

На правах рукописи



Мокшин Дмитрий Ильич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО
ТЕПЛООБМЕНА МОДЕЛЕЙ ОДИНОЧНЫХ И ТАНДЕМНО
РАСПОЛОЖЕННЫХ ЗДАНИЙ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Томском государственном архитектурно-строительном университете и Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

- Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Коробков Сергей Викторович
- Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Терехов Виктор Иванович
- Официальные оппоненты: **Логинов Владимир Степанович**
доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор кафедры теоретической и промышленной теплотехники
- Щелчков Алексей Валентинович**
кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», доцент кафедры теплотехники и энергетического машиностроения
- Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Защита состоится «09» октября 2015 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20 и на сайте <http://www.nstu.ru>

Автореферат разослан «18» августа 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



А.В. Чичиндаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена чрезмерным потреблением энергии как в процессе возведения, так и при эксплуатации зданий и сооружений в России, особенно в Сибирском регионе. В настоящее время жилые здания в средней полосе России расходуют на нужды отопления от 350 до 600 кВт.ч/м² в год. В условиях Сибири и Крайнего Севера на отопление панельных домов уходит около 1000 кВт.ч/м² в год. Для сравнения: Германия – 260 кВт.ч/м² в год; высокоширотные государства Швеция, Финляндия, Норвегия – 120÷135 кВт.ч/м² в год. Очевидно, что по этим показателям у нас серьезное отставание.

В решении проблем энергосбережения в строительном комплексе России, помимо увеличения термического сопротивления ограждающих конструкций вновь строящихся зданий и существующего жилого фонда, важную роль будет играть минимизация внешних тепловых потерь за счет рационального расположения зданий относительно ветровых воздействий. Поэтому проведение измерений локальной и средней теплоотдачи к окружающему воздуху является необходимым этапом моделирования тепловых потерь зданий и сооружений. Для описания процессов теплообмена нужны детальные исследования как структуры течения воздушного потока, так и характеристик конвективного теплообмена от всех поверхностей зданий.

Анализ литературных источников свидетельствует о значительном прогрессе в данной области, достигнутом большим числом научных школ как у нас в стране, так и за рубежом. К таковым можно отнести работы в области архитектурной аэродинамики и строительной теплофизики Лыкова А.В., Богословского В.Н., Гагарина В.Г. Исаева С.А., Гувернюка С.В., Гныри А.И., Злодеева А.В., Терехова В.И., Низовцева М.И., Табунщикова Ю.А., Ларичкина В.В., Саленко С.Д., Igarashi T., Richards P.J., Hoxey R.P., Martinuzzi R. J., Nakamura H. и др.

Обтекание одиночных зданий различной высотности, а также системы зданий при различной их планировке, является сложной и многофакторной задачей. Образующаяся система отрывных потоков, взаимодействующих между собой, создает значительные трудности при разработке численных моделей расчета аэродинамики и теплообмена. Это направление сейчас активно развивается, и достигнут определенный прогресс для относительно простых и канонических плоскообтекаемых тел: куб в пограничном слое, протяженная квадратная призма и некоторые другие (Курбацкий А.Ф., Федорова Н.Н., Rodi W., Hanjalic K., Nikitin N., Saha A.K., Hussein H.J.). Поэтому основным инструментом изучения тепловых потерь является экспериментальное исследование на установках, моделирующих реальные условия ветрового воздействия на здания.

Цель работы заключается в экспериментальном изучении влияния формы здания, скорости и угла атаки воздушного потока, а также местоположения на локальный и интегральный турбулентный теплообмен как одиночных призм, так

и при их тандемном расположении для уточнения расчетов ограждающих конструкций, связанных с изменением коэффициента теплоотдачи.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Создать экспериментальную установку, изготовить модели для исследования структуры течения воздушного потока и коэффициентов локального и среднего теплообмена.

2. Исследовать влияние формы модели, скорости и угла атаки воздушного потока на структуру вихреобразования и теплообмен одиночной призмы различной высоты.

3. Получить новые критериальные соотношения для расчета средних коэффициентов теплоотдачи от каждой грани и в целом от одиночных моделей здания различных форм при двух предельных углах атаки воздушного потока.

4. Исследовать вихреобразование, формирование отрывных зон и теплообмен тандема моделей зданий при расположении их как в следе друг за другом, так и со смещением на различные расстояния в трансверсальном направлении.

5. Установить зависимость изменения локального и среднего коэффициентов теплоотдачи моделей зданий призматической формы от их высоты, расположения на поверхности и числа Рейнольдса.

Объект исследования. Локальный и средний коэффициент конвективной теплоотдачи.

Предмет исследования. Уточнение расчетов ограждающих конструкций зданий и сооружений, связанных с изменением коэффициента теплоотдачи.

Метод исследования. Для решения поставленных задач использовалось физическое моделирование на основе теории подобия.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются анализом погрешностей измерения, выполнением тестовых испытаний на определение тепловых потерь, проведением цикла сравнений с экспериментальными данными различных авторов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– получены новые критериальные зависимости для расчета средних коэффициентов теплоотдачи от каждой грани и от всей поверхности одиночных моделей зданий различных форм при углах атаки воздушного потока $\varphi = 0$ и 45° , которые могут быть использованы при расчетах теплового состояния ограждающих конструкций.

– впервые показано, что величина интегрального теплообмена от всей поверхности модели снижается при увеличении относительной высоты призмы H/a от 1 до 12 (приближение двумерного обтекания);

– изучены структура течения и теплообмен тандема моделей зданий и сооружений при расположении их в следе друг за другом, а также со смещением в поперечном направлении. Показано существенное различие в характере обтекания и распределении локальной и средней теплоотдачи наружной поверхности тандема моделей зданий при изменении расстояний между ними $L1/a = 0 \div \infty$ и $L2/a = 0 \div 2,0$;

– обнаружено, что при уменьшении расстояния между моделями $L1/a$, в отличие от тел кубической формы ($H/a = 1,0$), между высокими призмами ($H/a = 6,0$) практически отсутствует застойная зона, воздушный поток подвергается «поджатию», скорость ветра увеличивается, усиливаются вихреобразования и отрывные течения, что приводит к интенсификации теплообмена.

– установлена зависимость изменения локального и среднего коэффициентов теплоотдачи от взаимного расположения моделей на плоскости при изменении расстояний в продольном (расположение моделей в следе) $L1/a$ и поперечном (со смещением) $L2/a$ направлениях между моделями.

Основные научные положения, выносимые на защиту

– методика экспериментального исследования теплообменных процессов моделей зданий и сооружений;

– результаты лабораторных исследований структуры течения и теплообмена одиночных моделей зданий различной высотности ($H/a = 1, 3, 6$);

– результаты исследований теплообмена моделей зданий призматической формы в зависимости от их взаимного расположения на плоскости.

Практическая ценность и реализация результатов работы

Результаты исследований, представленные в виде корреляционных соотношений могут быть использованы в расчетах внешнего теплообмена ограждающих конструкций зданий и сооружений, а также для теплозащиты бетона при монолитном домостроении в зимних условиях.

Результаты работы прошли апробацию в ООО «Проектно-конструкторское бюро ТДСК» (г. Томск), в ФГБУН Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск), в ООО «Полимер-С» (г. Томск), в ОАО «Монолит» (г. Томск).

Полученная база экспериментальных данных может быть использована в инженерных расчетах тепломассообмена тел прямоугольной формы во многих технологических процессах: при сушке кирпича, охлаждении электроники и т. д.

Разработанные программы для ЭВМ № 2013616003 и № 2013619013 используются для обучения магистрантов по направлению 270800 «Строительство» по программе 27080003 «Комплексные экспериментальные исследования аэродинамики и теплообмена моделей зданий и сооружений» в ФГБОУ ВПО ТГАСУ.

Результаты кандидатской диссертации по теме «Экспериментальное исследование конвективного теплообмена моделей одиночных и tandemно расположенных зданий» внедрены в учебный процесс при выполнении курсовых проектов и раздела «Архитектурно-планировочные решения» в рамках дипломного проекта по кафедре «Архитектура промышленных и гражданских зданий» ФГБОУ ВПО ТГАСУ при выполнении теплотехнических расчетов ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Личный вклад автора заключается в создании экспериментального стенда и 12 рабочих участков для визуализационных и тепловых исследований, системы сбора и обработки опытной информации. Автором самостоятельно проведены: систематические экспериментальные исследования, обработка и обобщение полученной информации, оформление публикаций по результатам исследований. Соавторам работ (Гныря А.И., Коробков С.В. и Терехов В.И.) принадлежит постановка задач исследования, обсуждение результатов и участие в написании статей и докладов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

57-я, 58-я, 59-я, 60-я, 61-я конференции студентов и молодых ученых ТГАСУ (г. Томск, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015); XIII, IX, X, XI Международные конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2011, 2012, 2013, 2014); «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» (г. Москва, 2011); XXIII семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям с международным участием (г. Томск, 2012); I, II Конференции «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных зданий» (г. Новосибирск, 2013, 2015); VI Всероссийская конференция «Актуальные вопросы строительства» (г. Новосибирск, 2013); Международный семинар: «Распространение устойчивых технологий в строительстве. Совместный российско-немецкий проект» (г. Томск, 2013); XII Международная конференция «Приоритетные научные направления: от теории к практике» (г. Новосибирск, 2014); Международная конференция «Наука третьего тысячелетия» (г. Уфа, 2014); XXXI Международная конференция «Наука и современность – 2014» (г. Новосибирск, 2014); Международная конференция молодых ученых «Перспективные материалы в науке и технике» (г. Томск, 2014); I Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (г. Томск, 2014); Всероссийская конференция «XXXI Теплофизический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе» (г. Новосибирск, 2014); V международная научно-практической конференция «Фундаментальные и прикладные науки сегодня» (North Charleston, USA, 2015).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 35 работ в научных журналах, сборниках и трудах конференций, из них 3 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Получено 2 патента на полезную модель и 2 программы для ЭВМ.

Работа выполнялась в рамках:

Проект РФФИ № 09-08-00523-а «Комплексные экспериментальные исследования аэродинамики и теплообмена зданий и сооружений», 2009–2011 гг.

Г/к №353/3305н «Разработка и совершенствование энергосберегающих технологий бетонных работ в зимних условиях», 2013 г.

Проект РФФИ № 13-08-00505-а «Аэромеханика и теплообмен моделей системы зданий при вариации их формы и расположения», 2013–2015 гг.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 125 наименований. Полный объём диссертации – 165 страниц, включая 88 рисунков и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, её научная и практическая значимость, новизна работы, сформулированы задачи исследования, дано краткое содержание диссертации.

В первой главе на основании существующих работ представлено современное состояние вопроса по изучению характеристик течения и теплообмена в окрестности плохообтекаемых тел, имеющих типичную форму зданий.

В реальных условиях здания и сооружения находятся, как правило, в окружении достаточно близко расположенных, геометрически подобных объектов. Наличие окружающих тел приводит в исследуемом объекте к изменению аэродинамической картины обтекания и перестройке распределения коэффициентов теплоотдачи. Особенно сильное влияние, как это следует из литературных источников, наблюдается в том случае, когда испытываемое тело располагается в аэродинамическом следе от впереди стоящего по потоку от него препятствия.

Результаты натурных наблюдений дают наиболее полное представление о распределении локальной и средней теплоотдачи зданий и сооружений. Однако натурные эксперименты, в силу их дороговизны и сложности их организации, могут использоваться в исключительных случаях.

За последнее десятилетие значительно возросло количество расчётных работ по данной тематике на специальных универсальных пакетах прикладных программ: *CFX*, *VP2/3*, *FLUENT*, *σ-Flow*, *Flowvision*, *StarCD* и др. В настоящее время здесь достигнут значительный прогресс. Однако сложный трехмерный характер отрывных потоков и особенно процесс их интерференции при обтекании системы преград существенно снижают возможности методов численного моделирования.

В связи с перечисленными трудностями исследований отрывных течений и теплообмена наиболее доступным, информативным и достоверным является метод физического моделирования. Работ, направленных на изучение структуры течения и теплообмена как одиночной призмы, так и их системы в литературе сравнительно мало. Большинство имеющихся работ посвящены изучению среднего теплообмена и не дают информации о локальных значениях конвективного коэффициента теплоотдачи α_k .

Полученные рядом авторов критериальные зависимости не учитывают изменение коэффициента теплоотдачи от таких важных факторов, как форма модели, определяющий размер и местоположение, ограничиваясь при этом лишь углом атаки и скоростью воздушного потока. Эти результаты имеют ограниченный характер и не отражают в полной мере физику взаимодействия модели с потоком воздуха при вынужденной конвекции.

Недостаток информации о влиянии вышеперечисленных параметров явился основанием для проведения экспериментального исследования.

Вторая глава посвящена разработке методики экспериментального исследования коэффициента конвективной теплоотдачи зданий и сооружений в зависимости от физических и климатических условий, а также конструктивно-технологических параметров с использованием метода физического моделирования. Дано описание экспериментального стенда для проведения исследований (рисунок 1, 2).

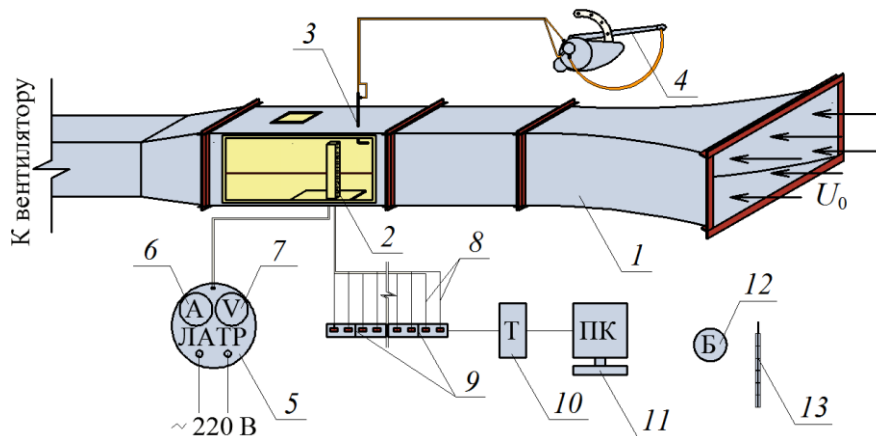


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для измерения локальной и средней теплоотдачи:

- 1 – аэродинамическая труба; 2 – испытываемая модель; 3 – трубка Пито – Прандтля; 4 – микроманометр ММН-2400;
- 5 – регулируемый однофазный автотрансформатор (ЛАТР) TDGC2-3k; 6 – амперметр; 7 – вольтметр; 8 – термопары или датчики теплового потока; 9 – адаптер термопар ТЕРЕМ-4;
- 10 – АЦП; 11 – ПК; 12 – барометр; 13 – термометр технический

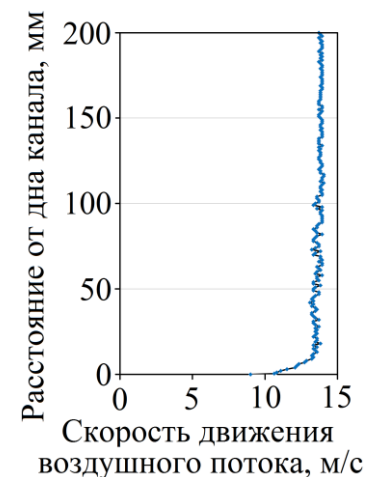


Рисунок 2 – Профиль скоростей воздушного потока воздуха в аэродинамической трубе в сечении установки модели

Рабочие участки для изучения теплообмена представляли собой призмы квадратного сечения со стороной $a = 50$ мм и трех высот $H/a = 1; 3; 6$. Все три модели были выполнены по одной конструктивной схеме, представленной на рисунке 3.

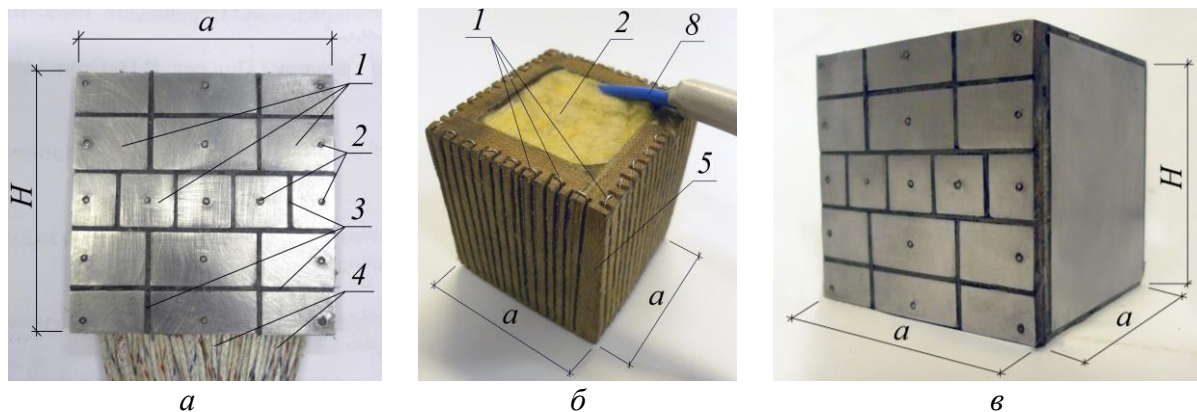


Рисунок 3 – Схема коммутации модели с относительной высотой $H/a = 1$:

a – исследуемая грань; b – каркас модели; v – общий вид модели;

1 – пластины из нержавеющей стали $\delta = 1$ мм; 2 – термопары; 3 – паронитовые полосы $\delta = 1$ мм; 4 – выводы термопар; 5 – текстолитовый каркас $\delta = 5$ мм; 6 – утеплитель из минеральной ваты; 7 – нихромовая проволока $d = 0,4$ мм; 8 – кабель питания

Особенностью этих моделей является то, что исследуемая грань была разделена на сегменты, изолированные друг от друга, а рабочая пластина была изготовлена из малотеплопроводного материала (нержавеющая сталь), что позволило снизить продольные перетечки тепла (рисунок 3, а). В качестве омического нагревателя использовалась нихромовая проволока $d = 0,4$ мм с шагом навивки 2,5 мм. (рисунок 3, б). Для выравнивания теплового потока поверх нагревателя устанавливались медные пластины толщиной 0,8 мм. Прогрев производился со всех сторон призмы. В опытах поддерживался тепловой режим $q_{ст} = const$.

Распределение температуры поверхности измерялось при помощи термопар (ХК), зачеканенных на одной из граней призмы на наружной поверхности и расположенных в горизонтальных и вертикальных сечениях. Максимальное число термопар для модели $H/a = 6$ равнялось 53.

Изучению влияния изменения теплообмена от формы модели было посвящено 72 эксперимента, выполненных в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = U_0 \cdot a / \nu = 1,25 \cdot 10^4 \div 4,25 \cdot 10^4$ при двух углах атаки воздушного потока $\varphi = 0$ и 45° .

Для изучения влияния изменения теплообмена от местоположения призмы в тандеме в рабочую камеру аэродинамической трубы устанавливались две модели: передняя – без нагрева, позади нее – с нагревом. Эксперименты в этой серии проводились при одной скорости воздушного потока $U_0 = 14$ м/с ($Re = 4,25 \cdot 10^4$). Расстояние между моделями изменялись в двух направлениях: продольном – ($L1/a =$ от 0,5 до 6,0 с интервалом 0,5, далее от 6,0 до 30,0 с интервалом 3,0) и поперечном ($L2/a =$ от 0,5 до 2,0 с интервалом 0,5) (рисунок 4).

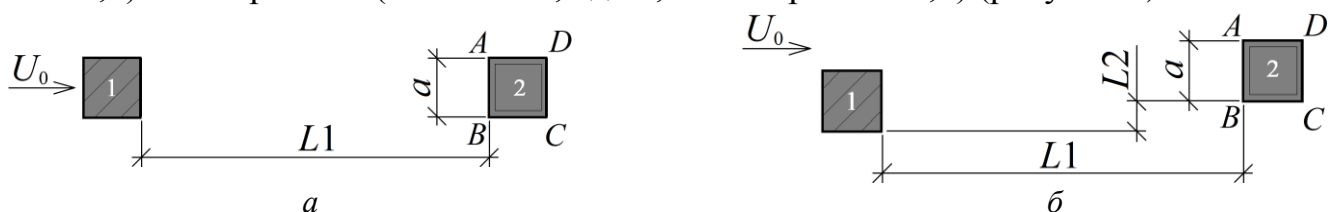


Рисунок 4 – Схема расположения моделей при изменении расстояний между ними $L1/a$ и $L2/a$:

a – расположение моделей в следе; b – расположение моделей со смещением

Локальный коэффициент теплоотдачи измерялся по формуле

$$\alpha_i = q_w / (T_{w,i} - T_0), \quad (1)$$

где q_w – удельный тепловой поток с поправкой на излучение и свободную конвекцию, Вт/м²; $T_{w,i}$ и T_0 – локальная температура стенки в i -й точке и набегающего воздушного потока соответственно, °С. Максимальная погрешность измерения коэффициента теплоотдачи по сделанным оценкам не превышала 7,8 %.

Полученные опытные данные по исследованию коэффициента теплоотдачи представлены в виде корреляционных зависимостей интенсивности теплообмена между критериями подобия для граней призмы и всей её поверхности в зависимости от скорости и угла атаки воздушного потока, формы моделей, а также расстояний между призмами:

$$Nu = C1 \cdot Re^{C2}, \quad (2)$$

где $C1$, $C2$ – коэффициент корреляции и показатель степени.

Средние коэффициенты теплоотдачи по каждой грани призмы и по всей поверхности призмы находились усреднением локальных величин, измеренных по горизонтальным и вертикальным осям грани.

Среднее число Нуссельта определялось как

$$\overline{Nu} = \overline{\alpha} \cdot a / \lambda; \quad (3)$$

$$\overline{\overline{Nu}} = \overline{\overline{\alpha}} \cdot a / \lambda, \quad (4)$$

где $\overline{\alpha}$ и $\overline{\overline{\alpha}}$ – средние коэффициенты теплоотдачи по отдельной грани и по всей призме соответственно, Вт/(м²·°С); a – определяющий размер модели, м.

При исследовании структуры течения воздушного потока на модель, выполненную полностью из органического стекла, наносился тонкий ровный слой раствора черного цвета, полученного путем смешивания типографической краски и керосина. Эксперимент продолжался до тех пор, пока не появилась четко видимая характерная картина обтекания модели потоком воздуха.

Была проведена программа тестовых испытаний, подтверждающая достоверность измерительных методик. Тестовые измерения по теплообмену на лобовой грани проводились в аэродинамической трубе на базе лаборатории по исследованию аэродинамики и тепло- и массообмена Томского государственного архитектурно-строительного университета (ФГБОУ ВПО ТГАСУ) и ФГБУН Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

Третья глава посвящена исследованию и анализу результатов визуализационных и тепловых измерений теплообмена отдельно стоящей призмы, установленной на плоскости, при изменении её относительной высоты $H/a = 1; 3; 6$. Приведены качественные картины симметричного обтекания призмы воздушным потоком при углах атаки $\varphi = 0$ и 45° (рисунок 5).

При увеличении относительной высоты модели H/a картина обтекания потоком воздуха в основании призмы носит схожий характер.

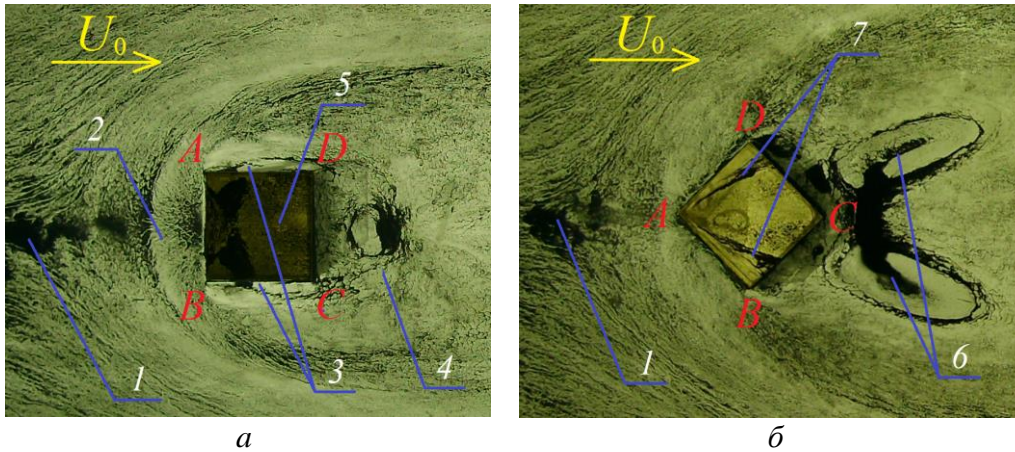


Рисунок 5 – Схема обтекания одиночной призмы потоком воздуха при $Re = 4,25 \cdot 10^4$:
a – угол атаки воздушного потока $\varphi = 0^\circ$; *б* – угол атаки воздушного потока $\varphi = 45^\circ$;
 1 – набегающий поток; 2 – подковообразный вихрь; 3 – зоны рециркуляции;
 4 – сводообразный вихрь; 5 – линии тока; 6 – дорожка Кармана; 7 – клинообразные вихри

Как видно из рисунка 5, *a*, пограничный слой, приближаясь к призме, подвергается трехмерному разделению. На передней грани призмы образуется подковообразный вихрь, простирающийся вдоль боковых граней призмы в направлении вниз по течению. На боковых гранях наблюдается рециркуляция течения. Эти вихри покрывают значительную часть боковых поверхностей. В области за призмой образуется сводообразный вихрь. Его отпечатки обнаружены в виде двух противоположно вращающихся вихрей. Верхняя грань призмы охвачена зоной отрыва, которая начинается около переднего края верхней грани.

На рисунке 5, *б* видно, что помимо особенностей при угле атаки $\varphi = 45^\circ$ на верхней грани призмы образуется два конусообразных вихря в виде λ -структуры. Они совершают спиральное вращение и своими вершинами наклонены к направлению потока. Около боковых граней поток в основном установившийся и движется без разделения. Режим потока становится клинообразным. За призмой также образуется сводообразный вихрь в виде двух противоположно вращающихся вихрей.

Коэффициенты локальной теплоотдачи измерялись по высоте и ширине моделей, при разных числах Рейнольдса $Re = 1,56 \cdot 10^4$; $3,56 \cdot 10^4$; $4,25 \cdot 10^4$ и двух углах атаки воздушного потока $\varphi = 0$ и 45° (рисунок 6).

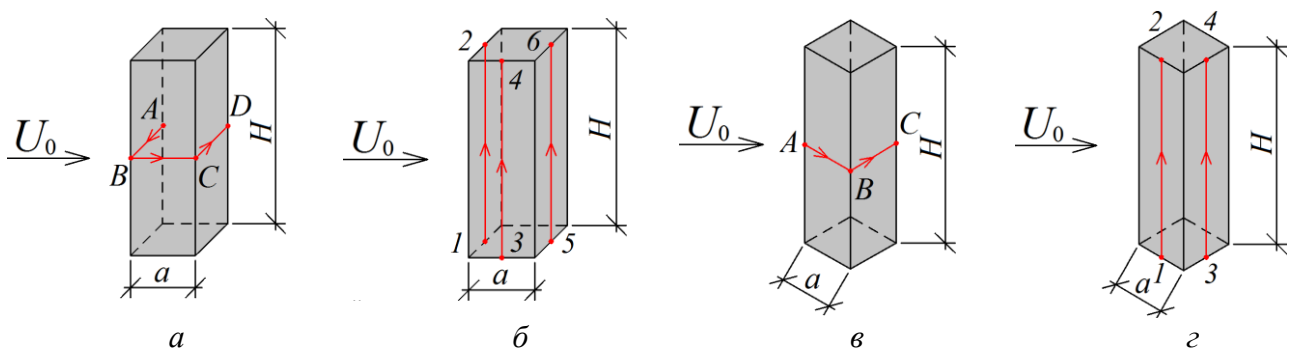


Рисунок 6 – Схема горизонтальных и вертикальных сечений моделей $H/a = 1$; 3; 6 в зависимости от угла атаки воздушного потока φ :
a – по ширине, $\varphi = 0^\circ$; *б* – по высоте, $\varphi = 0^\circ$; *в* – по ширине, $\varphi = 45^\circ$; *г* – по высоте, $\varphi = 45^\circ$

На рисунках 7, 8 и 9 приведены опытные данные по локальному числу Nu моделей с разным соотношением сторон $H/a = 1; 3; 6$ в зависимости от угла атаки набегающего воздушного потока.

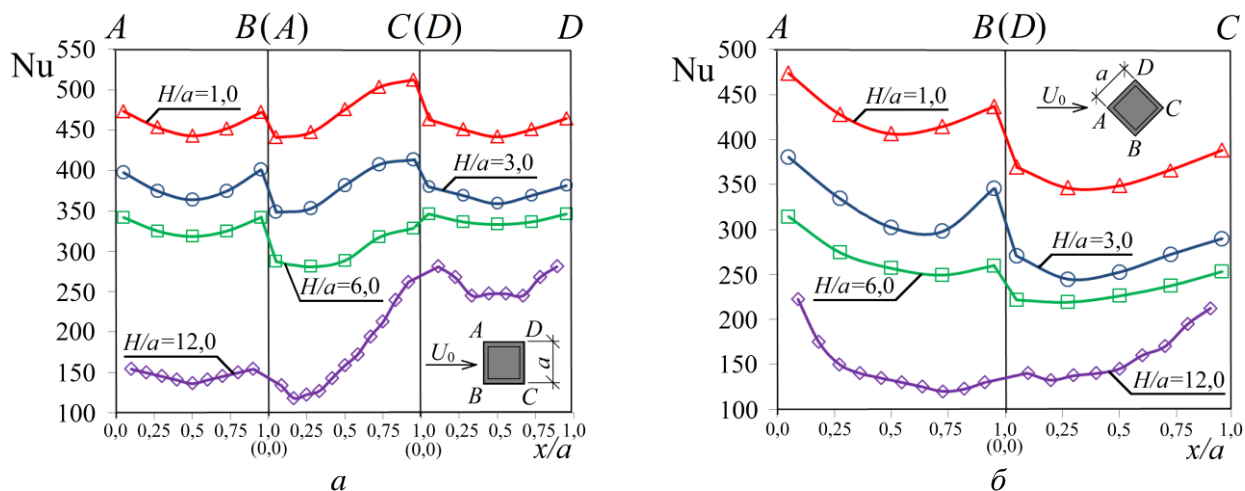


Рисунок 7 – Распределение локального числа Нуссельта по ширине граней модели, $\varphi = 0$ и 45° :
 a – угол атаки воздушного потока $\varphi = 0^\circ$; b – угол атаки воздушного потока $\varphi = 45^\circ$;
 Δ – $H/a = 1$, \circ – $H/a = 3$ и \square – $H/a = 6$ (данные автора, $Re = 4,25 \cdot 10^4$);
 \diamond – $H/a = 12$ (данные Igarashi T., $Re = 4,44 \cdot 10^4$)

Из рисунка 7, a видно, что теплоотдачи на лобовой ($A-B$) и кормовой ($C-D$) гранях соизмеримы между собой при $H/a = 1 \div 6$, а для более высоких квадратных призм ($H/a = 12$, данные Igarashi) теплообмен в кормовой происходит более интенсивно. На боковых гранях ($A-B$) и ($C-D$) распределение Nu не монотонно, что объясняется срывом потока с передней кромки и повторным его присоединением. Наиболее важный вывод, который следует из рисунка 7, заключается в том, что по мере увеличения высоты призмы интенсивность теплообмена значительно снижается. Модели более высокие ($H/a = 12$, двумерный случай) имеют теплоотдачу от боковых граней примерно в 3 раза ниже, чем для куба ($H/a = 1$). Это объясняется как ухудшением условий растекания набегающего потока по поверхности призмы, так и снижением турбулентных пульсаций по мере увеличения ее высоты.

Подобные тенденции наблюдаются и при угле атаки $\varphi = 45^\circ$ (рисунок 7, b), где также интенсивность теплообмена значительно снижается для более высоких моделей. Из рисунка видно, что у моделей $H/a = 1; 3; 6$ максимальный теплообмен находится на передней кромке клина, в месте разделения потока. Далее, по мере роста стабилизирующего влияния дельтообразных вихрей, теплоотдача по ширине фронтальных граней ($A-B$) и ($D-A$) резко снижается из-за возникновения отрывного течения, затем происходит присоединение потока, и локальный коэффициент теплообмена возрастает. По мере увеличения высоты модели координата минимального коэффициента смещается по продольной оси x/a с $0,5$ до $0,75$.

На кормовых гранях ($B-C$) и ($C-D$) интенсивность теплообмена несколько ниже, чем на фронтальных гранях ($A-B$) и ($D-A$), максимальная теплоотдача находится на задней кромке клина, в точке соединения потока, минимальная же на $0,25x/a$, и эта тенденция сохраняется при увеличении высоты модели $H/a = 1 \div 6$.

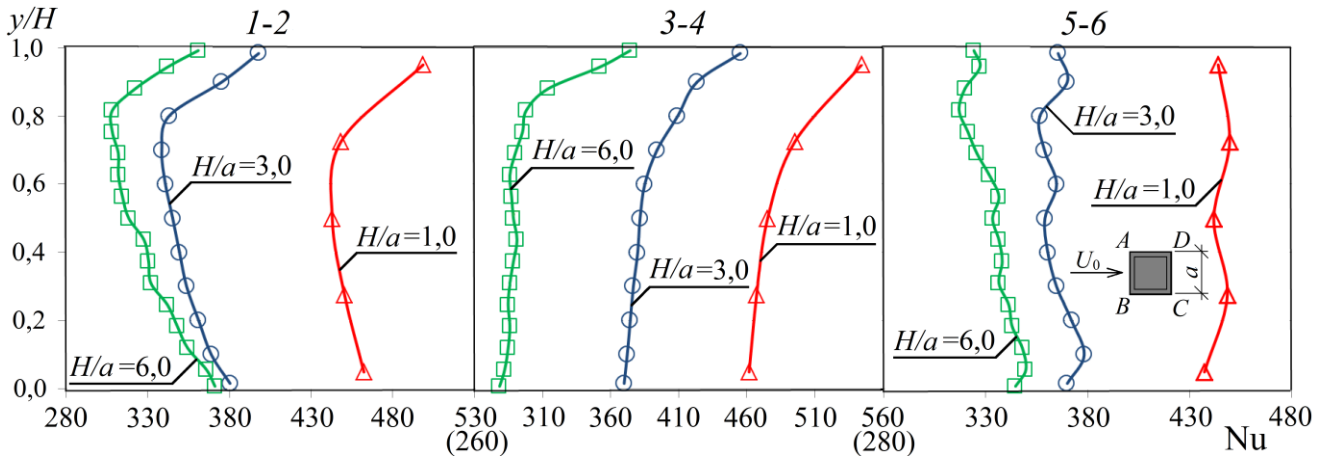


Рисунок 8 – Распределение локального числа Нуссельта по высоте граней модели при $Re = 4,25 \cdot 10^4$ и $\varphi = 0^\circ$:

Δ – $H/a = 1$; \circ – $H/a = 3$; \square – $H/a = 6$

Интенсивность теплообмена по высоте модели в кормовой зоне изменяется слабо (в пределах $\pm 5\%$). Это объясняется преобладающим влиянием вихревого характера теплопереноса в этой области, что наглядно демонстрируется на рисунке 8. На боковых гранях ($B-C$) и ($D-A$), а также лобовой ($A-B$) сильное увеличение теплообмена наблюдается преимущественно в верхней части модели ($y/H > 0,8$), что обусловлено интенсивными потоками газа в этой области, формирующими сводообразный вихрь. Причем это явление имеет место при всех высотах моделей.

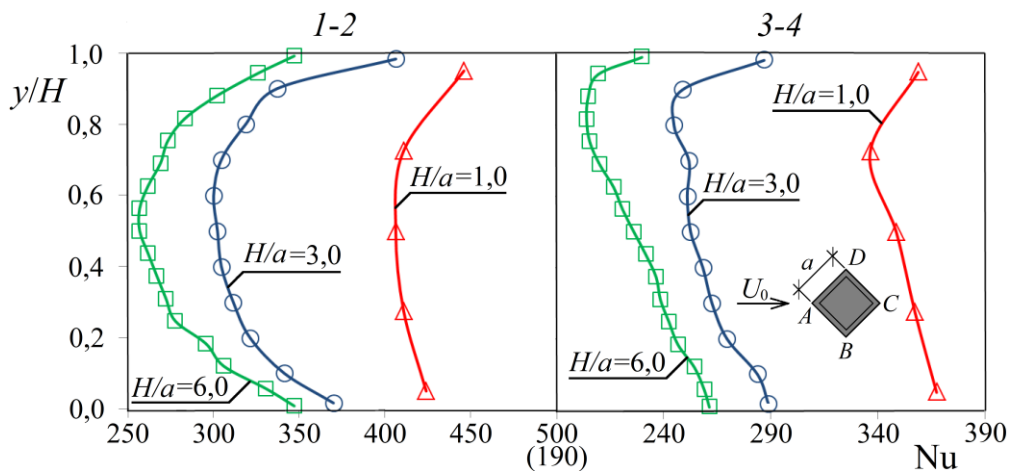


Рисунок 9 – Распределение локального числа Нуссельта по высоте граней модели при $Re = 4,25 \cdot 10^4$ и $\varphi = 45^\circ$:

Δ – $H/a = 1$; \circ – $H/a = 3$; \square – $H/a = 6$

Для угла атаки $\varphi = 45^\circ$ (рисунок 9) видно, что на лобовых гранях ($A-B$) и ($D-A$) величина теплообмена максимальна в середине призмы, а к основанию и ее вершине наблюдается заметное снижение. На кормовых гранях ($B-C$) и ($C-D$) происходит плавное снижение интенсивности теплообмена по высоте на $\approx 20\%$ вплоть до $0,9y/H$, где начинают сказываться клинообразные отрывные потоки.

Для прогнозирования тепловых потерь наибольший практический интерес представляют данные по средней теплоотдаче от всей поверхности модели. Такие результаты представлены на рисунке 10 при углах атаки $\varphi = 0$ и 45° .

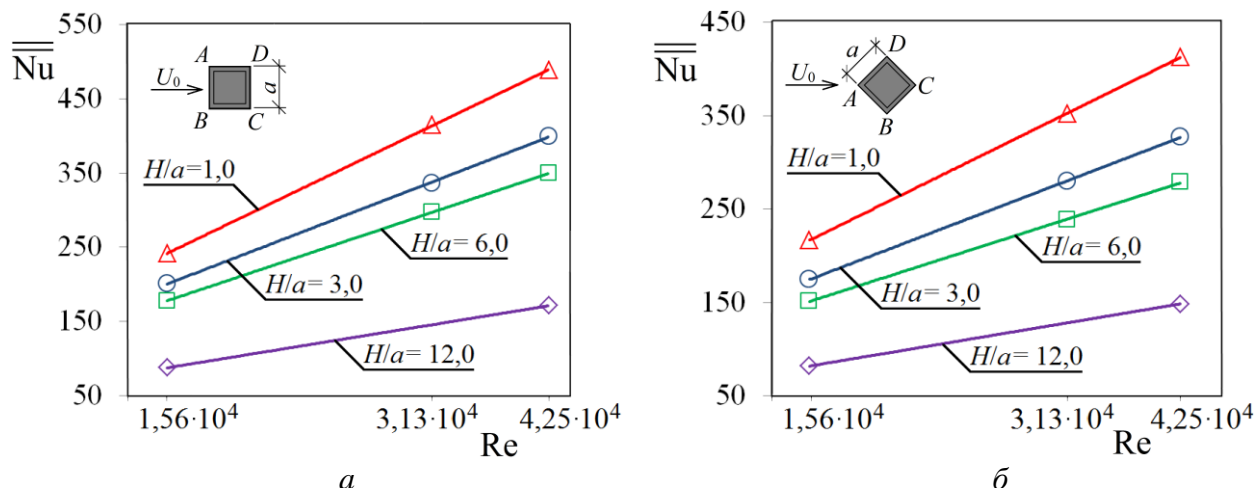


Рисунок 10 – Зависимость среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса при $\varphi = 0$ и 45° :
 a – угол атаки воздушного потока $\varphi = 0^\circ$; b – угол атаки воздушного потока $\varphi = 45^\circ$
 Δ – $H/a = 1$, \circ – $H/a = 3$, \square – $H/a = 6$ (данные автора); \diamond – $H/a = 12$ (Igarashi T.)

Из рисунка 10 следует, что интегральный теплообмен от всей поверхности модели значительно снижается (в 2–3 раза) по мере увеличения относительной высоты модели. Снижается при этом и показатель степени в эмпирических корреляциях $Nu = C1 \cdot Re^{C2}$. Значения коэффициентов $C1$ и $C2$ представлены в тексте диссертации и полученные обобщающие зависимости рекомендуется использовать в инженерных расчётах.

Четвертая глава посвящена анализу результатов исследования аэродинамической структуры отрывных потоков и теплообмена тандемно расположенных призм при изменении расстояния между ними в продольном направлении $L1/a$ относительно движения воздушного потока.

При изменении расстояния $L1/a$ между моделями картина течения имеет ряд особенностей по сравнению с обтеканием одиночной призмы (рисунок 11).

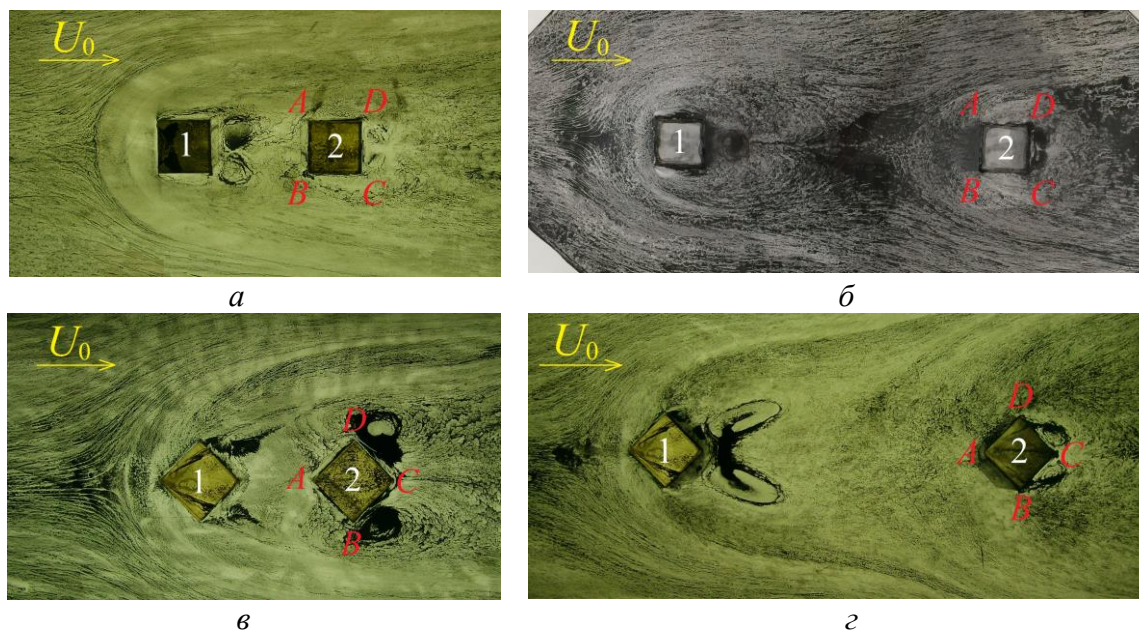


Рисунок 11 – Картина обтекания двух призм в следе при изменении расстояния между моделями:
 a – $L1/a = 1,5$; $Re = 4,25 \cdot 10^4$; $\varphi = 0^\circ$; b – $L1/a = 6,0$; $Re = 4,25 \cdot 10^4$; $\varphi = 0^\circ$;
 v – $L1/a = 1,5$; $Re = 4,25 \cdot 10^4$; $\varphi = 45^\circ$; z – $L1/a = 6,0$; $Re = 4,25 \cdot 10^4$; $\varphi = 45^\circ$.

При $\varphi = 0^\circ$ и расстоянии между моделями $L1/a = 0,5 \div 4,0$ область влияния сводообразного вихря, образованного за моделью 1, увеличивается, далее при $L1/a = 4,0 \div \infty$ степень его воздействия на модель 2 снижается. Очертания подковообразного вихря перед моделью 2 проявляются только при $L1/a = 6,0$, где также наблюдается присоединение отрывного течения на верхней грани. Зоны рециркуляции находящиеся на боковых гранях ($B-C$) и ($D-A$) модели 2, уменьшаются с увеличением расстояния $L1/a$ от 0,5 до 6,0, где они практически отсутствуют. Далее при $L1/a = 6,0 \div \infty$ наблюдается интенсивное развитие этого течения. Сводообразный вихрь, образованный за моделью 2, слабо развит при $L1/a = 0,5 \div 3,0$, далее при расстояниях $L1/a = 3,0 \div 4,5$ наблюдается ярко выраженное очертание зоны его влияния. При $L1/a = 4,5 \div \infty$ воздействие этого вихря на модель 2 снижается.

При $\varphi = 45^\circ$ и расстоянии между моделями $L1/a = 1,5$ наблюдается увеличение зоны влияния сводообразного вихря, образованного за моделью 1, и прослеживается его смещение к боковым ребрам B и D модели 2. Однако его влияние распространяется не только на фронтальные, но и на кормовые грани. При увеличении расстояния между моделями $L1/a = 1,5 \div \infty$ область влияния сводообразных вихрей, образованных как за моделью 1, так и за моделью 2, уменьшается до масштабов отдельно стоящей призмы.

Отметим, что наиболее выраженные изменения теплообмена при изменении расстояния $L1/a$ наблюдаются на боковых гранях ($B-C$) и ($D-A$) при угле атаки воздушного потока $\varphi = 0^\circ$ (рисунок 12).

Из рисунка 12 видно, что на боковых гранях ($B-C$) и ($D-A$) модели 2 при увеличении расстояния между моделями вначале происходит интенсификация локального теплообмена. Это обусловлено постепенным размыванием вихревой застойной зоны между призмами. Рост теплообмена имеет место вплоть до $L1/a = 6$, когда влияние высокотурбулентных отрывных потоков от первой призмы максимально. Далее влияние модели 1 на теплоотдачу задней модели ослабевает, и при удалениях $L1/a \geq 27$ модель в следе можно считать как отдельно стоящую.

Подобные закономерности наблюдаются и для среднего по граням теплообмена. Такие данные при вариации расстояния между призмами $L1/a$ и углах атаки воздушного потока $\varphi = 0$ и 45° показаны на рис. 13 и 14. Для сравнения на этих рисунках представлены данные для $L1/a \rightarrow \infty$, что соответствовало случаю обтекания отдельно стоящей призмы на плоскости.

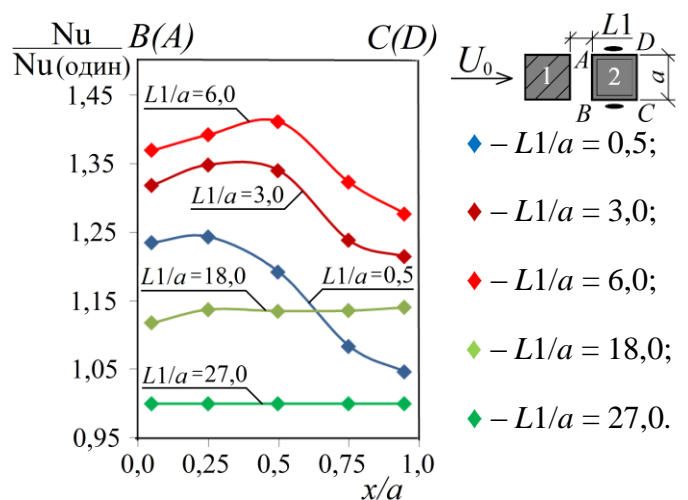


Рисунок 12 – Теплообмен по грани ($B-C$) модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L1/a$, $\varphi = 0^\circ$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$

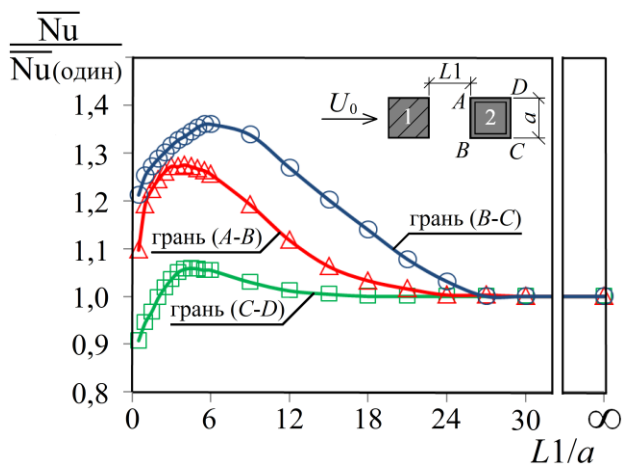


Рисунок 13 – Теплообмен граней модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L1/a$, $\varphi = 0^\circ$, $U_0 = 14$ м/с:
 Δ – грань (A-B); \circ – грани (B-C) и (D-A);
 \square – грань (C-D)

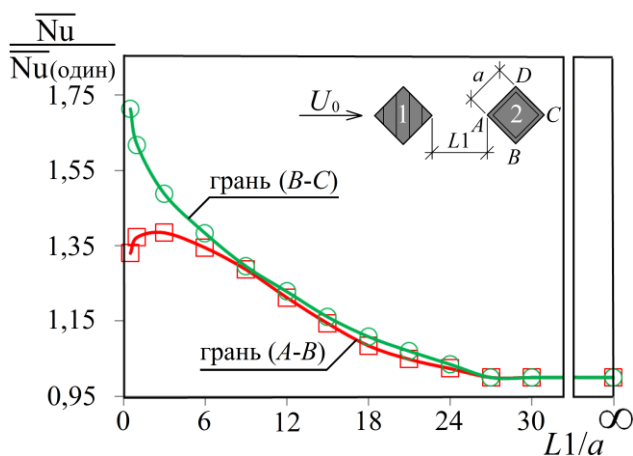


Рисунок 14 – Теплообмен граней модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L1/a$, $\varphi = 45^\circ$, $U_0 = 14$ м/с:
 \square – грани (A-B) и (D-A);
 \circ – грани (B-C) и (C-D)

Из рисунка 13 следует, что максимальный теплообмен на всех стенках призмы достигается при расстояниях между моделями $L1/a = 4,0 \div 6,0$. При сближении моделей ($L1/a \rightarrow 0$), вследствие образования застойной вихревой ячейки между призмами, конвективный теплоперенос подавляется. При этом наибольшая интенсификация теплообмена имеет место на боковых гранях (B-C) и (D-A), минимальная – на кормовой (C-D). На передней грани (A-B) и наблюдается промежуточное значение, и по сравнению с отдельно стоящей моделью влияние вихревого следа от передней призмы сказывается в меньшей мере.

По мере удаления призм друг от друга ($L1/a > 6,0 \div 21,0$) средний теплообмен по граням модели 2 постепенно снижается, и особенно на боковых гранях (B-C) и (A-D), что в итоге уменьшает вклад этих граней в суммарный теплообмен от всей поверхности.

Подобные тенденции наблюдаются и при угле атаки воздушного потока $\varphi = 45^\circ$ (рисунок 14). Однако экстремальное поведение теплоотдачи на передней грани (A-B) выражено в меньшей мере, чем при угле атаки $\varphi = 0^\circ$, а в кормовой зоне средний коэффициент теплоотдачи плавно снижается по мере увеличения расстояния между моделями и асимптотически переходит к значению для отдельно стоящей призмы ($L1/a \rightarrow \infty$).

Для прогнозирования тепловых потерь наибольший практический интерес представляют данные по средней теплоотдаче от всей поверхности призмы. Такие опытные результаты представлены на рисунке 15 при $\varphi = 0$ и 45° . Отметим наиболее важные особенности поведения интегрального теплообмена в зависимости от расстояния между моделями $L1/a$ и угла атаки φ .

Из рисунка 15 видно, что при изменении расстояния между моделями $L1/a$ угол атаки воздушного потока φ оказывает сильное влияние на величину интегрального теплообмена от всей поверхности модели 2 и в целом повторяет поведение теплообмена на отдельных гранях (рисунки 13 и 14).

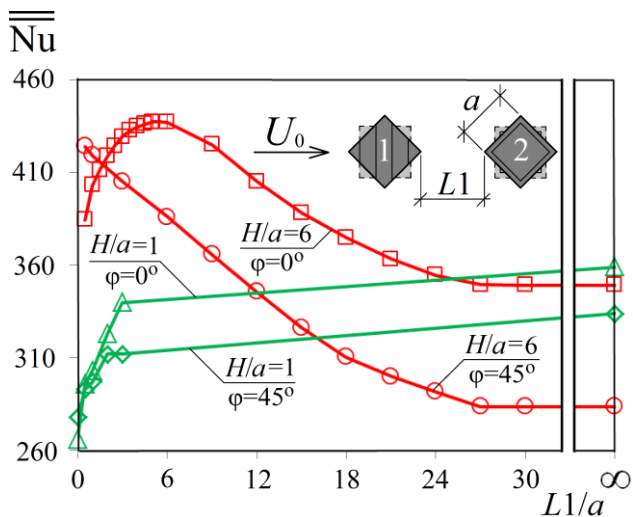


Рисунок 15 – Теплообмен по всей поверхности модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L1/a$, $U_0 = 14$ м/с:

- – $\varphi = 0^\circ$ (данные автора [$H/a = 6$]);
- – $\varphi = 45^\circ$ (данные автора [$H/a = 6$]);
- △ – $\varphi = 0^\circ$ (опыты Коробкова и др. [Куб]);
- ◇ – $\varphi = 45^\circ$ (опыты Коробкова и др. [Куб])

На рисунке 15 для сопоставления представлены результаты экспериментов Коробкова и др. по интегральной теплоотдаче тандема кубов. Видно, что эти данные качественно ведут себя иным образом – вначале, по мере удаления, теплоотдача резко возрастает, а затем при $L1/a > 4$ этот рост замедляется. Отсутствие подробных данных в этой области не позволяет провести более детального сравнения и анализа результатов измерений, полученных для призмы и куба.

Таким образом, механизм снижения теплообмена при увеличении расстояния между призмами $L1/a$, как свидетельствуют об этом результаты визуализационных наблюдений, объясняется снижением воздействия отрывных течений на модель, находящуюся в следе, и уменьшением степени влияния вихреобразования между моделями.

Пятая глава посвящена анализу результатов визуализационных и тепловых измерений теплообмена тандема призм при изменении расстояния между ними в поперечном направлении $L2/a$ относительно движения воздушного потока.

При изменении расстояния $L2/a$ между моделями аэродинамическая картина имеет сложный характер, который можно проследить на рисунке 16.

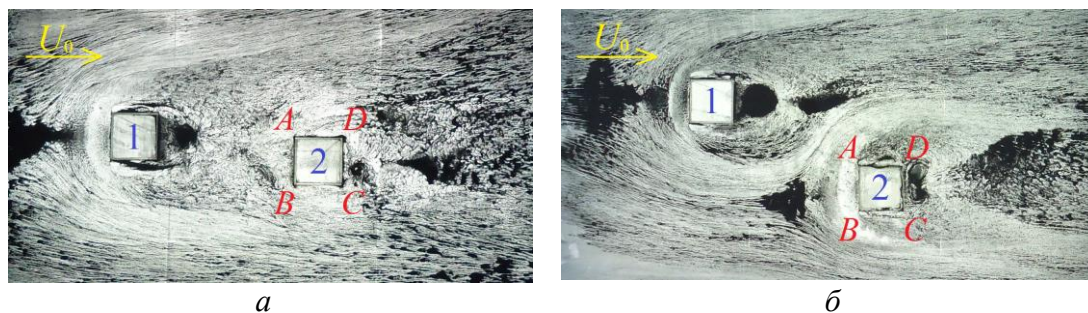


Рисунок 16 – Картина обтекания двух призм, смещенных в поперечном направлении: а – $L1/a = 3$, $L2/a = 0,5$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 0^\circ$; б – $L1/a = 3$, $L2/a = 2,0$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 0^\circ$

При максимальном сближении ($L1/a < 0,5$) различие между данными по среднему теплообмену (\overline{Nu}) и для $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$ невелико и не превышает 10 %. С увеличением расстояния поведение данных начинает качественно изменяться. Так, для $\varphi = 0^\circ$ интенсивность теплообмена вначале возрастает, достигает максимума при $L1/a \sim 5 \div 6$, а затем плавно снижается до величины отдельно стоящей призмы. При $\varphi = 45^\circ$ теплообмен монотонно снижается с увеличением дистанции между моделями. Только на малых расстояниях $L1/a = 0,5 \div 3,0$ теплообмен при $\varphi = 45^\circ$ выше, чем при $\varphi = 0^\circ$.

При малом смещении $L2/a = 0,5$ (рисунок 16, *a*) изменение потока наблюдается непосредственно за моделью 1 в виде отклонения зоны вторичного отрыва перед моделью 2 и вихревой дорожки за ней. Грань ($D-A$) попадает в след модели 1, в то время как грань ($B-C$) оказывается под воздействием вторичного отрыва, сформированного ребром B . По мере увеличения смещения $L2/a > 2,0$ (рисунок 16, *б*) модель 2 гранью ($A-B$) входит в зону действия первичного отрыва, и разделение потока становится более явным. Вихревая дорожка в следе модели 2 отклоняется в сторону ребра D под воздействием отрывной струи.

При большом смещении $L2/a > 2,0$ картина обтекания второй призмы приближается к картине обтекания впереди стоящей призмы или одиночной призмы. При этом отчетливо обнаруживаются те же режимы течения, что и при обтекании потоком воздуха одиночно стоящей призмы.

При отсутствии смещения ($L2/a = 0$) распределение теплоотдачи на передней грани симметрично с минимумом посередине модели. Это видно из рисунка 17, где представлены результаты экспериментов по относительному числу Нуссельта на фронтальной поверхности модели 2 при различных ее смещениях в поперечном направлении.

По мере выхода модели 2 из тени модели 1 теплоотдача на грани A начинает возрастать, а на грани B – снижаться. Причем наиболее сильный рост (до 50 %) наблюдается при $L2/a = 0,5$, а при дальнейшем увеличении смещения происходит подавление теплообмена.

При величине смещения, превышающей два калибра ($L2/a > 2$), позади стоящая модель выходит из области возмущения, созданной передней моделью, и величина теплообмена приближается к одиночной призме $Nu/Nu_{(один)} \rightarrow 1$.

Характер изменения среднего по граням теплообмена в зависимости от расстояний между призмами $L1/a$ и $L2/a$ при угле атаки воздушного потока $\varphi = 0^0$ показан на рисунке 18. Для сравнения на этих рисунках представлены данные для $L2/a \rightarrow \infty$, что соответствовало случаю обтекания одиночной призмы на плоскости.

Из рисунка 18 следует, что по мере удаления призм друг от друга на расстояние $L2/a$ наблюдается интенсификация теплосъема с поверхностью исследуемой второй призмы. При различных расстояниях между моделями $L1/a$ смещение от продольной оси канала на расстояние $L2/a$ приводит к увеличению разницы между средними коэффициентами теплообмена от граней исследуемой модели более чем на 60 % (рисунки 18, *a* и 18, *в*).

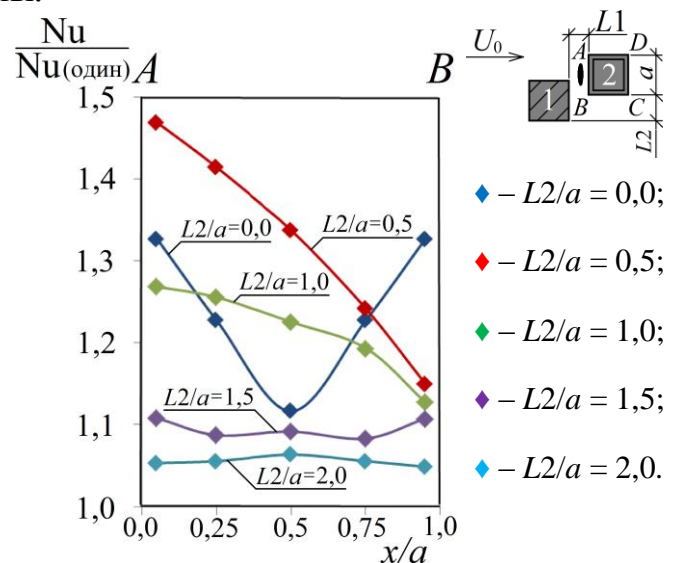


Рисунок 17 – Теплообмен по грани ($A-B$) модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L2/a$, $\varphi = 0^0$, $L1/a = 1,0$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$

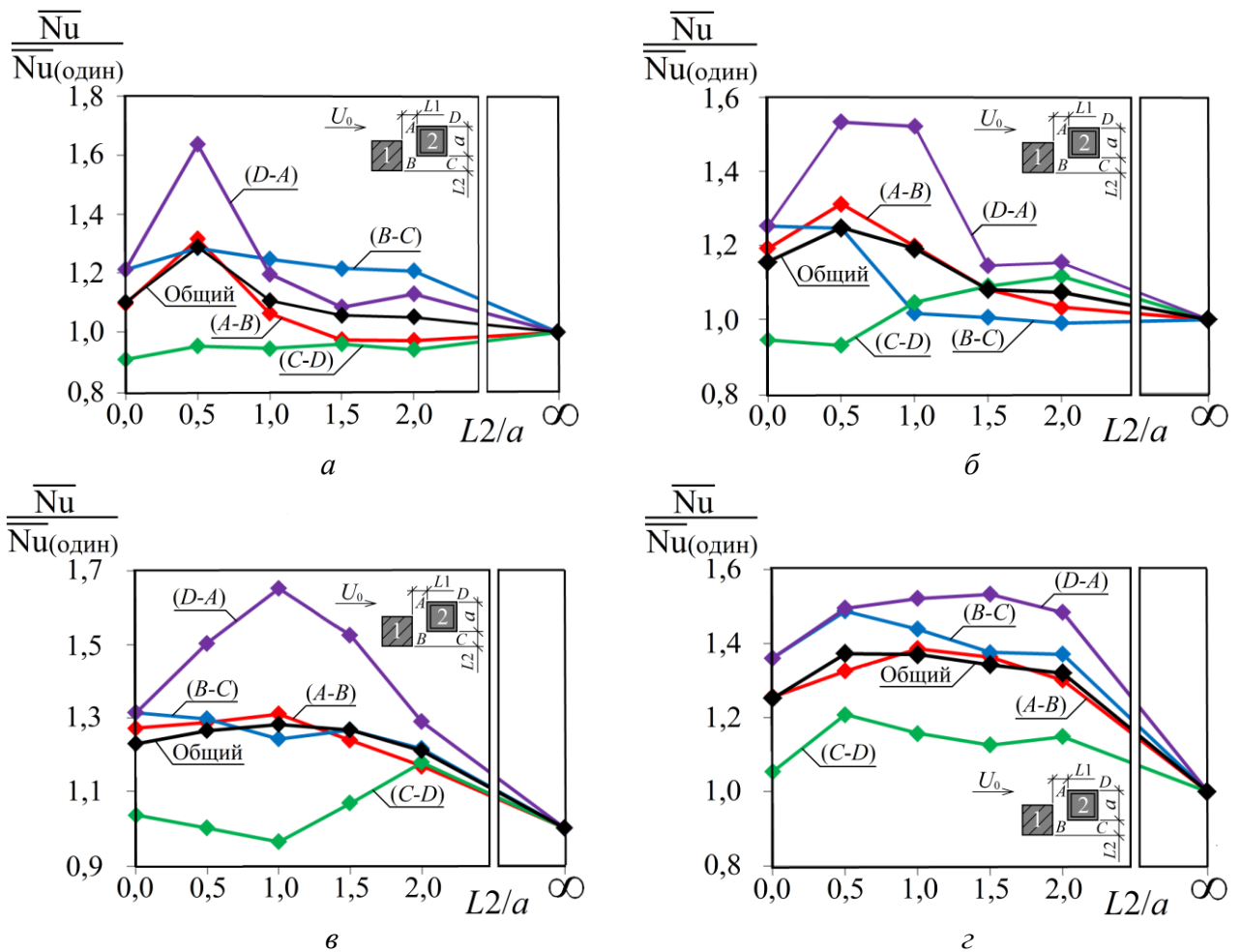


Рисунок 18 – Теплообмен граней модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L2/a$, $\varphi = 0^\circ$, $U_0 = 14$ м/с:

$a - L1/a = 0,5$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 0^\circ$; $б - L1/a = 1,0$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 0^\circ$;

$в - L1/a = 3,0$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 0^\circ$; $г - L1/a = 6,0$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 0^\circ$.

- ◆ – средний по грани (A-B); ◆ – средний по грани (B-C);
- ◆ – средний по грани (C-D); ◆ – средний по грани (D-A); ◆ – средний по призме.

Из рисунка 18, б видно, что теплообмен от кормовой грани (C-D) также может вносить заметный вклад в общий теплообмен при расстояниях между моделями $L1/a = 1,0$ и $L2/a = 2,0$.

На рисунке 19 представлены результаты по средней теплоотдаче от всей поверхности призмы при изменении расстояний $L1/a$ и $L2/a$ между ними, $\varphi = 0^\circ$.

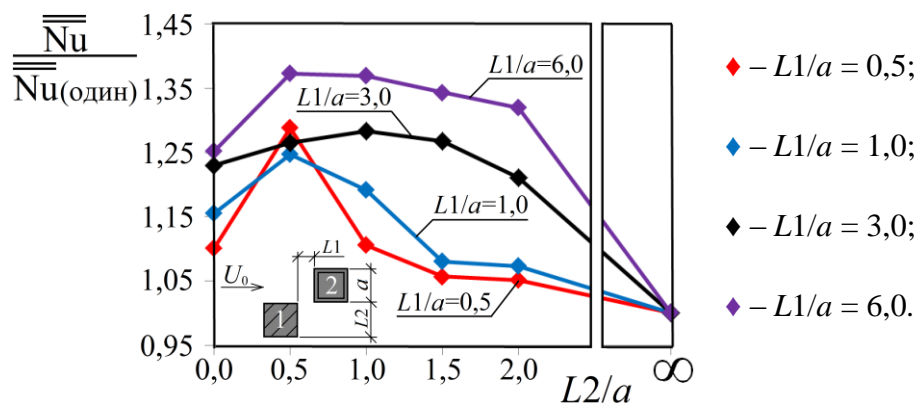


Рисунок 19 – Теплообмен по всей поверхности модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L2/a$, $\varphi = 0^\circ$, $U_0 = 14$ м/с

Из рисунка 19 видно, что при смещении впередистоящей модели на расстояние $L2/a$ наблюдается интенсификация интегрального теплообмена от всей поверхности второй призмы: при максимальном сближении моделей ($L1/a = 0,5 \div 1,0$) смещение относительно продольной оси приводит к снижению теплообмена при $L2/a > 1,0$; при среднем удалении ($L1/a = 3,0$) – при $L2/a > 1,5$; при большом удалении ($L1/a = 6,0$) – при $L2/a > 2,0$.

Минимальное смещение на $L2/a = 0,5 \div 1,0$ приводит к увеличению значений интегрального теплообмена от всей поверхности позади стоящей призмы в тандеме от 3 до 13 % при всех расстояниях между моделями $L1/a$.

Механизм снижения теплообмена при увеличении расстояния между призмами $L2/a$, как свидетельствуют визуализационные картины наблюдения, объясняется тем, что позади стоящая модель выходит из аэродинамического следа впередистоящей модели, снижается воздействие отрывных течений и вихреобразования, что приводит к уменьшению значений коэффициентов теплообмена, при этом картина обтекания приближается к одиночной призме.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Проведены комплексные экспериментальные исследования конвективного теплообмена от одиночных квадратных призм и их тандема, моделирующих здания различной высотности ($H/a = 1, 3, 6$), при вариации угла атаки, скорости обтекания и их взаимного расположения.

2. Получены новые критериальные соотношения для расчета средних коэффициентов теплоотдачи от каждой грани и в целом от одиночных моделей здания различной высоты ($H/a = 1, 3, 6$) при двух углах атаки воздушного потока $\varphi = 0$ и 45° ;

3. Впервые показано, что интенсивность теплообмена уменьшается по мере увеличения относительной высоты призмы. При этом средний коэффициент теплоотдачи от всей модели здания снижается (до $55 \div 65$ %) по мере увеличения высоты модели H/a от 1 до 6.

4. Изучено влияние месторасположения тандема моделей зданий, находящихся на различных расстояниях друг от друга ($L1/a = 0 \div \infty$) и смещенных в поперечном направлении ($L2/a = 0 \div 2$). Выявлено, что при изменении расстояния между моделями ($L1/a$) максимальный теплообмен достигается при $\varphi = 0^\circ$ на $L1/a = 5 \div 6$, а при $\varphi = 45^\circ$ на $L1/a = 0,5$. При сближении или удалении моделей от этих положений теплоотдача снижается.

Смещение моделей в поперечном направлении ($L2/a$) также приводит к неравномерному изменению интегральной теплоотдачи с максимумом при $L2/a = 0,5$ и постепенным снижением взаимного влияния при $L2/a > 2$.

5. Полученные опытные результаты по локальной и средней теплоотдаче для моделей при вариации расстояний $L1/a$ и $L2/a$ между ними позволяют

проводить оценки теплового состояния зданий призматической формы, и эти данные могут быть использованы в инженерном проектировании.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

В изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Гныря А.И., Коробков С.В., Кошин А.А., **Мокшин Д.И.**, Терехов В.И. Комплексные экспериментальные исследования аэродинамики и теплообмена моделей зданий и сооружений // Вестник ТГАСУ. –2011. –№ 4. –С. 113–126.

2. Гныря А.И., Коробков С.В., **Мокшин Д.И.**, Кошин А.А., Терехов В.И. Влияние числа Рейнольдса и угла атаки воздушного потока на распределение локального и среднего коэффициентов теплоотдачи моделей зданий // Вестник ТГАСУ. –2013. –№ 3. –С. 320–328.

3. Гныря А.И., Коробков С.В., Бояринцев А.П., **Мокшин Д.И.** Исследование теплообмена тандема моделей зданий при линейном их расположении // Вестник ТГАСУ. –2014. –№ 5. –С. 90–97.

В изданиях, входящих в перечень SCOPUS:

4. A Gnyrya, S Korobkov, **D Mokshin** and A Koshin Study of the average heat transfer coefficient at different distances between wind tunnel models // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **71** (2015) 012036.

Публикации в сборниках всероссийских и международных конференций:

5. **Мокшин Д.И.**, Кошин А.А., Коробков С.В., Гныря А.И. Экспериментальные исследования аэродинамики моделей зданий при помощи сажемазляной визуализации // Перспективы развития фундаментальных наук: труды VIII Международной конференции студентов и молодых учёных (Томск, 26–29 апреля 2011 г.). –НИ ТПУ. –2011. –№ 8. –С. 555–557.

6. Кошин А.А., **Мокшин Д.И.**, Коробков С.В., Гныря А.И., Терехов В.И. Аэродинамическая структура обтекания моделей зданий. Сажемазляная визуализация и поля давлений. // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сборник трудов Международной научной конференции (Москва, 19–21 октября 2011 г.). –МГСУ. –2011. –С. 138–143.

7. **Мокшин Д.И.**, Кошин А.А., Коробков С.В., Гныря А.И. Исследование теплообмена моделей высотных зданий и сооружений. Методика проведения эксперимента // Материалы 58-й научно-технической конференции студентов и молодых ученых (Томск, 26 апреля, 2012 г.). –ТГАСУ. –2012. –№ 58. –С. 151–153.

8. Гныря А.И., Коробков С.В., Кошин А.А., Терехов В.И., **Мокшин Д.И.** Поле давлений при отрыве потока за прямоугольной призмой в пограничном слое. Влияние высоты преграды и угла атаки // XXIII Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Томск, 26–29 июня, 2012 г.). –НИ ТПУ. –2012. –№ 23. –С. 100–102.

9. **Мокшин Д.И.**, Кошин А.А., Коробков С.В., Гныря А.И. Исследование теплообмена одиночных моделей зданий в виде квадратных призм при вариации чисел Рейнольдса // Инвестиции и недвижимость как материальный базис модернизации и инновационного развития экономики: труды III Всероссийской научно-практической конференции (Томск, 25–26 февраля, 2013 г.). –ТГАСУ. –2013. –№ 3. –258–263.

10. **Мокшин Д.И.**, Коробков С.В., Гныря А.И., Терехов В.И., Кошин А.А. Исследование локального и среднего коэффициента теплоотдачи для уточнения технологии проектирования с целью повышения энергоэффективности ограждающих конструкций малоэтажных зданий // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий: сборник докладов научно-практической конференции (Новосибирск, 19–20 марта 2013 г.). –ИТ СО РАН. –2013. –С. 325–329.

11. **Мокшин Д.И.**, Гныря А.И., Коробков С.В., Кошин А.А. Исследование теплообмена моделей зданий и сооружений // VI Всероссийская конференция «Актуальные вопросы строительства»: сборник трудов научно-технической конференции (Новосибирск, 9–11 апреля 2013 г.). –НГАСУ. –2013. –№ 6. –С. 325–329.

12. **Мокшин Д.И.**, Кошин А.А., Коробков С.В., Гныря А.И. Исследование теплообмена одиночных моделей зданий в виде квадратных призм при изменении угла атаки воздушного потока // Перспективы развития фундаментальных наук: труды X Международной конференции студентов и молодых учёных (Томск, 23–26 апреля 2013 г.). –НИ ТПУ. –2013. –№ 10.–С. 710–712.

13. **Мокшин Д.И.**, Кошин А.А., Коробков С.В., Гныря А.И. Исследование теплообмена различных форм моделей монолитных зданий в зависимости от угла атаки и скорости воздушного потока // Перспективы развития фундаментальных наук: труды XI Международной конференции студентов и молодых учёных (Томск, 22–25 апреля 2014 г.). –НИ ТПУ. –2013. –№ 11. –С. 796–799.

14. **Мокшин Д.И.**, Коробков С.В. Исследование среднего теплообмена ряда тел при изменении расстояния между ними по направлению течения воздушного потока. Угол атаки воздушного потока 45 градусов // Приоритетные научные направления: от теории к практике: сборник материалов XII Международной научно-практической конференции (Новосибирск, 30 июня, 2014 г.). –ЦНРС. –2014. –№ 12. –С. 132–138.

15. **Мокшин Д.И.**, Коробков С.В. Методика проведения экспериментов по исследованию структуры течения воздушного потока при помощи сажемасляной визуализации // Наука третьего тысячелетия: сборник статей Международной научно-практической конференции (Уфа, 28 июля 2014 г.). –2014. –С. 30–34.

16. **Мокшин Д.И.** Структура течения воздушного потока ряда квадратных призм при линейном их расположении // Роль технических наук в развитии обще-

ства: сборник статей Международной научно-практической конференции (Уфа, 22 августа 2014 г.). –2014. –С. 34–40.

17. **Мокшин Д.И.**, Коробков С.В. Исследование среднего теплообмена ряда тел при изменении расстояния между ними по направлению течения воздушного потока. Угол атаки воздушного потока 0 градусов // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции (Новосибирск, 25 сентября 2014 г.). –ЦНРС. –2014. –№ 6. –С. 161–167.

18. **Мокшин Д.И.**, Коробков С.В., Гныря А.И., Терехов В.И. Внешний теплообмен тандема моделей зданий, расположенных в следе // XXXI Теплофизический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе: сборник докладов Всероссийской конференции (Новосибирск, 17-19 ноября 2014 г.). –ИТ СО РАН. –2014. –№ 31. –С. 97–102.

19. Гныря А.И., Коробков С.В., **Мокшин Д.И.**, Аношкина О.О., Михайлова С.М., Мокшин Р.И. Локальный теплообмен по высоте тандема моделей зданий при самых малых расстояниях между ними и вариации их расположения // Фундаментальные и прикладные науки сегодня: сборник материалов докладов V международной научно-практической конференции (North Charleston, USA, 30-31 марта 2015). –GreateSpace. –2015. –№ 5. –Т. 3. –С. 128–131.

Объекты интеллектуальной собственности:

20. Система для поэтажного возведения монолитных железобетонных зданий в зимних условиях: пат. 120122 Рос. Федерация: МПК Е 04 G 11/02 / Жаркой Р.А., Гныря А.И., Коробков С.В., Ильясова Т.А., **Мокшин Д.И.**; заявитель и патентообладатель Том. гос. архит.-строит. ун-т. – № 2012114136; заявл. 10.04.2012; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25.

21. Устройство для прогрева замоноличиваемых стыков при возведении зданий со сборным и сборно-монолитным каркасом в зимних условиях: пат. 123004 Рос. Федерация: МПК G 04 B 40/02 / Гныря А.И., Бояринцев А.П., Коробков С.В., **Мокшин Д.И.**; заявитель и патентообладатель Том. гос. архит.-строит. ун-т. – № 2012117402; заявл. 26.04.2012; опубл. 20.12.2012, Бюл. № 35.

22. Расчет локального коэффициента конвективной теплоотдачи моделей зданий в виде квадратных призм: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616003 Рос. Федерация / Коробков С.В., **Мокшин Д.И.**; правообладатель ТГАСУ. – заявл. 07.05.2013; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 3.

23. Расчет локального коэффициента динамического давления на поверхности моделей зданий в виде квадратных призм: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013619013 Рос. Федерация / Коробков С.В., **Мокшин Д.И.**; Кошин А.А.; правообладатель ТГАСУ. –заявл. 26.07.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 5.

Подписано в печать 26.06.15 г. Формат 60×84.
Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Науч.-изд. л. 1.
Тираж 100 экз. Заказ № 242

Изд-во «ТГАСУ», 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП «ТГАСУ».
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.