

На правах рукописи

Телкова Юлия Владимировна

**АЭРОДИНАМИКА ПЛОХООБТЕКАЕМЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ТЕЛ  
В УСЛОВИЯХ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук,  
профессор Саленко Сергей Дмитриевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук  
Занин Борис Юрьевич

кандидат технических наук,  
доцент Петошин Виктор Иванович

Ведущая организация: Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Защита состоится « 17 » февраля в « 9<sup>00</sup> » часов на заседании диссертационного совета Д003.035.02 в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 630090, Новосибирск–90, ул. Институтская 4/1, ИТПМ СО РАН, ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » января 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук



Засыпкин И.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В современной строительной индустрии широко применяются протяженные конструкции, имеющие плохообтекаемые сечения. Опыт их возведения и эксплуатации показывает, что ветер представляет серьезную опасность как для сооружений в целом, так и для их элементов.

Уплотнение городских застроек и ведение строительства в несколько этапов приводит к тому, что многие сооружения оказываются в условиях аэродинамической интерференции. При этом происходит изменение структуры потока в окрестности строений, возникновение непредсказуемых распределений давлений на их поверхностях и нестационарных аэродинамических сил, приводящих к аэроупругим колебаниям конструкций. В частности, при аэродинамических исследованиях на кафедре аэрогидродинамики НГТУ в 2001 году моста через р. Иртыш в г. Омске, возводимого в две очереди, было установлено следующее. При надвигке пролетного сооружения второй очереди на характер и интенсивность ее колебаний оказывал влияние уже построенный пролет первой очереди моста. При этом наблюдался не только «классический» бафтинг при расположении монтируемого строения в следе построенного, но и усиление колебаний при противоположном направлении ветра. Для понимания структуры течения в окрестности близко расположенных сооружений (например, мостов или высотных зданий) необходимы подробные многосторонние исследования аэродинамических характеристик типичных форм строительных конструкций, а именно квадратных и прямоугольных призм, в условиях интерференции.

Проведенный анализ отечественных и зарубежных литературных источников показал, что в основном научные работы посвящены изучению аэродинамических характеристик и аэроупругой неустойчивости одиночных цилиндров с различными поперечными сечениями. Аналогичные исследования плохообтекаемых тел в условиях аэродинамической интерференции в большом объеме имеются только для круговых цилиндров. В то же время, для двух квадратных или прямоугольных призм данные о структурах потока, нестационарных характеристиках течения в их окрестности и аэроупругой неустойчивости в литературных источниках представлены в ограниченном количестве. Учитывая широкое применение в строительной отрасли элементов конструкций, близких по форме к призме, было решено провести детальные исследования нестационарного обтекания подобных тел, а также их аэроупругой неустойчивости в условиях интерференции.

**Цель работы** – экспериментальное исследование нестационарных характеристик течения в окрестности двух плохообтекаемых призматических тел в условиях интерференции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Визуализировать структуры течения в окрестности двух плохообтекаемых призматических тел.

2. Провести термоанемометрическое зондирование аэродинамического следа, возникающего позади двух плохообтекаемых тел.
3. Исследовать характер и интенсивность аэроупругих колебаний плохообтекаемых призматических тел в условиях интерференции.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена их повторяемостью во время исследований, проведенных в разное время, оценкой погрешности измерений и согласованием с опубликованными ранее данными о характеристиках подобных течений.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментального исследования влияния относительных продольных ( $S/H = 0 \dots 10$ ) и поперечных ( $G/H = 0 \dots 10$ ) расстояний между квадратными призмами на структуру течения в их окрестности, на основании которых установлена многовариантность реализующихся типов структур обтекания при  $M \ll 1$ ,  $Re \sim 0,3 \times 10^4$  и  $\alpha = 0^\circ$ .
2. Данные исследований в однородном малотурбулентном потоке при  $M \ll 1$ ,  $Re = 0,3 \times 10^5 \dots 0,4 \times 10^5$  и  $\alpha = 0^\circ$  по влиянию относительных расстояний между квадратными призмами на числа Струхала для пульсационных составляющих скорости в аэродинамическом следе.
3. Результаты о существовании нескольких типов вихревых структур, а также бистабильности течения, полученные в процессе визуализации обтекания большого числа конфигураций, состоящих из двух прямоугольных призм с относительной шириной сечений по потоку  $b/H = 2/3$  (где  $b$  – ширина поперечного сечения,  $H$  – высота сечения), одна из которых совершала колебания поперек потока, а другая была установлена неподвижно при  $M \ll 1$ ,  $Re \sim 4,2 \times 10^3$  и  $\alpha = 0^\circ$ .
4. Данные экспериментального исследования аэроупругих колебаний прямоугольной призмы ( $b/H = 2/3$ ) в присутствии такой же неподвижной призмы, а также результаты о новых видах аэроупругой неустойчивости, обусловленной аэродинамической интерференцией призм при  $M \ll 1$ ,  $Re = 1,2 \times 10^4 \dots 1,3 \times 10^5$  и  $\alpha = 0^\circ$ .
5. Результаты исследований моделей двух высотных зданий в г. Красноярске и динамически подобных моделей двух пролетных строений мостов через р. Томь в г. Кемерово и через р. Обь у пос. Красный Яр, а также аэродинамические устройства для гашения колебаний этих сооружений.

**Научная новизна работы** состоит в том, что:

1. Установлено существование семи типов вихревых структур в окрестности двух квадратных призм при  $Re \sim 0,3 \times 10^4$ ,  $\alpha = 0^\circ$  и пяти типов вихревых структур в окрестности двух прямоугольных ( $b/H = 2/3$ ) призм при  $Re \sim 4,2 \times 10^3$ ,  $\alpha = 0^\circ$  в условиях интерференции при изменении относительных продольных и поперечных расстояний между ними в широких диапазонах ( $S/H = 0 \dots 10$ ,  $G/H = 0 \dots 10$  и  $X/H = 0 \dots 12$ ,  $Y/H = 0 \dots 5,5$  для квадратных и прямоугольных призм соответственно).

2. Получены границы существования бистабильности и перемежаемости течения в окрестности двух плохообтекаемых тел при изменении их взаимного положения (для призм с  $b/H=1$ :  $S/H=2,5$ ,  $G/H=0,1 \dots 10$ ; для призм с  $b/H=2/3$ :  $X/H=2 \dots 2,5$ ,  $Y/H=0$ ).
3. Выявлены характерные виды колебаний для призматического тела ( $b/H=2/3$ ) в условиях его интерференции с телом такой же формы, и впервые получена классификация этих видов колебаний в зависимости от взаимного расположения тел друг относительно друга ( $X/H=0 \dots 7$ ;  $Y/H=0 \dots 5$ ) в однородном малотурбулентном потоке ( $M \ll 1$ ,  $Re = 1,2 \times 10^4 \dots 1,3 \times 10^5$  и  $\alpha = 0^\circ$ ).
4. Впервые получены области изолиний амплитуд колебаний модели призмы прямоугольного сечения ( $b/H=2/3$ ) при расположении в ее окрестности неподвижной призмы таких же размеров.

### Практическая ценность работы:

1. При сопоставлении результатов визуализации и термоанемометрических исследований двух неподвижных призм с квадратными поперечными сечениями в однородном малотурбулентном потоке ( $M \ll 1$ ,  $Re = 0,3 \times 10^5 \dots 0,4 \times 10^5$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ), получены характерные структуры обтекания и зависимости чисел Струхала для пульсаций скорости от относительных расстояний между ними ( $S/H=0 \dots 10$  и  $G/H=0 \dots 10$ ).
2. Получены характерные структуры течения в окрестности колеблющейся призмы с прямоугольным поперечным сечением ( $b/H=2/3$ ) в однородном малотурбулентном потоке ( $M \ll 1$ ,  $Re = 1,2 \times 10^4 \dots 1,3 \times 10^5$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ) в условиях аэродинамической интерференции для различных режимов аэроупругой неустойчивости.
3. Систематизированы данные об интенсивности и характере аэроупругих колебаний прямоугольной призмы ( $b/H=2/3$ ) в присутствии такой же неподвижной призмы в однородном малотурбулентном потоке ( $M \ll 1$ ,  $Re = 1,2 \times 10^4 \dots 1,3 \times 10^5$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ).
4. Выявлены наиболее и наименее опасные с точки зрения возникновения интенсивных аэроупругих колебаний компоновки исследуемых прямоугольных призм. Наиболее опасные соответствовали относительным амплитудам колебаний  $\bar{A}_{\max} / \bar{A}_{\max}^{\text{изол}} > 1$  при  $X/H = 2,5 \dots 3,5$ ,  $Y/H = 0 \dots 2,5$ , а наименее опасные –  $\bar{A}_{\max} / \bar{A}_{\max}^{\text{изол}} < 0,4$  при  $X/H = 0,8 \dots 2$ ,  $Y/H = 0,5 \dots 2,5$  и  $X/H = 4 \dots 6$ ,  $Y/H = 0 \dots 1$ , где  $\bar{A}_{\max}^{\text{изол}}$  – максимальное значение относительной амплитуды колебаний одиночной прямоугольной призмы.
5. Осуществлено внедрение результатов продувок на стадии проектирования жилого комплекса из двух высотных зданий в г. Красноярске и при монтаже пролетных строений мостовых переходов, возведенных через р. Томь в г. Кемерово и через р. Обь у пос. Красный Яр.

**Личный вклад автора.** Диссертант принимал непосредственное участие в постановке задач, проведении экспериментальных исследований в дозвуковой аэродинамической трубе Т-503 и обработке экспериментальных данных. Автором проведен подробный анализ течений в окрестности двух плохообтекаемых призматических тел в условиях интерференции, а также анализ влияния неподвижного призматического тела на характер и интенсивность колебаний такого же упруго-подвешенного. Представление в диссертации результатов совместных работ согласовано с соавторами.

**Реализация результатов работы.** Полученные в диссертации результаты использовались при проведении в 2001-2011 годах хоздоговорных НИР, направленных на изучение аэроупругих колебаний пролетных строений мостов и разработку устройств для гашения этих колебаний (мосты через р. Томь в г. Кемерово и р. Обь у пос. Красный Яр), а также направленных на исследование аэродинамических нагрузок на жилой комплекс из двух высотных зданий в г. Красноярске. Имеется два акта о внедрении результатов исследований.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (2007 г.), XIV и XV Международных конференциях по методам аэрофизических исследований ISMAR (2008, 2010 гг.), VII...VIII школах-семинарах СибНИА (2009, 2010 гг.), научно-практических конференциях молодых специалистов и учёных «Перспективные технологии самолётостроения в России и мире» (2010, 2011 гг.), а также на XI и XII Всероссийских научно-технических конференциях «Наука. Промышленность. Оборона» (2010, 2011 гг.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 6 – в сборниках научных трудов, 8 – в сборниках трудов Международных и Всероссийских научно-технических конференций, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Рукопись диссертации состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 176 страницах основного текста, содержащего 125 рисунков и 3 таблицы, списка литературы (121 наименование) и приложения, в котором представлены акты внедрения результатов работы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** дана краткая характеристика области исследования, обоснована актуальность темы, сформулированы основные цели работы.

В **первой главе** выполнен обзор литературы, касающейся нестационарной аэродинамики плохообтекаемых конструкций, в том числе высотных зданий и мостов.

До недавнего прошлого в нашей стране исследование взаимодействия ветра со строительными сооружениями не всегда являлось неотъемлемой частью процесса их создания, хотя в других индустриально-развитых странах все уникальные инженерные сооружения (в том числе высотные здания и большепролетные мосты) проходят обязательную комплексную аэродинамическую экспертизу в специализированных научно-исследовательских центрах.

В последние годы активность работ в России в области промышленной аэродинамики заметно повысилась. Подобные исследования проводятся в ЦАГИ им Н.Е. Жуковского, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, Институте механики МГУ им. М.В. Ломоносова, СПбГУ, МГСУ, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова и др. Конкретные строительные объекты разнообразных архитектурных форм экспериментально исследовались с точки зрения структуры потока в окрестности самих конструкций и их элементов, аэродинамических нагрузок, действующих на их поверхности при различных направлениях ветра, а также возникновения и, при необходимости, устранения аэродинамической неустойчивости конструкций.

Математическое моделирование аэродинамики высотных зданий в настоящее время получило достаточно быстрое развитие с появлением мощной компьютерной техники, позволяющей повысить скорость и надежность расчетов. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания, их комплексы и элементы конструкций, в том числе с учетом взаимного влияния окружающей застройки, проводятся в Институте механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Московском архитектурном институте, Московском государственном строительном университете и др. Однако детальную картину обтекания здания с учетом его объемно-пространственной структуры и профиля ветрового потока с помощью современных вычислительных средств в полном объеме получить нельзя.

Такое направление динамики сооружений, как аэродинамика мостов, сформировалось после катастрофы, произошедшей в США в 1940 году с висячим мостом Такома-Нэрроуз. До этого случая первостепенным считалось обеспечение статической прочности, при этом аэродинамическая устойчивость мостовых конструкций обеспечивалась совершенно случайно. После этой катастрофы началось систематическое изучение ветровых воздействий на большепролетные мосты и протяженные сооружения, и все чаще стали прибегать к испытаниям моделей мостов в аэродинамических трубах. В нашей стране и в странах ближнего зарубежья широко известны работы ЦАГИ им Н.Е. Жуковского, Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта и др.

Наметившаяся тенденция к широкому применению в мостостроении высокопрочных сталей позволяет снизить металлоемкость и стоимость мостовых конструкций. Однако подобные сооружения с большими пролетами становятся весьма чувствительны к различным динамическим нагрузкам, в результате чего возникает необходимость в исследованиях и разработке разнообразных гасителей колебаний, а также методов их расчета. Причем для каждой конкретной конструкции требуется индивидуальный подход.

Представленный в обзоре анализ основных видов аэроупругой неустойчивости и способов гашения возникающих аэроупругих колебаний показал, что

аэродинамические характеристики призматических тел в условиях интерференции недостаточно изучены и освещены в литературе.

**Вторая глава** посвящена методике проведения визуализационных и термоанемометрических экспериментов в окрестности моделей плохообтекаемых тел и высотных зданий; дренажных испытаний для получения распределения аэродинамических нагрузок, действующих на поверхности зданий; исследований нестационарных аэроупругих колебаний секционной модели призмы прямоугольного поперечного сечения и динамически подобных моделей пролетных строений мостов через р. Томь в г. Кемерово и через р. Обь у пос. Красный Яр.

**В разделе 2.1** обоснован выбор главных критериев динамического подобия (Рейнольдса, Струхаля, Коши, Ньютона, Скрутона), соблюдение которых позволит перенести результаты экспериментальных исследований на натуру.

Влияние числа Рейнольдса на аэродинамические характеристики исследуемых тел, имеющих сечения с угловыми точками, не является определяющим при условии нахождения в автомодельной зоне. Исследования высотных зданий проводились при скоростях набегающего потока до 20 м/с, что соответствовало автомодельной зоне по числам Рейнольдса, рассчитанных по ширине фасадной части модели здания  $Re_m \sim 1,4 \times 10^5$ . Для динамически подобных моделей пролетных строений мостов также была обеспечена автомодельность течения, т.к. интенсивные колебания наблюдались при скоростях набегающего потока от 7 до 25 м/с, соответствующих числам Рейнольдса по высоте сечений главных балок моделей  $Re = 0,3 \times 10^5 \dots 1,1 \times 10^5$ .

При исследовании нестационарных процессов обеспечивался критерий гомохронности – число Струхаля, учитывающий единовременность протекания нестационарных физических процессов для натурального и модельного объектов.

При моделировании упругих и демпфирующих свойств динамически подобных моделей пролетных строений мостов соблюдалось подобие по критериям Коши, Ньютона и Скрутона, обеспечивающееся соответствующим подбором жесткости элементов моделей и величины скоростного напора, выбором требуемого масштаба погонных масс и логарифмических декрементов колебаний для модели и натуре соответственно.

В экспериментах с моделями высотных зданий и пролетных строений мостов должно было быть соблюдено подобие вертикальных градиентов скорости, интенсивности и масштаба турбулентности, спектра пульсаций скорости. Данное требование удовлетворялось благодаря установке на срезе сопла решетки из горизонтально расположенных стержней. Подбор параметров решетки обеспечивался с помощью методики, разработанной, апробированной и широко используемой на кафедре аэрогидродинамики НГТУ. Для высотных зданий дополнительно с решеткой воспроизводилось окружение высотных зданий в радиусе около 250 м.



**В разделе 2.2** приведено описание конструкций используемых моделей, экспериментального стенда, аэродинамической трубы и информационно-измерительного комплекса.

Исследования проводились в лаборатории промышленной аэродинамики НГТУ на дозвуковой аэродинамической трубе Т-503 замкнутого типа, имеющей открытую рабочую часть диаметром 1,2 м, длиной 3 м. В экспериментах использовались следующие модели:

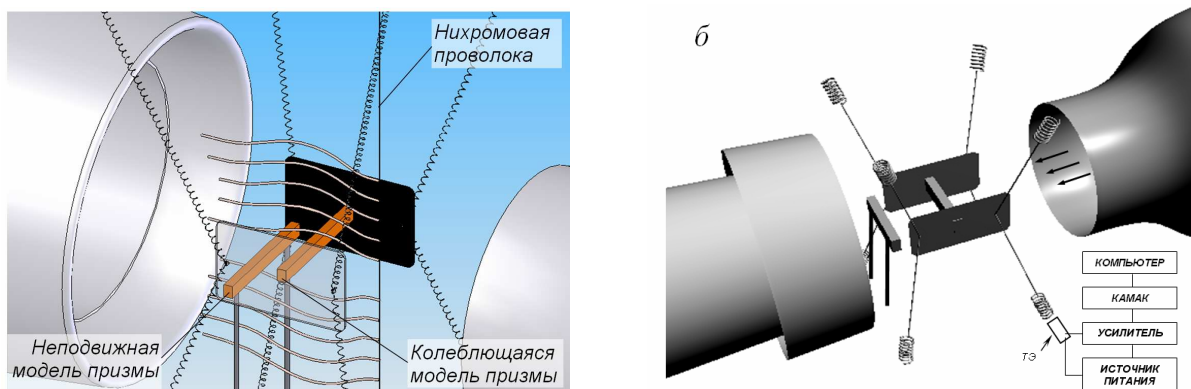
- две одинаковые призмы с квадратными поперечными сечениями;
- две одинаковые призмы с прямоугольными поперечными сечениями, одна из которых была подвешена упруго и могла совершать колебания поперек потока;
- модели высотных зданий, спроектированных АМ «Тектоника» в г. Красноярске;
- динамически подобные модели пролетных строений мостов через р. Томь в г. Кемерово и через р. Обь у пос. Красный Яр.

Модели двух призм с квадратными поперечными сечениями представляли собой деревянные балки, оклеенные черной матовой пленкой ПВХ. В рабочей части аэродинамической трубы модели располагались вертикально, перпендикулярно набегающему потоку (угол атаки  $\alpha = 0^\circ$ ), при этом нижними концами упирались в горизонтальный экран, имитирующий земную поверхность. Верхние концы балок выходили за границы потока в рабочей части и жестко крепились.

Форма сечений моделей двух призм с прямоугольными поперечными сечениями с соотношением сторон  $b/H = 2/3$  была близка форме сечений типовых коробчатых балок, широко применяющихся при возведении пролетных строений мостов. Относительное удлинение призм – 10. Модели призм располагались в рабочей части горизонтально, перпендикулярно набегающему потоку (угол атаки  $\alpha = 0^\circ$ ), при этом одна из них была жестко закреплена на двух вертикальных опорах, а другая совершала колебания поперек потока. Колеблющаяся призма представляла собой секционную модель, подвешенную в рабочей части на упругой подвеске. Для получения возможности видеосъемки и улучшения ее качества, одна из концевых шайб была изготовлена из прозрачного материала в перпендикулярном к вертикальной плоскости симметрии модели направлении, а другая – затемнена (рис. 1, *а*). Регистрация колебаний упруго-подвешенной призмы в набегающем потоке осуществлялась с помощью тензоэлемента, расположенного в одной из ветвей упругой подвески (рис. 1, *б*).

Модели высотных зданий были изготовлены из пластика по заданной САД-геометрии на 3D-принтере с минимальным пространственным разрешением 0,25 мм. Высота исследуемых здания составляла 108,2 м, при этом они имели постоянную по высоте ширину фасадов (31,85 м) и переменную по высоте ширину при виде сбоку. Учитывая размеры рабочей части аэродинамической трубы, был выбран максимально возможный из условий загромождения потока масштаб макета 1:250. Принятый масштаб и использование 3D-принтера позволили воссоздать в макете сложную структуру поверхности

высотных зданий, в том числе балконы, лоджии, выступы и другие элементы, важные для формирования потока. Для проведения дренажных испытаний был изготовлен отдельный комплект моделей высотных зданий из оргстекла. Каждая модель имела на поверхности более ста дренажных отверстий диаметром 0,8 мм для восприятия давления воздуха.



**Рис. 1.** Схемы экспериментальных установок для двух призм прямоугольного поперечного сечения (*а* – для визуализации; *б* – для определения амплитуд колебаний)

Динамически подобные модели пролетных строений мостов через р. Томь в г. Кемерово и через р. Обь у пос. Красный Яр представляли собой уменьшенные копии натуральных объектов. Для изготовления динамически подобной модели был выбран композиционный материала на основе углеткани и стеклоткани с эпоксидным связующим. За счет комбинации на отдельных участках разного количества слоев углеткани и стеклоткани обеспечивалось распределение погонной массы и жесткости, подобное натурной конструкции. Массы отдельных элементов контролировались на всех этапах изготовления. Жесткость всех отформованных балок была уточнена экспериментально. Следует отметить, что пролетное строение моста через р. Томь в г. Кемерово в процессе монтажа находилось вблизи старого частично демонтированного моста, что также моделировалось при проведении аэродинамических экспериментов.

**В разделе 2.3** описаны методики визуализационных и термоанемометрических испытаний секционной модели прямоугольной призмы, дренажных испытаний высотных зданий, а также весовых испытаний, заключающихся в определении интегральных аэродинамических нагрузок секционной модели прямоугольной призмы и динамически подобных моделей пролетных строений мостов.

Визуализация потока проводилась с помощью метода «дымящей проволочки». Нихромовая проволока диаметром 0,6 мм натягивалась в подпружиненной рамке для компенсации ее удлинения при нагреве и равномерно покрывалась мелкими каплями глицерина, которые, испаряясь в результате электрического нагрева проволоки, образовывали дымовые струйки. Процесс визуализации снимался на цифровую видеокамеру Sony HDR-SR10E со скоростью 50 кадров в секунду. Для достижения необходимой контрастности и четкости видеоматериала, плоскость визуализации подсвечивалась параллельно потоку «световым ножом», а задний план затемнялся.

Измерения пульсаций скорости в окрестности моделей проводились с помощью термоанемометрического комплекса постоянного сопротивления ТАИК-3, датчик которого состоял из двух вольфрамовых проволок диаметром 6 микрон, и с помощью координатника перемещался вдоль и поперек потока.

Для проведения дренажных испытаний модели зданий были дренированы в трех горизонтальных сечениях по высоте, в сечении по контуру крыши, при этом в каждом сечении было не менее 20 отверстий диаметром 0,8 мм для замера давления. Кроме этого, для получения более точных эпюр распределения коэффициентов давления по высоте, в каждом здании было дополнительно дренировано около 30 точек, равномерно распределенных по высоте в плоскости симметрии. Для расчета характерного динамического давления для моделей высотных зданий использовалась скорость потока на высоте кровли зданий, а для окружающей застройки – скорость ветра на высоте 10 м.

Методика определения амплитуд колебаний различных моделей в зависимости от скорости набегающего потока достаточно хорошо отлажена на кафедре аэрогидродинамики НГТУ. При проведении исследований аэроупругих колебаний секционной модели призмы прямоугольного поперечного сечения и динамически подобных моделей пролетных строений мостов предварительно была проведена градуировка информационно-измерительного комплекса (ИИК), которая для каждого типа модели имела свои особенности.

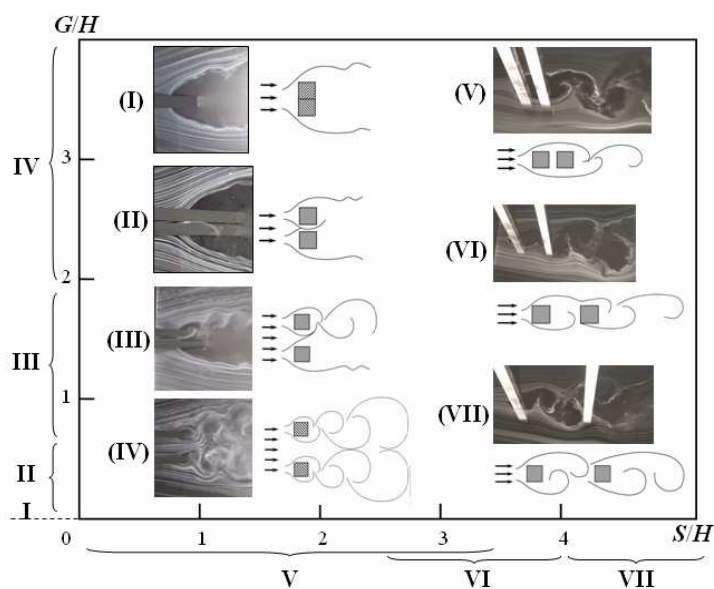
При исследованиях упруго-подвешенной модели призмы и динамически подобных моделей пролетных строений мостов были зарегистрированы две основных формы колебаний. Во-первых, это возникающие в строго определенном диапазоне скоростей поступательные колебания в вертикальной плоскости, которые рассматривались в главах 4 и 5. Во-вторых, были отмечены крутильные колебания относительно горизонтальной оси, перпендикулярной направлению набегающего потока. Данная форма колебаний возникала при значительно больших скоростях, чем поступательные, и подробно не изучалась, потому что с практической точки зрения натурные критические скорости ветра, при которых возникают крутильные колебания на реальных сооружениях исследуемого типа, намного превышают нормативы СНиП 2.05.03 (ред. 2011 г.). Для более строгого учета диссипативных свойств системы проводилось определение зависимостей логарифмических декрементов колебаний от их амплитуд.

**В третьей главе** диссертации представлены результаты исследований в однородном малотурбулентном потоке ( $M \ll 1$ ,  $\varepsilon = 0,5\%$ ) течения в окрестности двух призм квадратного поперечного сечения при изменении относительных продольных ( $S/H = 0 \dots 10$ ) или поперечных ( $G/H = 0 \dots 10$ ) расстояний между ними в широких пределах.

**В разделе 3.1** рассмотрены картины течения в окрестности двух призм при различном их взаимном расположении, полученные в результате визуализации методом «дымящей проволоочки». Визуализация течения в окрестности двух квадратных призм проводилась при скорости набегающего потока  $V_\infty \approx 1 \text{ м/с}$

( $Re \sim 0,3 \times 10^4$ ). В процессе экспериментов рамка с дымящей проволокой устанавливалась перпендикулярно продольной оси призм и направлению набегающего потока на высоте  $8H$  над экраном.

Проведенный анализ кинограмм пространственного обтекания моделей показал, что для пары квадратных призм картины визуализации можно разделить на четыре типа (I – IV) в случае установки призм на линии, перпендикулярной направлению скорости набегающего потока, и на три (V – VII) – в случае их расположения друг за другом, классификация которых представлена на рис. 2.

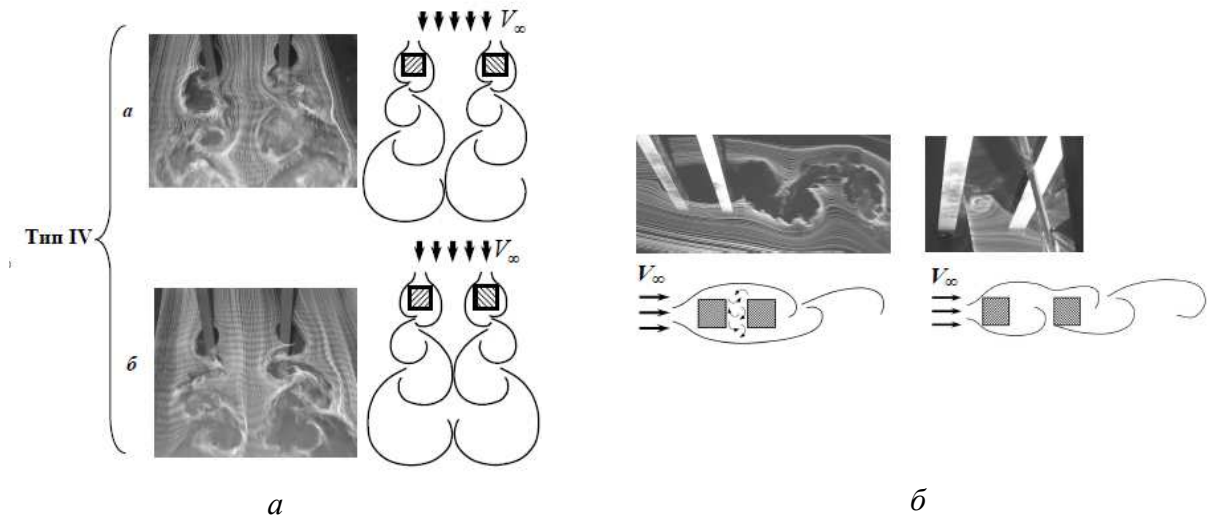


**Рис. 2.** Классификация картин течения в окрестности двух призм квадратного поперечного сечения ( $Re = 3 \times 10^3$ )

Следует отметить некоторые особенности при обтекании двух призм квадратного поперечного сечения. Если расстояние между балками в поперечном направлении изменялось в интервале от  $0,1H$  до  $0,6H$ , то в зазоре между ними наблюдалось протекание потока, который мог отклоняться в сторону одной из балок. В это же время оторвавшийся с передних граней балок поток формировал вихревые структуры в их аэродинамическом следе на достаточно большом расстоянии от задних граней. При значении относительного поперечного зазора  $G/H = 0,7 \dots 1,9$  сход вихрей происходил только с одной из двух балок. Со второй, расположенной рядом призмы, также наблюдался срыв потока с боковых граней, но вихревая дорожка при этом за ней не формировалась. С приближением величины зазора к значению  $1,9H$ , вихревая дорожка за одной из балок становилась более выраженной и четкой.

Когда расстояние между двумя исследуемыми призмами превышало значение  $2H$ , позади призм синхронно формировались отдельные вихревые дорожки. Было замечено, что при каждом исследованном зазоре возникали две разновидности схода вихрей: симметричный или антисимметричный, при этом в основном преобладала симметричная картина течения (рис. 3, а). Данное явление можно интерпретировать как перемежаемость течения, когда в результате неконтролируемых возмущений происходит смена фазы схода вихрей.

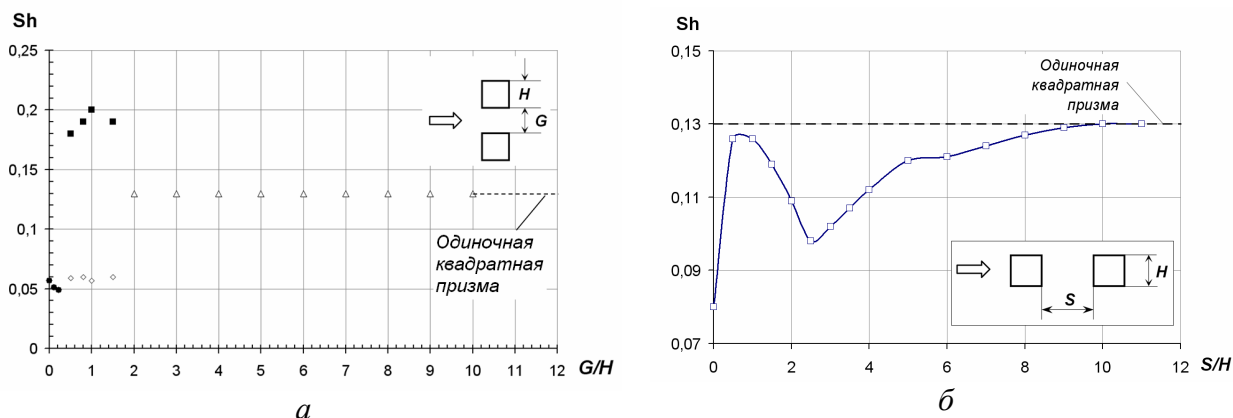
При тандемном расположении призм при относительном зазоре  $S/H = 2,5$  наблюдались не только V-я картина обтекания, но и VI-я (рис. 3, б). При данном критическом зазоре наличие двух картин обтекания отражает явление бистабильности течения для квадратных призм.



**Рис. 3.** Фотографии и схемы картин обтекания двух призм с квадратными поперечными сечениями (*a* –  $G/H = 5$ ; *б* –  $S/H = 2,5$ )

В разделе 3.2 представлены подробные термоанемометрические исследования пульсаций скорости потока в аэродинамическом следе за двумя квадратными призмами. Замеры пульсаций скорости проводились на высоте  $8H$  над экраном, для исключения влияния экрана на измеряемые параметры в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = 0,3 \times 10^5 \div 0,4 \times 10^5$ . Результаты измерений позволили определить числа Струхала для различных взаимных положений призм. При расчете чисел Струхала за характерный размер принималась постоянная величина – поперечный размер сечений призм ( $H$ ).

Результаты термоанемометрического зондирования представлены в виде зависимостей чисел Струхала от безразмерного зазора между призмами в поперечном и продольном направлениях (рис. 4, *a*, *б*). Из рис. 4, *a* видно, что диапазон  $G/H = f(Sh)$  можно условно разделить на три области в зависимости от значения числа Струхала. Одна область характеризуется тем, что если балки расположены близко друг к другу, то в диапазоне значений  $G/H = 0 \dots 0,2$  числа Струхала равны  $Sh \approx 0,05$ . При дальнейшем увеличении параметра  $G/H$  до значения 1,5 возникает неоднозначность обтекания балок, которая проявляется в существовании двух чисел Струхала  $Sh = 0,06$  и  $0,18$ , что отражает следующая область. Для последней области характерно одно число Струхала  $Sh = 0,13$ , так как при зазоре  $G/H = 2 \dots 10$  с каждой балки сходят отдельные вихревые дорожки Кармана, имеющие одинаковые частоты, совпадающие с частотой схода вихрей с одиночной призмы квадратного сечения. Таким образом, можно утверждать, что существенное интерференционное взаимодействие призм (изменение структуры течения и частоты схода вихрей) проявляется только до  $G/H = 2$ .



**Рис. 4.** Зависимости чисел Струхали от относительных расстояний между призмами в поперечном (а) и продольном (б) направлениях

Резкое изменение формы кривой на рис. 4, б в окрестности значения  $S/H = 2,5$  объясняется результатами визуализации, показавшими, что при данной критической величине зазора наблюдалось явление бистабильности течения (рис. 3, б). При  $S/H = 9$  числа Струхали достигают максимального значения, которое при дальнейшем увеличении зазора не меняется. Наибольшее число Струхали равняется соответствующему значению для одиночной квадратной призмы. Таким образом, можно отметить, что при  $S/H > 9$  призмы расположены достаточно далеко, чтобы влиять на частоту схода вихрей с них.

Полученные результаты зависимости чисел Струхали от относительных расстояний ( $G/H$  и  $S/H$ ) могут быть использованы при оценке взаимодействия двух близко расположенных сооружений с квадратными поперечными сечениями, находящихся в условиях интерференции.

**Четвертая глава** посвящена исследованиям моделей двух призм с прямоугольными поперечными сечениями в однородном малотурбулентном потоке ( $M \ll 1$ ,  $\varepsilon = 0,5\%$ ), одна из которых совершала колебания поперек потока, а другая была установлена неподвижно.

Представленные в **разделе 4.1** результаты визуализационных исследований ( $Re \sim 4,1 \times 10^3$ ) позволили изучить влияние неподвижной прямоугольной призмы на характер обтекания колеблющейся призмы такого же сечения. В экспериментах модель неподвижной призмы устанавливалась на различных расстояниях ( $X/H = 0 \dots 7$  и  $Y/H = 0 \dots 5$ , где  $X$  и  $Y$  – расстояния между поперечными и продольными осями призм соответственно) по потоку перед колеблющейся призмой и за ней.

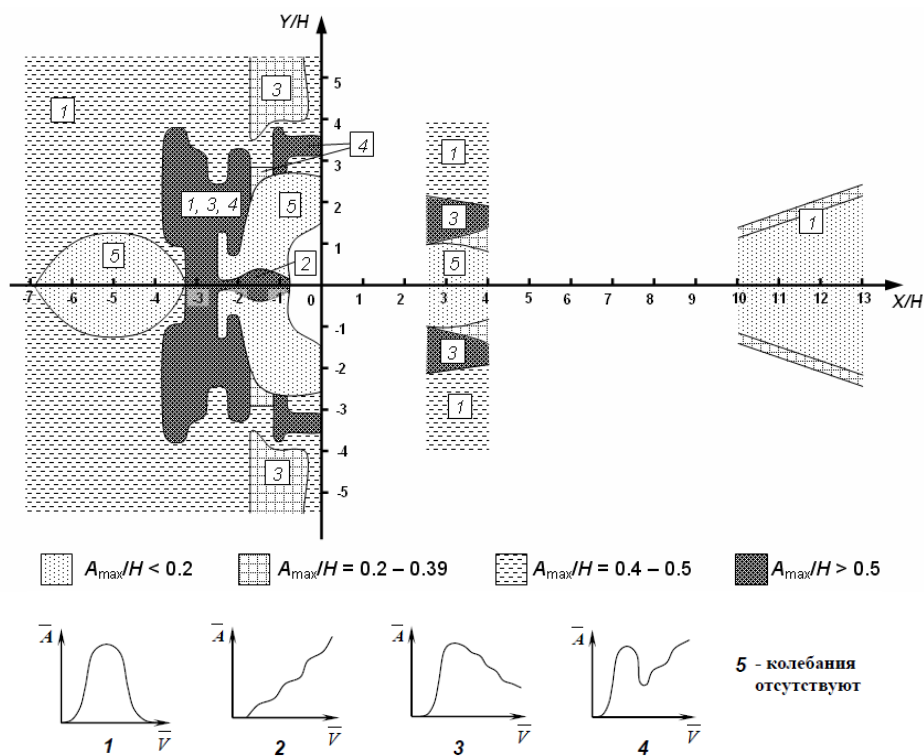
Анализируя картины течения, возникающие при изменении продольных либо поперечных расстояний между моделями следует отметить, что по структуре они схожи с картинами течения, представленными в третьей главе для призм с квадратными поперечными сечениями, однако из семи типов в окрестности прямоугольных призм реализуется только пять (II, IV...VII). В зависимости от того, где была расположена неподвижная модель: перед колеблющейся или за ней по потоку, значения относительных расстояний ( $X/H$ ,  $Y/H$ ), при которых возникал каждый режим обтекания, были различны. Так, при тандемной компоновке ( $Y/H = 0$ ) моделей застойная отрывная зона между призм



мами образовывалась при  $X/H < 4$  в случае расположения неподвижной призмы по потоку перед колеблющейся, и при  $X/H < 2$  – в случае расположения неподвижной призмы по потоку за колеблющейся. Кроме того, только при расположении неподвижной модели в следе колеблющейся на расстояниях  $X/H = 2...3,5$ ;  $Y/H < 1$  наблюдался режим обтекания, когда сходящиеся с первой по потоку призмы вихри не успевали сформировать дорожки и разбивались о переднюю грань второй. Следует отметить, что при  $Y/H = 0$  и  $X/H = 2...2,5$  данный режим проявлялся только при интенсивных колебаниях ( $A_{\max}^{\text{изол}}/H \sim 0,5$ , где  $A_{\max}^{\text{изол}}$  – максимальное значение амплитуд колебаний одиночной прямоугольной призмы), в то время как при умеренных относительных амплитудах  $A_{\max}^{\text{изол}}/H \sim 0,2$  сохранялась застойная отрывная зона между призмами. Поэтому диапазон расстояний  $X/H = 2...2,5$  можно назвать критическим для прямоугольных призм.

В разделе 4.2 описываются амплитудно-скоростные характеристики колеблющейся призмы при различных её положениях относительно неподвижной. Оценка поведения изолированной секционной модели прямоугольной призмы в потоке, набегавшем со скоростью от 3 до 31 м/с, показала, что относительные амплитуды колебаний могут достигать достаточно больших значений ( $A_{\max}^{\text{изол}}/H \sim 0,5$  при логарифмическом декременте колебаний около  $\delta \sim 0,005$ ). По характеру эти колебания близки к классическому ветровому резонансу. Расположение неподвижной призмы по потоку перед и за колеблющейся позволило выявить новые виды аэроупругих колебаний последней. Это обусловлено аэродинамической интерференцией призм. Кроме того, установлены интервалы относительных продольных и поперечных расстояний между призмами, соответствующих уменьшению или увеличению относительных амплитуд колебаний упруго-подвешенной модели призмы (рис. 5). Особое внимание следует обратить на то, что когда неподвижная модель расположена позади колеблющейся, наблюдалось как уменьшение относительных амплитуд колебаний ( $\bar{A}_{\max}/\bar{A}_{\max}^{\text{изол}} < 0,4$ ,  $X/H = 0,8...2$ ,  $Y/H = 0,5...2,5$ ), так и их увеличение ( $\bar{A}_{\max}/\bar{A}_{\max}^{\text{изол}} > 1$ ,  $X/H = 2,5...3,5$ ,  $Y/H = 0...2,5$ ) в достаточно большой области изменения относительных координат  $X/H$  и  $Y/H$  по сравнению с амплитудами колебаний изолированной секционной модели прямоугольной призмы.

С точки зрения практического применения, колеблющуюся модель прямоугольной призмы следует рассматривать как секционную модель консольной части пролетного строения моста, монтируемого методом продольной надвижки, а неподвижную модель прямоугольной призмы – как уже построенный мостовой переход, либо пролетное строение первой очереди. Интенсивность и характер колебаний секционной модели позволяют провести оценку влияния неподвижной конструкции на колеблющуюся, и, по возможности, выбрать наиболее безопасное взаимное положение сооружений. Представленные результаты для двух одинаковых призм с относительной шириной сечений  $b/H = 2/3$  являются новыми, и ранее не встречались в литературе.



**Рис. 5.** Область изолиний амплитуд колебаний упруго-подвешенной модели призмы прямоугольного сечения в присутствии такой же неподвижной модели призмы

В пятой главе представлены исследования моделей реальных строительных сооружений, находящихся в условиях аэродинамической интерференции: моделей высотных зданий, спроектированных АМ «Тектоника» в г. Красноярске, и динамически подобных моделей пролетных строений мостов через р. Томь в г. Кемерово и через р. Обь у пос. Красный Яр.

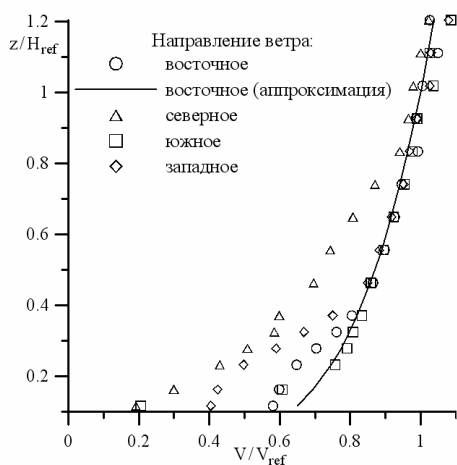
В разделе 5.1 описываются результаты исследований обтекания двух высотных зданий в условиях интерференции, определения суммарных и распределенных аэродинамических нагрузок на поверхность зданий жилого комплекса. Вначале были проведены расчеты ветровых нагрузок, оценка опасности возникновения ветрового резонанса и галопирования. Расчеты показали, что для зданий вихревое возбуждение колебаний не представляет опасности, т.к. для критической скорости ветра 45 м/с, при которой он возможен, значение максимальной амплитуды колебаний равно 0,29 м. Оценка критической скорости галопирования показала, что данные аэроупругие колебания могли бы заметно проявиться только при скоростях ветра, существенно превышающих значения, регламентированные СНиП 2.01.07 (ред. 2011 г).

Воспроизведение параметров приземного атмосферного слоя проводилось на модели, состоящей из ландшафта местности и зданий жилого микрорайона без высотных домов. Поток, поступающий в рабочую часть аэродинамической трубы, проходил через решетку из горизонтальных стержней, формирующую над экраном степенное распределение средней скорости. Измерения проводились в области предполагаемого расположения высотных зданий на различных высотах  $z$  от поверхности. Результаты продувок модели с основных направлений приведены на рис. 6, 7 в виде распределений по вертикальной координате

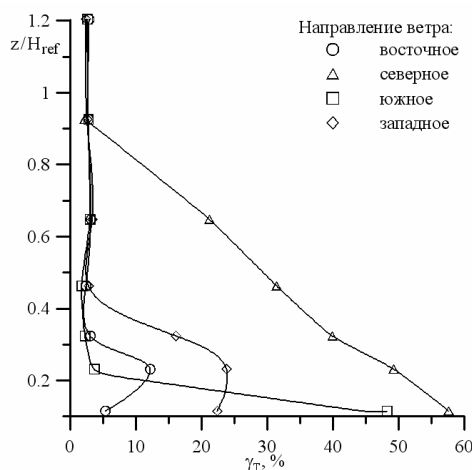


средней скорости и интенсивности турбулентности, соответственно. При восточном, южном и западном направлениях потока (рис. 6), профиль скорости достаточно хорошо описывается степенной зависимостью, в отличие от северного направления ветра, ввиду значительно большего влияния на поле течения в исследуемой области близлежащих зданий, создающих аэродинамическое затенение «высоток».

Проведенные термоанемометрические исследования позволили определить характерные числа Струхала в окрестности высотных зданий и показали, что независимо от направления ветра спектр частот был размыт. При этом результаты дополнительных исследований показали, что основной причиной, приводящей к разрушению регулярного схода вихрей с поверхности высотных зданий, являлось именно их взаимное влияние, то есть аэродинамическая интерференция, а не степенной характер распределения скорости по вертикали, повышенная турбулентность потока, наличие окружающей городской застройки или переменная ширина сечения самих зданий по высоте.



**Рис. 6.** Влияние направления течения на профиль средней скорости.



**Рис. 7.** Влияние направления течения на профиль интенсивности турбулентности.

Визуализация позволила выявить некоторые особенности течения в окрестности моделей зданий. При юго-восточном и северо-западном направлениях наблюдалось сильное поджатие струек тока между высотными зданиями, что могло бы вызвать повышение скорости течения и, стало быть, местного динамического давления. Однако измерение средних и пиковых составляющих коэффициента давления для дренажных точек в этой области показало, что в наихудшем случае они принимали следующие значения:  $C_{P_{min}} < -1.2$  – что не превышает рекомендованные СНиП 2.01.07 величины. Однако на участке по краю кровли зданий коэффициенты давления ( $C_{P_{min}} \approx -2.42$ ) превышали рекомендованные СНиП значения на 20%. В целом, с точки зрения аэродинамики зданий и интерференционного взаимодействия между ними, принятое архитектурно-планировочное решение следует признать удачным.

В результате можно сделать вывод, что для высотных зданий сложной формы оценочных расчетов ветровых нагрузок на их поверхность недостаточно, и они должны сопровождаться экспериментами в аэродинамических трубах.

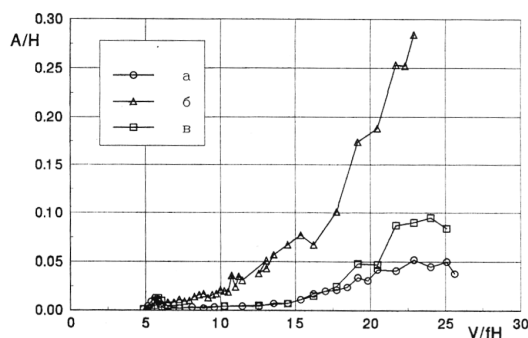
**В разделе 5.2** представлены результаты исследований аэроупругих колебаний пролетного строения моста через р. Томь в г. Кемерово в условиях интерференции, а также предложены способы гашения аэроупругих колебаний пролетных строений мостов через р. Томь в г. Кемерово и через р. Обь у пос. Красный Яр.

Строящийся мост через р. Томь располагался на относительно небольшом расстоянии от старого не демонтированного, при этом угол между осями пролетных строений мостов составлял  $15,7^\circ$  (рис. 8). Поэтому на разных стадиях надвигки расстояние между пролетными строениями было различно, а в зависимости от направления ветра монтируемый мост находился либо в аэродинамическом следе старого, либо перед ним по потоку.

Продувки одиночной (без модели старого моста) динамически подобной модели пролетного строения моста через р. Томь показали, что она обладает достаточно высокой аэроупругой устойчивостью и имеет малые амплитуды колебаний в рассматриваемом диапазоне скоростей (до 25 м/с). Однако при совместном обтекании, когда новое пролетное строение находилось впереди или позади старого, интенсивность и характер аэроупругого возбуждения нового сооружения изменялись: при направлении ветра со стороны старого моста возникали интенсивные колебания типа бафтинг, а при направлении ветра со стороны нового – вихревое возбуждение и комбинированные колебания (рис. 9). Предварительные исследования динамически подобной модели пролетного строения моста через р. Обь показали, что на стадии монтажа оно подвержено интенсивным (0,5...1,0 м) колебаниям двух типов: вихревое возбуждение и галопирование.



**Рис. 8.** Мостовой переход через р. Томь в г. Кемерово при наличии старого не демонтированного моста.

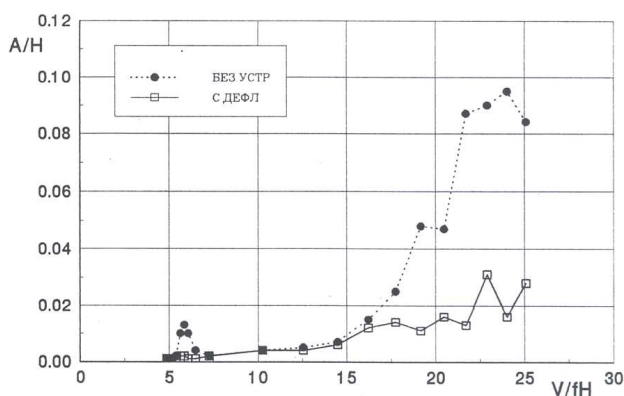


**Рис. 9.** Зависимость относительной амплитуды колебаний модели от приведенной скорости потока при  $\beta = 0^\circ$  (а – одиночное пролетное строение, б – поток со стороны старого пролетного строения, в – поток со стороны нового пролетного строения).

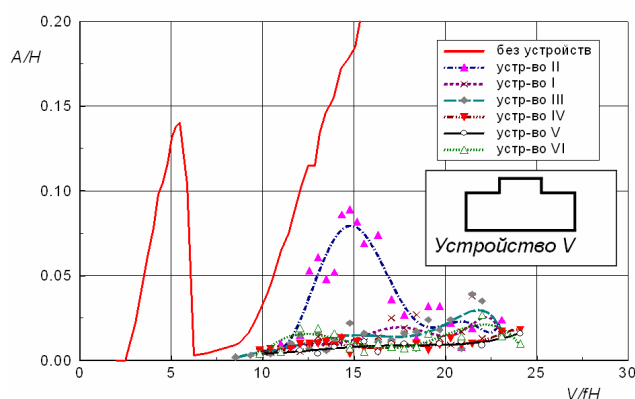
Для каждого пролетного строения был подобран свой тип устройств гашения аэроупругих колебаний, устраняющих регулярный сход вихрей с поверхности балок. Для этого были рассмотрены оригинальные устройства (щитки и дефлекторы), оптимизация геометрических параметров которых проводилась по методу градиентного или координатного спуска, с целью нахождения экстремума многомерной зависимости амплитуд колебаний от параметров гасителей. Оптимизация устройств проводилась обычно для самого опасного вари-

анта – в малотурбулентном потоке при его направлении перпендикулярном оси строения, а затем эффективность устройств обязательно проверялась в широком диапазоне углов скольжения над экраном при моделировании распределения по высоте скорости и турбулентных характеристик приземного слоя. Окончательно из исследованных вариантов устройств для пролетного строения моста через р. Томь был выбран вариант с дефлекторами, т.к. при соизмеримой суммарной площади устройств они дают меньшее увеличение площади в плане (выгодно с точки зрения бафтинга в аэродинамическом следе старого строения) и имеют меньший вылет относительно их точек крепления к пролетному строению, т.е. меньшие нагрузки на подкрепляющие элементы. Устранение бафтинга требовало придания старому мосту удобообтекаемой формы, что потребовало бы установки обтекателей большой площади и значительно увеличило стоимость и вес конструкции. Поэтому для предотвращения опасных колебаний были рассчитаны ограничения на максимальную скорость ветра в зависимости от вылета консоли и номера пролета. Для пролетного строения моста через р. Обь требуется уменьшение амплитуд колебаний обеспечивали щитки.

Разработанные для пролетных строений мостов через р. Томь и р. Обь устройства гашения колебаний показали свою высокую эффективность (амплитуды колебаний не превышали 0,1 м для натурального строения) на всех стадиях надвижки при натуральных скоростях ветра до 25 м/с (рис. 10, 11). К тому же, на примере гашения колебаний пролетного строения моста через р. Обь было показано, что устройства, ранее обеспечивающие требуемое уменьшение амплитуд колебаний на близком по форме сооружении (пролетное строение моста через р. Томь), теряют свою эффективность при небольших изменениях геометрических параметров пролетного строения.



**Рис. 10.** Влияние дефлекторов на амплитуду аэроупругих колебаний динамически подобной модели пролетного строения моста через р. Томь в г. Кемерово (ветер со стороны нового пролетного строения)



**Рис. 11.** Влияние формы устройств на эффективность гашения колебаний динамически подобной модели пролетного строения моста через р. Обь у пос. Красный Яр

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

В работе представлены результаты исследований течения в окрестности двух призм с квадратными ( $b/H = 1$ ) и прямоугольными ( $b/H = 2/3$ ) попереч-

ными сечениями при числах Рейнольдса  $Re = 0,3 \times 10^4 \dots 1,3 \times 10^5$ , а также использование этих результатов при проведении в 2001-2011 годах хоздоговорных научно-исследовательских работ, направленных на изучение аэродинамических нагрузок на поверхность жилого комплекса (два высотных здания в городе Красноярске) и исследование аэроупругих колебаний пролетных стропильных мостов через реку Томь в городе Кемерово и через реку Обь у поселка Красный Яр с целью разработки устройств для их гашения.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. В окрестности двух плохообтекаемых тел ( $b/H = 1$  и  $b/H = 2/3$ ) в однородном малотурбулентном потоке ( $M \ll 1$ ,  $\varepsilon = 0,5\%$ ) при  $\alpha = 0^\circ$  выявлено существование нескольких типов вихревых структур, явлений бистабильности и перемежаемости течения при изменении относительных расстояний между ними в широких пределах (для призм с  $b/H = 1$ :  $Re \sim 0,3 \times 10^4$ ,  $S/H = 0 \dots 10$ ,  $G/H = 0 \dots 10$ ; для призм с  $b/H = 2/3$ :  $Re \sim 4,2 \times 10^3$ ,  $X/H = 0 \dots 7$ ,  $Y/H = 0 \dots 5$ ).
2. Представлены зависимости чисел Струхала для пульсационных составляющих скорости в однородном малотурбулентном потоке ( $M \ll 1$ ,  $Re = 0,3 \times 10^5 \dots 0,4 \times 10^5$ ) в окрестности двух квадратных призм ( $\alpha = 0^\circ$ ) от относительных расстояний между ними в продольном ( $S/H = 0 \dots 10$ ) и поперечном ( $G/H = 0 \dots 10$ ) направлениях.
3. Впервые получены классификация видов колебаний и области изолиний амплитуд колебаний призмы прямоугольного сечения ( $b/H = 2/3$ ) в однородном малотурбулентном потоке ( $M \ll 1$ ,  $Re = 1,2 \times 10^4 \dots 1,3 \times 10^5$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ) при расположении в ее окрестности неподвижной призмы таких же размеров в широком диапазоне изменения относительных расстояний в продольном ( $X/H = 0 \dots 7$ ) и поперечном ( $Y/H = 0 \dots 5$ ) направлениях.
4. Установлено, что из-за положительной аэродинамической интерференции моделей двух высотных зданий существенно снижалась вероятность возникновения ветрового резонанса, а локальные отрывающие усилия в местах сужения потока между зданиями не превышали рекомендуемые СНиП значения. Наиболее опасными оказались участки по краю кровли, где превышение по сравнению с рекомендациями СНиП составило 20%.
5. Выявлено, что при надвижке моста через р. Томь в г. Кемерово рядом расположенный старый частично демонтированный мост усиливал амплитуды колебаний монтируемого строения в 2...4 раза в зависимости от направления ветра. Пролетное строение моста через р. Обь у пос. Красный Яр в исходном варианте на стадии монтажа также могло быть подвержено интенсивным аэроупругим колебаниям двух типов: вихревое возбуждение и галопирование.

6. Разработаны устройства аэродинамического гашения колебаний как для одиночной мостовой конструкции (через р. Обь), так и в случае расположения пролетного строения моста в условиях аэродинамической интерференции (через р. Томь). Устройства были изготовлены и смонтированы на натуральных сооружениях, после чего колебаний конструкций не наблюдалось до окончания монтажа при скоростях ветра до 25 м/с, что подтверждено актами внедрения результатов работы.

В приложении представлены акты внедрения результатов работы.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах**

1. Исследование структуры течения в окрестности двух балок квадратного поперечного сечения в условиях интерференции / С.Д. Саленко, А.Д. Обуховский, Ю.А. Гостеев, Ю.В. Телкова // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 2. – С. 313-323.
2. Саленко, С.Д. Гашение аэроупругих колебаний пролетного строения моста через реку Обь / С.Д. Саленко, А.Д. Обуховский, Ю.В. Телкова // В мире научных открытий. Сер.: Математика. Механика. Информатика. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2011. – № 1 (13). – С. 167-176.
3. Саленко, С.Д. Пассивные гасители аэроупругих колебаний пролетного строения моста на стадии монтажа / С.Д. Саленко, А.Д. Обуховский, Ю.В. Телкова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая, 2011. – Вып. 2 (16). Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru>.
4. Инженерное оборудование высотных зданий / М.М. Бродач, ... Ю.А. Гостеев, А.Д. Обуховский, В.П. Однорал, С.Д. Саленко, Ю.В. Телкова [и др.]; под общ. ред. М.М. Бродач. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2011. – 458 с.
5. Захарова, Ю.В. Аэроупругие колебания конструкции моста в условиях аэродинамической интерференции / Ю.В. Захарова, С.Ю. Медных // Дни науки НГТУ-2002: тез. докл. студ. конф. / под ред. М.А. Кувшиновой. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – С. 37-38.
6. Телкова, Ю.В. Аэроупругая неустойчивость призматических тел в условиях интерференции / Ю.В. Телкова // Устойчивость и турбулентность гомогенных и гетерогенных жидкостей: материалы молодежной конф. / под ред. В.В. Козлова. – Новосибирск: ИТПМ, 2005. – Вып. X. – С. 174-177.
7. Телкова, Ю.В. Аэроупругие колебания призматического тела в условиях интерференции / Ю.В. Телкова // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тез. докл. VI Всероссийской конференции молодых ученых / под ред. В.М. Фомина. – Новосибирск: ИТПМ, 2007. – С. 55-56.
8. Telkova, J.V. Aeroelastic vibrations of a prismatic body in interference conditions / J.V. Telkova // 13<sup>th</sup> Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. – Novosibirsk: Parallel, 2007. – Pt V. – P. 166-170.

9. Telkova, J.V. Flow visualization around the two prismatic bodies [Electronic resource] / J.V. Telkova // 14<sup>th</sup> Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. / ed. V.M. Fomin. – Novosibirsk, 2008. – 1 electron-optical disk (CD-ROM).
10. Investigation in wind tunnel flow interaction with models of two high-rise apartment houses [Electronic resource] / J.V. Telkova, S.D. Salenko, A.D. Obukhovskiy, E.A. Zikov, A.D. Liabchuk // 14<sup>th</sup> Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Proc. / Ed. V.M. Fomin. – Novosibirsk, 2008. – 1 electron-optical disk (CD-ROM).
11. Аэродинамические исследования комплекса высотных зданий / С.Д. Саленко, Ю.А. Гостеев, А.Д. Обуховский, В.П. Однорал, Ю.В. Телкова // Аэродинамика и динамика полета летательных аппаратов: тез. докл. VII школы-семинара СибНИА; под ред. А.Г. Румянцева. – Новосибирск, 2009. – С. 35-38.
12. Саленко, С.Д. Структура течения в окрестности двух цилиндров квадратного поперечного сечения / С.Д. Саленко, А.Д. Обуховский, Ю.В. Телкова // Аэродинамика и динамика полета летательных аппаратов: тез. докл. VIII школы-семинара СибНИА / под ред. А.Г. Румянцева. – Новосибирск, 2010. – С. 45-49.
13. Обуховский, А.Д. Исследование отрывных течений при обтекании призматических тел однородным потоком / А.Д. Обуховский, Ю.В. Телкова, А.Л. Писанова // Наука. Промышленность. Оборона: труды XI Всерос. науч.-техн. конф., 21-23 апр. 2010 г., Новосибирск. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 447-451.
14. Flow visualization around the two square cylinders under interference conditions / S.D. Salenko, A.D. Obukhovskiy, Y.A. Gosteev, J.V. Telkova // 15<sup>th</sup> Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research: Abs. Pt I. / Ed. V.M. Fomin. – Novosibirsk, 2010. – P. 221-222.
15. Телкова, Ю.В. Течение в окрестности двух квадратных призм, расположенных тандемом / Ю.В. Телкова, А.Л. Писанова // Перспективные технологии самолётостроения в России и мире: труды Всерос. науч.-практ. конф. молодых специалистов и студентов, 1-2 июня 2010 г., Новосибирск / под ред. А.Н. Серьёзна, В.К. Белова. – Новосибирск: СибНИА, 2010. – С. 10-14.
16. Телкова, Ю.В. Моделирование атмосферной турбулентности в аэродинамической трубе при помощи равномерной решетки / Ю.В. Телкова, А.Л. Писанова // Наука. Промышленность. Оборона: труды XII Всерос. науч.-техн. конф., 20-22 апр. 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 605-607.
17. Саленко, С.Д. Гашение аэроупругих колебаний пролётного строения моста через реку Томь в городе Кемерово в условиях интерференции / С.Д. Саленко, А.Д. Обуховский, Ю.В. Телкова // Перспективные технологии самолётостроения в России и мире: тез. докл. науч.-практ. конф. молодых специалистов и учёных, 5-6 июля 2011 г., Новосибирск / под общ. ред. А.Н. Серьёзна. – Новосибирск: СибНИА, 2011. – С. 10-11.

Ответственный за выпуск Ю.В. Телкова

Подписано в печать 19.12.2011  
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 1.0,  
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 1303

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630092, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
тел./факс (383) 346-08-57