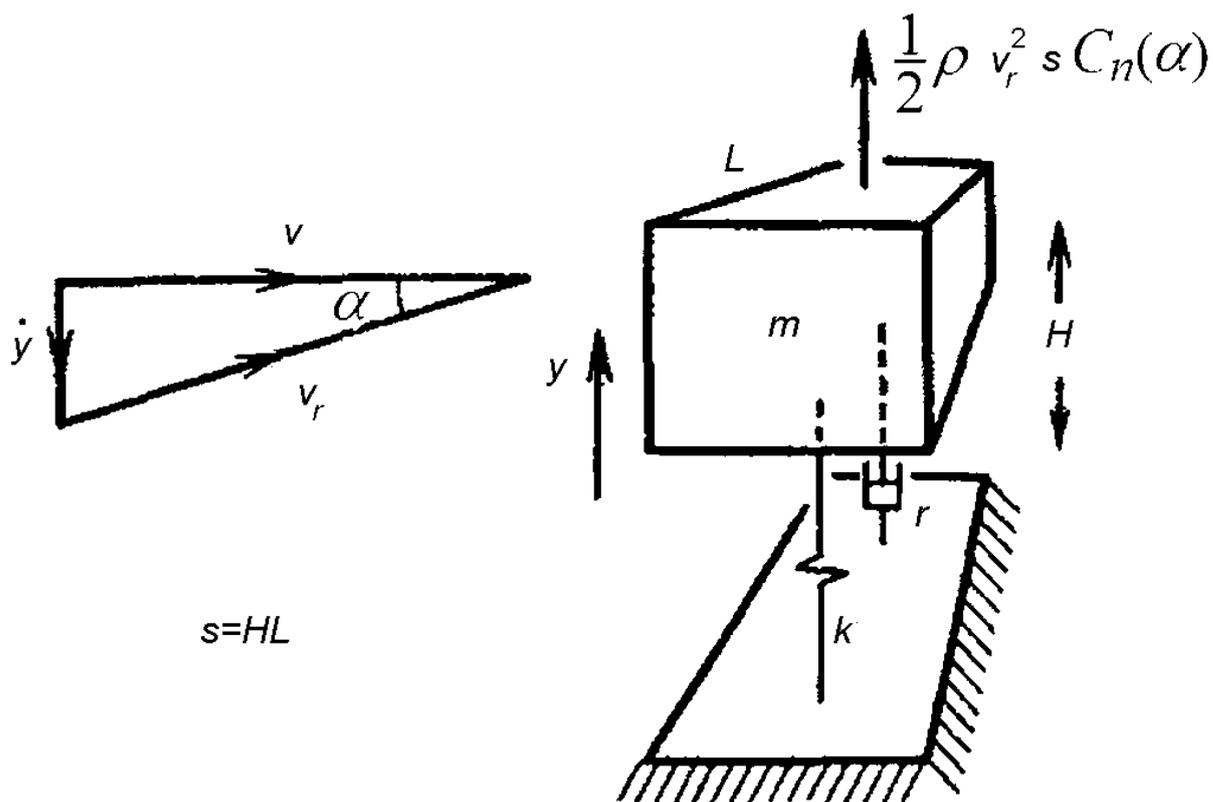


Рисунок 1. Схема размещения призмы на упругой подвеске в потоке газа.

решения уравнения движения используется метод Крылова-Боголюбова

Для расчетов амплитуд колебаний с использованием данной модели в параграфе 1.2 проведены эксперименты по измерению аэродинамических сил, действующих на призмы различных удлинений. Рассчитаны коэффициенты нормальных составляющих аэродинамических сил C_n для различных призм в необходимом диапазоне углов атаки. Сделаны выводы о влиянии удлинения на аэродинамические характеристики прямоугольных призм. Выдвинуто предположение о наличии критического удлинения.

В параграфе 1.3 описаны эксперименты над призмами, оснащенными концевыми шайбами. Отмечено качественное отличие полученных результатов от результатов в экспериментах без шайб. Наличие «ступеньки» на графике зависимости C_n от $\text{tg}(\alpha)$ (рис. 2) является характерным отличием призм с концевыми шайбами, которое не удалось получить простым изменением

удлинения в пределах от 1 до 20. Отмечается, что полученные результаты хорошо согласуются с работами других авторов.

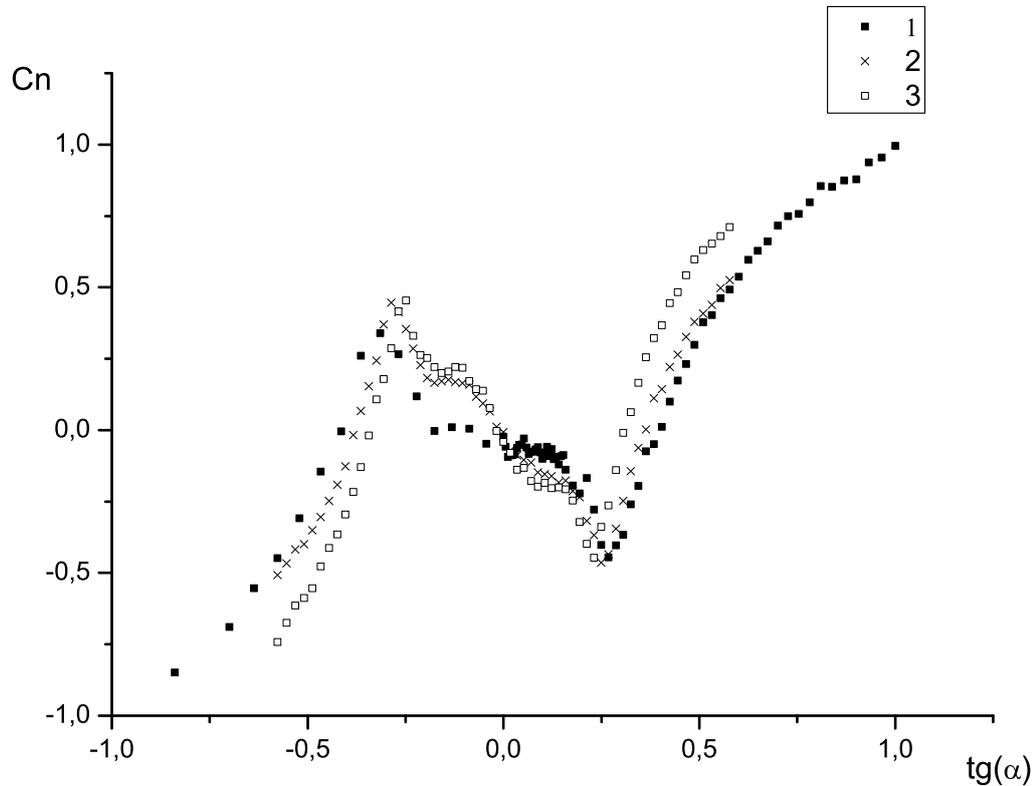


Рисунок 2. C_n для призмы удлинения $\lambda = 20$.
1 - Без шайб. 2 - С шайбами диаметром $3.07H$. 3 - С шайбами диаметром $4.33H$.

Вторая глава посвящена разработке новой модели аэроупругого галопирования, расчетам зависимостей амплитуд колебаний призм различного удлинения от скорости набегающего потока и экспериментальной проверке полученных результатов.

В параграфе 2.1 предложена новая модель аэроупругого галопирования, учитывающая специфику призм малого удлинения. Новая аппроксимация позволяет качественнее приближать экспериментальные данные. Получены готовые алгебраические уравнения для амплитуды колебаний (A), в которые параметром входит скорость набегающего потока (ν), позволяющие строить зависимости A от ν .

В параграфе 2.2 обоснованы преимущества новой аппроксимации по сравнению с полиномиальной используемой в классической модели. При помощи новой модели и экспериментальных данных, полученных в предыдущей главе, рассчитаны режимы колебаний для призм различного удлинения (рис. 3).

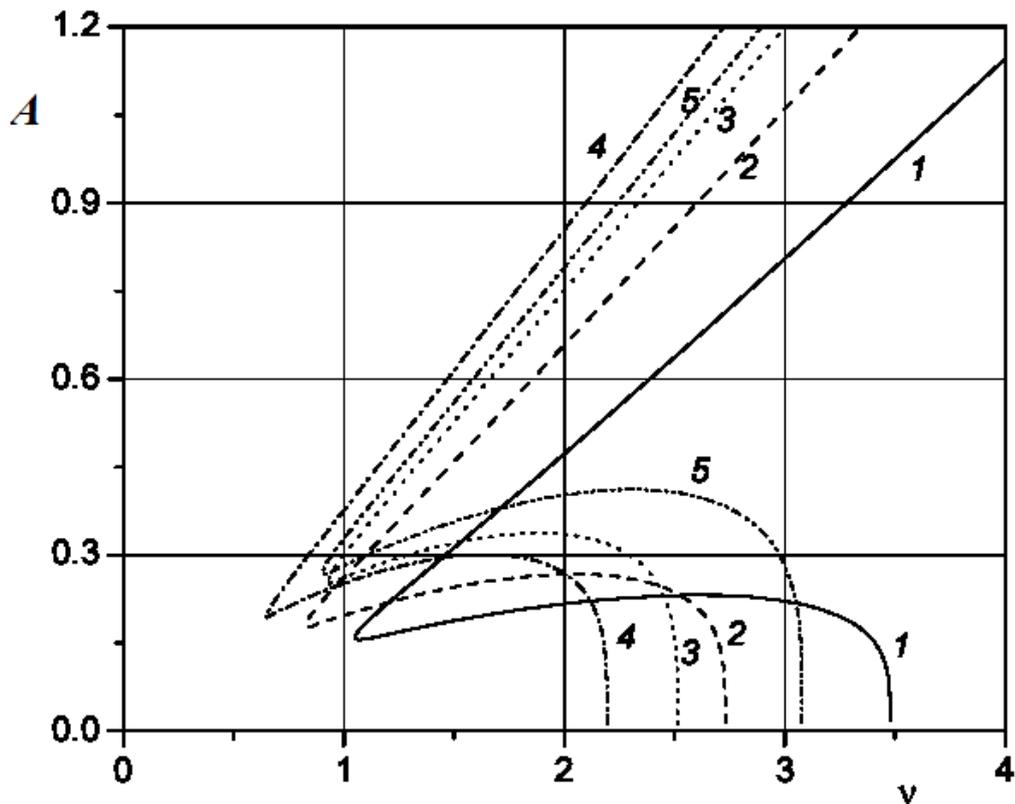


Рисунок 3. Амплитуда установившихся колебаний для призм различного удлинения.
 $1 - \lambda = 1$, $2 - \lambda = 3$, $3 - \lambda = 5$, $4 - \lambda = 10$ и $5 - \lambda = 20$.

Амплитуда установившихся колебаний при большой скорости потока растет с увеличением удлинения от $\lambda = 1$ до $\lambda = 10$. Однако, далее этот рост прекращается, и начинается обратный процесс, амплитуда колебаний призмы с удлинением 20 меньше, чем призмы с удлинением 10. Критическая скорость (скорость набегающего потока при превышении которого положение равно-

весия упруго закрепленного тела перестает быть устойчивым) уменьшается с ростом удлинения до 10 и затем увеличивается. Подтверждена гипотеза о наличии критического удлинения.

Было выяснено, что призмы малых удлинений не могут совершать колебаний с малыми амплитудами при малом превышении критической скорости набегающего потока. Критическая скорость для призм малого удлинения является правой границей области гистерезиса (диапазон скоростей, где существует два устойчивых решения уравнения движения). Оснащение призм концевыми шайбами, препятствующими перетеканию воздуха через торцы, изменяет зависимость коэффициента нормальной силы от угла атаки в области малых углов атаки. Следствием является необходимость введения дополнительного члена в аппроксимацию коэффициента нормальной силы. Критическая скорость уменьшается, уменьшается также диапазон скоростей потока, в котором существует гистерезис. Левая граница области гистерезиса лежит правее критической скорости. Призма, оснащенная концевыми шайбами, может совершать колебания с малыми амплитудами при малом превышении критической скорости набегающего потока.

Результаты, полученные с помощью предложенной аппроксимации зависимости коэффициента нормальной силы от угла атаки и последующего применения метода Крылова-Боголюбова, хорошо соответствуют результатам, полученным непосредственным численным решением уравнений движения методом Рунге-Кутты, таким образом, принятая аппроксимация является удовлетворительной.

В параграфе 2.3 описан эксперимент по измерению амплитуды колебания призмы, упруго закрепленной в аэродинамической трубе. Полученные данные были переведены в безразмерные координаты и наложены на графики зависимостей амплитуды колебаний от скорости набегающего потока. Экспе-

римент подтвердил корректность результатов, полученных при помощи модели.

Третья глава посвящена цилиндрам с плавными обводами. Их форма близка к форме вагонов подвесных канатных дорог, которые могут совершать колебания под действием ветра.

В параграфе 3.1 изложен эксперимент по измерению коэффициента нормальной силы C_n при различных углах атаки. Был обнаружен эффект наличия двух режимов обтекания в состоянии покоя в некотором диапазоне углов атаки. Это привело к невозможности использовать классическую модель аэроупругого галопирования, так как нарушалось предположение о том, что аэродинамические силы зависят только от углов атаки.

Новая модель галопирования тел, имеющих два режима обтекания в состоянии покоя, предложенная в параграфе 3.2, использует эмпирическое предположение о установлении режима обтекания. Оказалось, что для любого из исследованных цилиндров (удлинения 2, 4 и 8) существует два критических угла атаки, при переходе через которые происходит смена режима обтекания. Эти углы являются границами области наличия двух режимов обтекания. Таким образом, первый режим обтекания устанавливается, если в процессе движения тела угол атаки был малым и, постепенно увеличиваясь, пересек нижнюю границу зоны двурежимности, второй, наоборот, если угол атаки был большим и, постепенно уменьшаясь, пересек верхнюю границу. Стоит отметить, что изменение угла атаки в пределах области наличия двух режимов никак не влияет на переход от одного к другому вне зависимости от динамики изменения угла атаки. Режим может смениться только если угол атаки покинет область двурежимности и затем вернется в нее снова. Основываясь на этом предположении мы можем вычислить аэродинамическую силу колеблющегося тела в любой момент времени, если знаем историю движения.

Дифференциальное уравнение амплитуды (1), получаемое после применения процедуры Крылова-Боголюбова предлагается решать при помощи метода Рунге-Кутты. Интеграл в правой части вычислялся численно, при этом программа автоматически меняла подынтегральную функцию, в том случае если изменения параметра приводило к смене режима обтекания.

$$\frac{1}{2} \frac{dA^2}{d\tau} = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A \sin(\xi) F(-A \sin(\xi)) d\xi \quad (1)$$

При помощи этой модели получены зависимости амплитуд колебаний от скорости набегающего потока для цилиндров различного удлинения. Выяснилось, что в отличие от прямоугольных призм, удлинение цилиндров практически не влияет на максимальную амплитуду колебаний. Однако, удлинение оказывает существенное влияние на критическую скорость. Увеличение удлинения ведет к уменьшению критической скорости. В этом цилиндры с плавными обводами схожи с прямоугольными призмами. Призма удлинения 2 вообще не имела критической скорости и положение равновесия для нее всегда было устойчивым. Прямоугольных призм, обладающих такими свойствами, не было обнаружено.

Числа Рейнольдса оказывают существенное влияние на аэродинамические свойства плохообтекаемых тел. Особенно хорошо это прослеживается на примере тел не имеющих острых кромок, так как у них нет фиксированных точек отрыва потока. В параграфе 3.3 описан эксперимент по измерению коэффициента C_n у цилиндра удлинения 4 при разных скоростях потока. Таким образом изменялось число Рейнольдса. Был предложен иной подход по измерению аэродинамических сил, так как механические весы, при низких скоростях, давали большую погрешность.

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента C_n от тангенса угла атаки при различных числах Рейнольдса. Главным отличием в результатах является

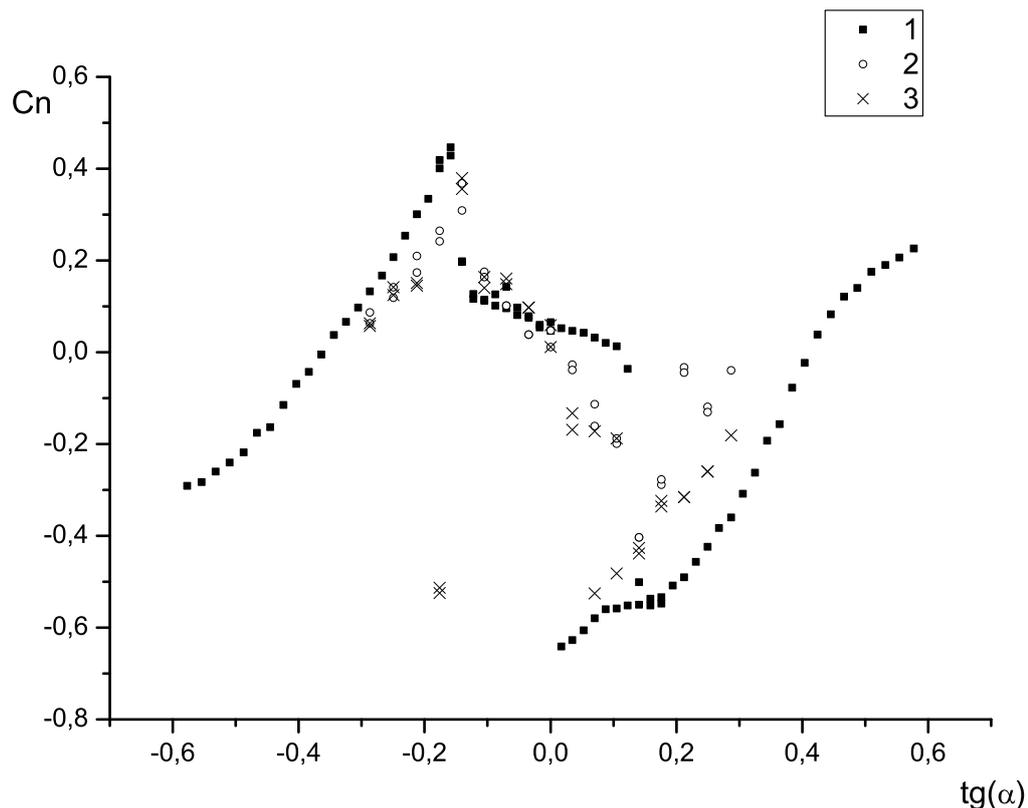


Рисунок 4 Зависимость C_n от тангенса угла атаки для цилиндра удлинения $\lambda = 4$. 1 - $Re = 1,96 * 10^5$, 2 - $Re = 6,44 * 10^4$, 3 - $Re = 2,03 * 10^5$.

ся исчезновение двух режимов обтекания при уменьшении числа Рейнольдса. Полученные во втором эксперименте данные ближе к результатам, полученным для прямоугольных призм. Отметим также, что результаты экспериментов №1 и №3 близки между собой. Качественных отличий между ними нет. Таким образом, отсутствие феномена двурежимности во втором эксперименте связано с аэродинамическими характеристиками исследуемого тела, а не с изменением метода измерения.

В **заключении** приведены основные результаты работы:

1. Экспериментально получены зависимости коэффициента нормальной силы от угла атаки призм различного удлинения.

2. Предложена новая математическая модель аэроупругого галопирования учитывающая специфику тел малого удлинения. При помощи нее рассчитаны

установившиеся режимы колебаний призм различного удлинения.

3. Изучено влияние концевых шайб на галопирование призм.

4. Полученные при помощи модели результаты подтверждены экспериментом по колебанию призмы в аэродинамической трубе.

4. В ходе экспериментов над цилиндрами с плавными обводами обнаружено два режима обтекания в некотором диапазоне углов атаки и чисел Рейнольдса.

5. Разработана математическая модель галопирования тела с двумя режимами обтекания.

В **приложении** приведены фотографии макетов, использованных при экспериментах, описанных в данной работе.

Список публикаций по теме диссертации

1. *Люсин В. Д.* Галопирование цилиндров с плавными обводами // «Технические науки от теории к практике»: материалы XVIII международной заочной научно-практической конференции. (20 февраля 2013 г.). Новосибирск: Изд-во «СибАК». 2013. С. 93-101.

2. *Люсин В. Д.* Моделирование галопирования тел имеющих два режима обтекания в состоянии покоя // Международная конференция «Восьмые Окуневские чтения». 25-28 июня 2013 г. Санкт-Петербург: Материалы докладов. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т. 2013. С. 213-214.

3. *Люсин В. Д.* Применение квазистатического приближения для исследования галопирования плохообтекаемых тел // Шестые Поляховские чтения: Тезисы докладов Международной научной конференции по механике, Санкт-Петербург, 31 января- 3 февраля 2012 г. м: Издатель И. В. Балабанов, 2012. С. 155.

4. *Люсин В. Д.* Экспериментальная проверка модели аэроупругого галопи-

рования // *Аэродинамика. Сборник статей.* СПб.: Изд-во ВВМ. 2013. С. 60-66.

5. *Люсин В. Д. Рябинин А. Н.* Исследование влияния удлинения призмы на ее аэродинамические характеристики и амплитуду колебаний призмы при галопировании // *Вестник СПбГУ.* 2011. Сер. 1. Вып. 2. С. 139-145.

6. *Люсин В. Д. Рябинин А. Н.* О галопировании призм в потоке газа или жидкости // *Труды ЦНИИ имени академика А. Н. Крылова.* СПб. 2010. Вып. 53(337) С. 79-84.

7. *Люсин В. Д. Рябинин А. Н.* Применение квазистатического приближения для решения задач об аэроупругом галопировании призм различного удлинения // *Международная конференция «Седьмые Окуневские чтения».* 20-24 июня 2011 г. Санкт- Петербург. Материалы докладов. СПб. 2011. С 100-101.

8. *Рябинин А. Н., Люсин В. Д.* О влиянии удлинения на режимы галопирования призм в потоке газа. // *Струйные, отрывные и нестационарные течения XXII Юбилейный семинар. Тезисы докладов.* СПб. 2010. С. 223-224.