

На правах рукописи

ЛЕДЕНЕВ Павел Викторович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НАВЕСНЫЕ
ФАСАДНЫЕ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЕНТИЛИРУЕМОЙ
ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКИ**

Специальности:

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011 г.

Работа выполнена в Учреждении Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук и в Научно-исследовательском институте механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Гувернюк Сергей Владимирович

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН
Гагарин Владимир Геннадьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН
Савин Владимир Константинович

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Гендугов Владимир Михайлович

Ведущая организация: ОАО «ЦНИИПромзданий»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2011 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 007.001.01 при НИИСФ РААСН по адресу: 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, светотехнический корпус. Тел. 482-40-76, факс 482-40-60.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом фонде НИИ строительной физики РААСН.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.Л.Шубин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке и обоснованию методов расчета ветровых нагрузок на вентилируемые фасадные системы с учетом особенностей взаимодействия воздушного потока с вентилируемой прослойкой. Применяются численные и аналитические методы моделирования, верифицируемые с помощью физических экспериментов в аэродинамической трубе и на струйном стенде.

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия в строительной практике в качестве ограждающих конструкций жилых и общественных зданий применяются НФС с вентилируемой прослойкой, которые способны обеспечить требуемый современными нормами уровень теплозащиты и энергоэффективности здания. В России НФС известны давно, однако ранее они применялись в зданиях с влажным или мокрым режимами. Около 20 лет назад их начали применять для зданий с нормальным режимом эксплуатации. К настоящему времени накоплен значительный опыт практического применения НФС. Проведены широкие исследования их теплофизических свойств. Установлено, что скорость воздушного потока в вентилируемой прослойке НФС влияет на интенсивность теплопередачи и влагопереноса. Эта скорость сложным образом зависит как от внутренних параметров прослойки, так и от внешних условий обтекания фасадов здания ветровым потоком. Таким образом, разработка методов расчета скорости воздушного потока в вентилируемой прослойке НФС – сложная актуальная задача.

Не менее важной является задача определения силового воздействия ветра на облицовочный слой НФС. Ветровая нагрузка зависит от перепада давления на внешней и внутренней поверхностях НФС, причем, если для определения внешнего давления известны различные теоретические, экспериментальные и численные методы (Э.И. Реттер, Ф.Л. Серебровский, М.Ф. Барштейн, Г.А. Савицкий, Э. Симиу, Р. Сканлан, В.А.Отставнов, Н.А. Попов, А.В. Сетуха, Б.В. Остроумов, В.К. Савин, А.В. Перельмутер, С.А. Исаев, A.G. Davenport, J.D. Holmes и др.), то вопрос определения внутреннего давления в воздушной прослойке НФС с проницаемым облицовочным слоем остается открытым. Ни одна из известных рекомендаций в отечественных и зарубежных правилах для определения ветрового воздействия на НФС не содержит достоверного способа учета внутреннего давления, формирующегося в воздушной прослойке НФС при обтекании здания ветровым потоком. Дело осложняется тем, что традиционные методы экспериментальных исследований моделей зданий в аэродинамических трубах не позволяют учитывать внутреннюю воздушную прослойку в НФС из-за масштабного фактора (при изготовлении экспериментальной модели, например, в масштабе 1:200, размер натурной 5-сантиметровой прослойки составил бы 0.25мм). Имеется также ряд трудностей при совместном численном моделировании внешнего обтекания НФС и вторичных внутренних течений в вентилируемой прослойке. Эта задача остается сла-

бо изученной, её решение актуально для создания обоснованных методик прогнозирования ветровых воздействий на проектируемые НФС.

Цели и задачи работы. Цель диссертации – разработка методов расчета ветровых воздействий на вентилируемые НФС зданий, их верификация и практическое применение к реальным строительным объектам.

Исходя из поставленной цели, решались следующие задачи:

- численное исследование характеристик внешнего обтекания турбулентным воздушным потоком типичных конфигураций зданий;
- постановка и проведение экспериментальных исследований обтекания макетов зданий для верификации расчетных компьютерных моделей внешней аэродинамики;
- разработка и экспериментальное обоснование математической модели для расчета давления и скорости течения воздуха в вентилируемой прослойке НФС с проницаемым облицовочным слоем в условиях внешнего ветрового воздействия;
- формирование комплексной методики для практических расчетов ветровых воздействий на НФС с вентилируемой прослойкой.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- на основе систематического сопоставления результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований обтекания макетов зданий в аэродинамической трубе осуществлена верификация вычислительной технологии RANS/URANS несжимаемой жидкости для решения задач внешней аэродинамики зданий;
- предложена и программно реализована математическая модель «плоской развертки тонкого пористого слоя», позволяющая рассчитывать стационарные распределения скорости и давления воздуха внутри вентилируемой прослойки НФС с проницаемым облицовочным слоем;
- с использованием математической модели «плоской развертки тонкого пористого слоя» подтверждено наличие продольной фильтрации в пористом теплоизоляционном слое НФС. Значение скорости движения воздуха в пористом теплоизоляционном слое НФС составляет порядка 1 мм/с при скорости в воздушной прослойке НФС порядка 1 м/с;
- экспериментально установлено влияние сжимаемости воздуха в прослойке на значение аэродинамической нагрузки на облицовку НФС в моменты воздействия внешних ветровых порывов;
- создана математическая модель для расчета нестационарных пиковых нагрузок на проницаемый облицовочный слой НФС, которая учитывает эффект сжимаемости среды, приводящий к запаздыванию релаксации внутреннего давления в прослойке НФС при воздействии нестационарного внешнего давления.

Практическая значимость работы.

- экспериментальные данные о воздействии стационарных и порывистых воздушных потоков на макеты зданий и НФС могут использоваться

для верификации вычислительных технологий определения ветровых воздействий на здания;

- разработанные рекомендации по выбору параметров расчетных сеток и моделей турбулентности позволяют оптимизировать вычислительные модели RANS/URANS для задач строительной аэродинамики;

- разработанная экспериментально-расчетная методика определения ветровых воздействий на комплексы зданий сочетает преимущества экспериментального и компьютерного моделирования, что позволяет повысить достоверность проводимых расчетов;

- развитый в работе метод определения стационарных распределений скорости и давления в воздушной прослойке НФС позволяет получать исходные данные, необходимые для проведения расчетов фильтрации, теплопередачи и влагопереноса в НФС;

- математическая модель «определяющих клеток» и основанная на ней методика расчета внутреннего давления в воздушной прослойке НФС при нестационарных ветровых порывах дает метод оценки пиковых аэродинамических нагрузок на элементы проницаемого облицовочного слоя НФС.

На защиту выносятся:

- результаты методических численных и экспериментальных исследований применимости вычислительной технологии RANS/URANS несжимаемой жидкости для решения задач внешней аэродинамики зданий;

- метод «плоской развертки тонкого пористого слоя» для расчета стационарных распределений скорости и давления воздуха внутри вентилируемой прослойки НФС с проницаемым облицовочным слоем;

- результаты экспериментальных исследований воздействия стационарных и порывистых воздушных потоков на модель НФС;

- положение об определяющей роли сжимаемости воздуха при формировании пиковых нестационарных ветровых нагрузок на проницаемый облицовочный слой НФС и математическая модель «определяющих клеток» (МОК) для расчета давления в воздушной прослойке НФС при порывистом внешнем ветровом воздействии;

- методика применения МОК для оценки характеристик пиковых знакопеременных ветровых нагрузок на облицовочные элементы НФС при ветровых порывах, результаты численного моделирования по методике МОК для простейших геометрических конфигураций зданий с НФС;

- комплексная расчетно-экспериментальная методика определения ветровых воздействий на здания, сочетающая физическое и численное моделирование в рамках одного проекта.

Достоверность полученных результатов. В диссертации используются обоснованные экспериментальные методики исследований с применением сертифицированных аэродинамических установок и стендов НИИ механики МГУ и общепринятые научные подходы к математическому моделированию движения газовых сред, а также обоснованные числен-

ные методы решения соответствующих математических краевых задач. Для численного решения задач внешней аэродинамики применяются лицензированные программные комплексы STAR-CD, STAR CCM+, VP2/3.

Внедрение результатов работы.

Основные результаты работы использованы при разработке проектов НФС с вентилируемой прослойкой для ряда зданий в Москве и других городах России. Результаты диссертации использованы при выполнении работы по теме 5.4.2 по плану фундаментальных научных исследований РААСН на 2008-2012 гг.

Апробация работы и публикации. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: XXIV конференция «Москва – энергоэффективный город», Москва, 2007г.; научно-практический семинар «Развитие индустрии жилищного строительства в республике Башкортостан», Уфа, 2007г.; XV международная конференция по механике и современным прикладным системам (ВПСППСМ'2007, Алушта); II и III международные научно-технические конференции «Теоретические основы теплогаснабжения и вентиляции», МГСУ, Москва, 2007, 2009гг.; XX международная Интернет-ориентированная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС), ИМаш РАН, Москва, 2008г.; Международные научные конференции «Компьютерные технологии решения прикладных задач тепломассопереноса и прочности» (STAR Russian Conference), Н.-Новгород, 2008, 2009, 2010гг.; VIII, IX и X международные школы-семинары «Модели и методы аэродинамики», Евпатория, 2008, 2009, 2010гг.; «Актуальные вопросы строительной физики – энергосбережение и экологическая безопасность», НИИСФ, Москва, 2010, 2011гг.

За работу «Численное моделирование течений около тел, экранированных проницаемой оболочкой», вошедшую в состав диссертации, автор удостоен в 2009 году звания победитель конкурсной программы У.М.Н.И.К. Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере Министерства образования и науки РФ.

По теме диссертации опубликовано 19 работ, из которых 7 статей – в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (117 наименований, в том числе 46 на иностранных языках), 100 рисунков и 4 таблиц. Общий объем диссертации – 146 страниц.

Автор выражает искреннюю признательность специалистам аэродинамического комплекса НИИ механики МГУ А.А. Синявину, Д.А. Мурашову, А.Ф. Зубкову и С.Ю. Меснянкину за содействие при подготовке и проведении экспериментов, а также сотруднику НИИСФ В.В.Козлову за содействие при постановке некоторых задач исследования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Приводятся обоснование актуальности работы, определены цель и задачи исследований, перечислены основные научные и практические результаты, приведено краткое содержание диссертации по главам.

Первая глава содержит обзор современного состояния вопроса определения ветрового воздействия на элементы навесных фасадных систем (НФС).

Теплофизические свойства ограждающих конструкций с вентилируемой воздушной прослойкой, в том числе воздухообмен в прослойке, исследовались в работах В.Д. Мачинского, К.Ф. Фокина, В.Н. Богословского, Ю.А. Табунщикова, Н.Н. Щербака, В.И. Лукьянова, А.Ф. Хомутова, В.Г. Гагарина, В.В. Козлова и др. В большинстве этих исследований учитывалось гравитационное движение воздуха в прослойке, при сплошном экране без зазоров. Учитывался также лучистый и конвективный теплообмен в прослойке, аэродинамические сопротивления и другие параметры. Учет наличия зазоров в облицовке на конвективное движение воздуха в прослойке выполнен в работах В.В. Козлова (аналитическое решение) и А.А. Синявина (численное решение), однако в них не учитывалось влияние внешнего ветрового воздействия.

Воздушный режим в вентилируемой прослойке НФС формируется под воздействием конвективного массопереноса, а также ветра. Для уточнения результатов расчетов тепломассообмена в вентилируемой прослойке, а также для расчета ветровых нагрузок на облицовку фасада необходимо учитывать влияние ветра на воздушный режим в прослойке. Влияние ветра на движение воздуха в прослойке измерялось А.Ф. Хомутовым, Н.Н. Щербаком, К. Gertis, Н.М. Künzel, K. Sedlbauer и др. В работах В.В. Козлова, Н.Г. Gerhardt, A. Baskaran, K.S. Kumar, W.C. Brown, D.R. Inculet, C.C. Choi, K. Sedlbauer приведены некоторые теоретические и экспериментальные исследования внутренних течений при ветровом воздействии на проливаемые ограждающие конструкции НФС. Однако эти исследования не привели к каким-либо обобщениям и имели частный характер.

В результате ветровых воздействий формируется переменное распределение внешнего давления по облицовке фасадов. В свою очередь, под действием градиентов внешнего давления возникает внутреннее течение в воздушной прослойке навесных конструкций и вырабатывается отличное от внешнего внутреннее распределение давления. Важными с точки зрения аэродинамики характеристиками навесной фасадной системы с вентилируемой воздушной прослойкой являются: размеры щелевых отверстий между облицовочными элементами, общая площадь щелевых отверстий по отношению к общей площади фасада, жесткость облицовочных элементов; элементы подконструкции НФС, оказывающие существенное влияние на характер течения воздуха в прослойке, значения скоростей и давления;

продольная фильтрация воздуха в утеплителе оказывает влияние на теплофизические характеристики ограждающей конструкции.

Перепад внешнего и внутреннего давлений определяет нагрузку, прижимающую или отрывающую облицовочные элементы НФС. В современной практике данные о распределениях аэродинамического коэффициента внешнего давления C_p , полученные тем или иным способом для непроницаемых конструкций, используются для оценок ветрового воздействия и на проницаемые ограждающие конструкции НФС путем введения некоторых повышающих добавок, чаще всего $C_{pi} = \pm 0.1$. Между тем вопросы о характере течения, значениях скоростей, распределении давления внутри вентилируемой прослойки являются слабо изученными.

Значительное внимание уделено обзору методов компьютерного моделирования задач внешней аэродинамики плохообтекаемых тел. Из множества известных вычислительных технологий наибольшее распространение получила RANS и ее нестационарная версия URANS, широко используемая в работах С.А. Исаева и др. при расчетах обтекания высотных зданий. Расчет ветровых потоков сводится к численному решению системы уравнений Навье-Стокса несжимаемой жидкости, осредненных по методу Рейнольдса. Мгновенные значения скорости V и давления P , входящих в уравнения Навье-Стокса, представляются в виде суммы средних значений и пульсаций, являющихся случайными функциями времени:

$$V_i = \bar{V}_i + V'_i \quad p = \bar{p} + p'. \quad (1)$$

В этом случае уравнения Навье-Стокса и неразрывности приобретают вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{V}_1}{\partial t} + \bar{V}_1 \frac{\partial \bar{V}_1}{\partial x_1} + \bar{V}_2 \frac{\partial \bar{V}_1}{\partial x_2} + \bar{V}_3 \frac{\partial \bar{V}_1}{\partial x_3} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_1} + \nu \nabla^2 \bar{V}_1 - \left(\frac{\partial}{\partial x_1} (\bar{V}_1 \bar{V}'_1) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\bar{V}_2 \bar{V}'_1) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\bar{V}_3 \bar{V}'_1) \right) \\ \frac{\partial \bar{V}_2}{\partial t} + \bar{V}_1 \frac{\partial \bar{V}_2}{\partial x_1} + \bar{V}_2 \frac{\partial \bar{V}_2}{\partial x_2} + \bar{V}_3 \frac{\partial \bar{V}_2}{\partial x_3} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_2} + \nu \nabla^2 \bar{V}_2 - \left(\frac{\partial}{\partial x_1} (\bar{V}_1 \bar{V}'_2) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\bar{V}_2 \bar{V}'_2) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\bar{V}_3 \bar{V}'_2) \right) \\ \frac{\partial \bar{V}_3}{\partial t} + \bar{V}_1 \frac{\partial \bar{V}_3}{\partial x_1} + \bar{V}_2 \frac{\partial \bar{V}_3}{\partial x_2} + \bar{V}_3 \frac{\partial \bar{V}_3}{\partial x_3} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_3} + \nu \nabla^2 \bar{V}_3 - \left(\frac{\partial}{\partial x_1} (\bar{V}_1 \bar{V}'_3) + \frac{\partial}{\partial x_2} (\bar{V}_2 \bar{V}'_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} (\bar{V}_3 \bar{V}'_3) \right) \\ \frac{\partial \bar{V}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{V}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{V}_3}{\partial x_3} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

и оказываются незамкнутыми из-за наличия неизвестных рейнольдсовых напряжений $\bar{V}_i \bar{V}'_j$. Для замыкания системы (2) привлекаются различные полуэмпирические дифференциальные модели турбулентности.

Определяющими параметрами математической модели являются размеры расчетной области и расчетной сетки, способ дискретизации конвективных и диффузионных слагаемых в уравнениях движения, замыкающая осредненные уравнения модель турбулентности. Выбор указанных параметров осуществлялся на основании методических численных исследований, результаты которых приведены в главе 2.

Во второй главе приводятся результаты методических численных и экспериментальных исследований применимости вычислительной технологии RANS/URANS несжимаемой жидкости для решения задач внешней аэродинамики строительных сооружений.

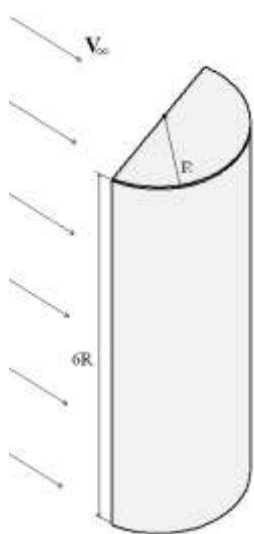


Рис 1. Модельное тело

На первом этапе в качестве характерной модели строительного сооружения рассмотрена полуцилиндрическая колонна с постоянным по высоте горизонтальным сечением (рис. 1). Объект содержит типичные геометрические особенности современных зданий: плоские грани с острыми ребрами, гладкие выпуклые поверхности, горизонтальное покрытие.

Задача внешнего обтекания ставится следующим образом. Тело расположено в равномерном потоке вязкой несжимаемой жидкости. Нижняя грань соприкасается с бесконечной горизонтальной плоскостью, верхняя либо свободно размещена в потоке, либо, так же, как и нижняя, соприкасается с верхней плоскостью, параллельной нижней (рис. 1). Число Рейнольдса, вычисленное по характерному поперечному размеру, составляет $Re = 5 \cdot 10^6 - 10^7$, что соответствует развитому турбулентному течению.

Дискретизация уравнений (2) производится на конечной расчетной сетке методом контрольного объема. Решение полученной алгебраической системы осуществляется алгоритмами из семейства PISO¹. Вычислительная технология включает в себя численное решение уравнений Рейнольдса (2), замыкаемых выбранной моделью турбулентности. Результаты расчетов обтекания полуцилиндра сопоставлены с известными экспериментальными данными З.П. Случановской (1971).



Рис. 2. Макет здания в аэродинамической трубе

На втором этапе для верификации моделирования обтекания зданий ветровым потоком были проведены экспериментальные исследования в аэродинамической трубе макета реального строительного сооружения, расположенного по адресу г. Москва, Дмитровское шоссе, вл. 1 (рис. 2). Геометрическую конфигурацию этого здания с аэродинамической точки зрения можно охарактеризовать как сложную пространственную плохообтекаемую форму. Расчет всех деталей ветрового воздействия на подобные сооружения

На втором этапе для верификации моделирования обтекания зданий ветровым потоком были проведены экспериментальные исследования в аэродинамической трубе макета реального строительного сооружения, расположенного по адресу г. Москва, Дмитровское шоссе, вл. 1 (рис. 2). Геометрическую конфигурацию этого здания с аэродинамической точки зрения можно охарактеризовать как сложную пространственную плохообтекаемую форму. Расчет всех деталей ветрового воздействия на подобные сооружения

¹ Используются программные комплексы VP2/3, STAR CD, STAR CCM+, лицензия НИИ механики МГУ.

требует полного трехмерного моделирования нестационарного обтекания с учетом изменяющегося по высоте ветрового напора $q_{\infty} = \rho V_{\infty}^2$ и профиля поперечного сечения объекта.

Численно воспроизведены сложные вихревые структуры в следе за исследуемым объектом; получено возрастание скорости набегающего потока при формировании отрывного течения над верхней гранью тела и рециркуляционная зона в основании строительного сооружения со стороны набегающего потока. Все эти явления моделируются в представленных вычислительных экспериментах (рис. 3а) и хорошо просматриваются на кадрах дымовой визуализации в эксперименте (рис. 3б).

Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных данных по распределениям средних значений аэродинамического коэффициента давления

$$C_p = (P - P_{\infty}) / q_{\infty}$$

показали качественное и количественное согласование при различных направлениях набегающего потока (рис. 4). Среднее по всему периметру сечения отклонение рассчитанных значений аэродинамического коэффициента C_p от экспериментальных данных не превосходит 12%.

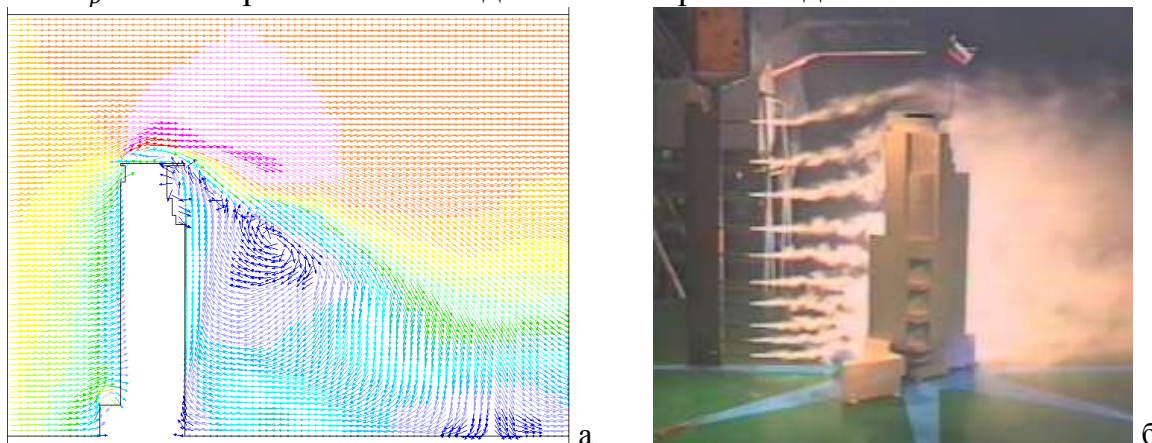


Рис. 3. Мгновенное векторное поле скорости в срединном сечении объекта по результатам трехмерного моделирования (а); дымовая визуализация при экспериментальном исследовании (б)

По результатам исследований наиболее адекватными для задач строительной аэродинамики дифференциальными моделями турбулентности являются квадратичная $k-\epsilon$ модель и $k-\omega$ модель Ментера. При этом установлено, что размер расчетной области должен быть не менее 10 характерных размеров исследуемого объекта ($20R$) в каждом из направлений. Размер ячейки расчетной сетки вблизи поверхности объекта зависит от геометрической конфигурации здания. При срыве потока с острых кромок здания размер ячейки может быть довольно грубым и составлять до $0.01R$. Если же отрыв потока происходит с гладкой криволинейной поверхности, там, где точное положение места отрыва не определено, надлежащее разрешение пограничного слоя необходимо. В этом случае размер ячеек пристеночного слоя должен быть менее $0.0005R$.

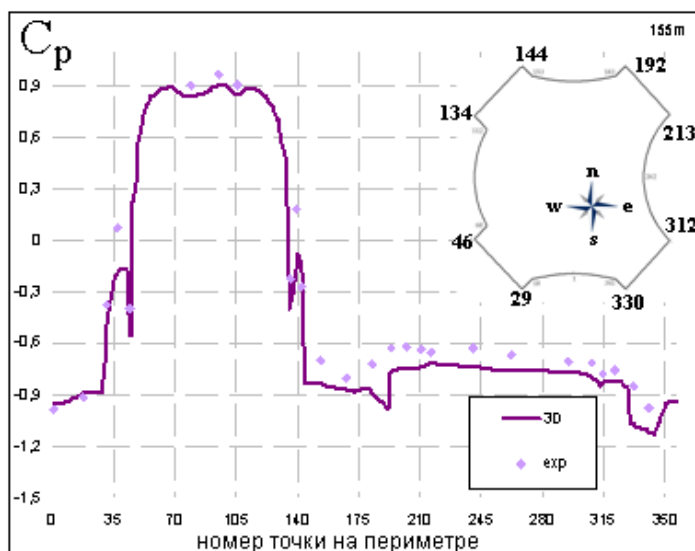


Рис. 4. Распределение среднего значения C_p по периметру здания на рис.2, экспериментальные (значки) и расчетные (кривая) данные

Таким образом, представленная вычислительная технология верифицирована экспериментальными исследованиями и может быть использована для определения внешнего распределения давления по поверхностям фасадов реальных строительных объектов. Важным методическим моментом при расчете нагрузок на облицовку является возможность определять внешнее давление независимо от внутреннего

течения в прослойке. Это обусловлено малостью относительной площади зазоров между плитками облицовки, степень проницаемости порядка 1% практически не оказывает влияния на распределение внешнего давления.

В третьей главе проведено исследование механизмов формирования ветрового воздействия на облицовочный слой фасадной системы. На основании этого анализа выработаны математические модели, описывающие процесс движения воздуха в воздушной прослойке фасадной системы при стационарном и нестационарном внешнем воздействии.

В разделе 3.1 приведено математическое описание движения воздуха внутри воздушной прослойки в предположении о несжимаемости среды. Используются уравнения баланса расхода и количества движения воздуха. Уравнения баланса для одномерного случая записываются в виде:

$$H \frac{dV}{dx} = V_n; \quad H \frac{d(P_i + \rho V^2)}{dx} = -(C_{f1}|V| + C_{f2})\rho V \quad (3)-(4)$$

где (3) – закон изменения расхода, (4) – закон изменения количества движения воздуха внутри прослойки; H – ширина прослойки; V – средняя по поперечному сечению прослойки продольная скорость течения воздуха; P_i – давление внутри прослойки; C_{f1} и C_{f2} – средние на единицу длины коэффициенты трения и иных потерь внутри воздушной прослойки от загромождений элементами подконструкции; V_n – средняя на единицу длины нормальная скорость втекания или вытекания воздуха.

$$V_n(x, y, t) = \frac{\sigma\beta_1}{\alpha_1} \text{sign}(P_e - P_i) \left(\sqrt{1 + \frac{2\alpha_1}{\rho\beta_1^2} |P_e - P_i|} - 1 \right) \quad (5)$$

$$\alpha_1 = 1 + \xi_1; \quad \beta_1 = 32h\nu / S_0^2$$

Выражение (5) для распределенной нормальной скорости V_n протекания через проницаемый облицовочный слой является следствием линейно-

квадратичной модели проницаемой стенки; S_0 – ширина щелевого отверстия; h – толщина облицовочного слоя (рис. 5); $\xi_1=0-0.1$ – коэффициент, учитывающий вихревые гидравлические потери при втекании воздуха в щелевое отверстие; $\nu=1.51 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент кинематической вязкости, ρ – плотность воздуха.

Для расчета стационарных распределений скорости движения воздуха и давления внутри воздушной прослойки НФС предложен метод «плоской развертки тонкого пористого слоя» (ПРТПС). Метод основан на численном решении системы уравнений (3)-(5), обобщенной на двумерный случай. Движение воздуха в прослойке (рис. 5) поддерживается за счет заданного на внешней стороне облицовочного слоя градиентного распределения давления P_e , которое берется из расчета внешнего обтекания здания (глава 2). Воздушная прослойка математически описывается моделью пористой среды – линейно-квадратичный закон Дарси – с эффективной проницаемостью, соответствующей реальным загромождениям от направляющих, кронштейнов и других элементов подконструкционного слоя.

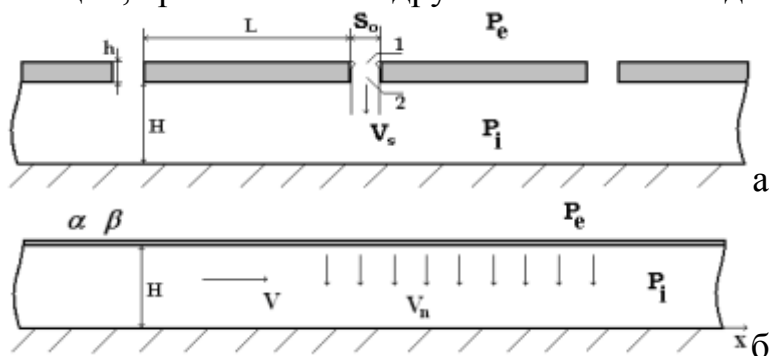


Рис. 5. Схема перетекания воздушного потока через проницаемый облицовочный слой НФС; а – натурные щелевые отверстия; б – распределенная геометрическая проницаемость

системы и рассчитанное на предыдущем этапе распределение давления P_e по внешним поверхностям облицовочного слоя НФС.

В разделе 3.2. с целью верификации расчетной методики проведены экспериментальные исследования в аэродинамической трубе. Модель строительного сооружения представляла собой цилиндр радиуса $R=0.15\text{м}$ и высоты $z_0 = 6R$, окруженный concentрическим проницаемым экраном с воздушной прослойкой. Экспериментальные значения коэффициента давления C_p в воздушной прослойке между экраном и непроницаемой стенкой модели (рис. 6) хорошо согласуются с численными расчетами этой же модели строительного сооружения по представленной методике (рис. 7). Отличие результатов экспериментального исследования и численного расчета не превышает 5%.

В методе ПРТПС происходит переход от трехмерной конфигурации вентилируемой прослойки вокруг всего здания к плоскому двумерному слою. В качестве исходных данных используется геометрическая конфигурация строительного объекта, параметры фасадной

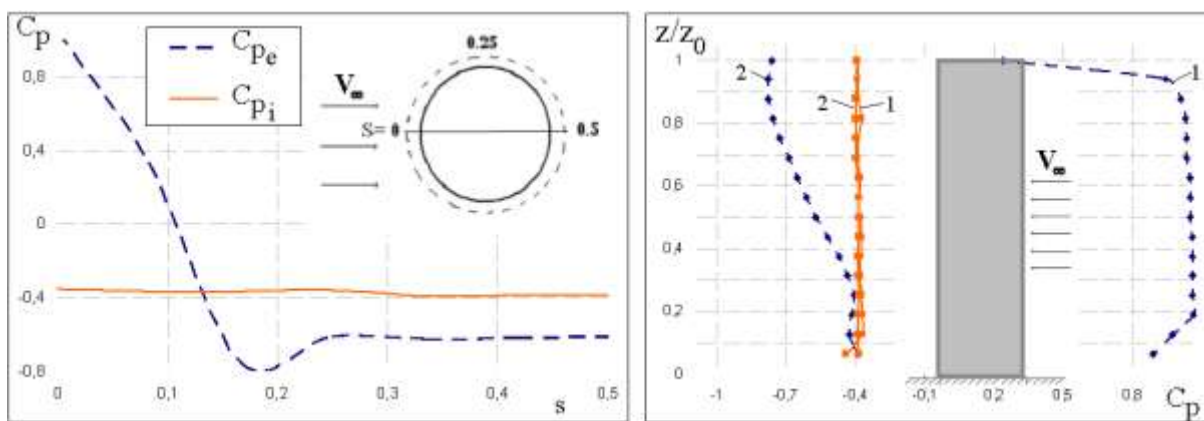


Рис. 6. Экспериментальные распределения внешнего C_{pe} и внутреннего C_{pi} коэффициентов давления по периметру срединного горизонтального сечения (слева) и по высоте на наветренной 1 и подветренной 2 сторонах цилиндрического здания.

Результатом применения метода ПРТПС являются распределения средних значений скорости движения воздуха и давления внутри воздушной прослойки и в пористом теплоизоляционном слое НФС, эти величины используются в качестве исходных данных для решения задач фильтрации, теплопередачи и влагопереноса.

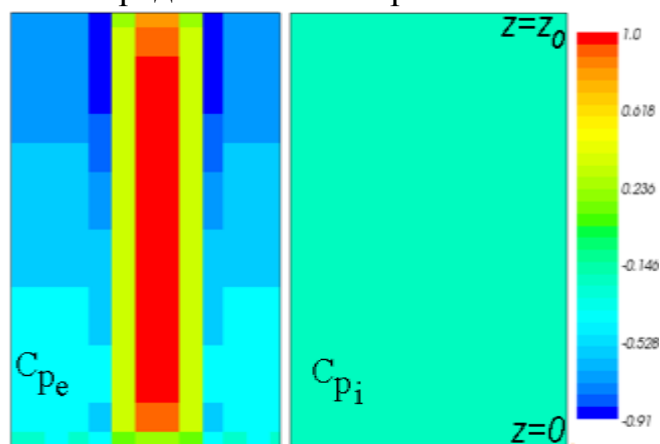


Рис. 7. Расчетное поле внешнего C_{pe} и внутреннего C_{pi} давлений на фасадах сооружения (развертка на плоскость)

В диссертации приведены примеры расчета средних значений скоростей в прослойке НФС для межоконного простенка, как наиболее уязвимо-го с точки зрения тепловых потерь участка фасада здания. Установлено, что значения скорости в воздушной прослойке НФС составляют порядка 1м/с, а в теплоизоляционном слое – порядка 1мм/с.

При постоянных или слабо меняющихся во времени внешних распределениях давления P_e представленный метод, основанный на математической модели несжимаемой жидкости, хорошо описывает распределение давления P_i внутри воздушной прослойки. Разность $(P_e - P_i)$ определяет нагрузку на единицу площади облицовочного слоя НФС. Однако при быстром изменении внешнего давления $P_e(t)$, характерном для ветровых порывов, уравнения (3)-(5) перестают адекватно описывать зависимость P_i от P_e , особенно при столь малых значениях коэффициента геометрической проницаемости $\sigma = 0.1\% - 1\%$ как у типичного облицовочного слоя НФС. Причина в том, что воздух физически сжимаемая среда и изменение его давления влечет некоторое изменение плотности. При внешнем обтекании зданий это изменение плотности не существенно, так же как и при установившемся течении в вентилируемой прослойке. Но для замкнутой воздушной полости постоянного объема, сообщающейся с окружающим пространством через малые отвер-

ствия (как вентилируемая прослойка НФС), даже слабая зависимость плотности воздуха от давления в полости становится существенной. В отличие от несжимаемой среды давление воздуха в полости не может мгновенно отреагировать на изменение внешнего давления P_e , поскольку изменение массы воздуха в полости обеспечивается только за счет перетекания через отверстия перфорации с конечной скоростью под действием перепада давления ($P_e - P_i$). Это значит, что отклик изменения внутреннего давления в вентилируемой прослойке на резкое изменение внешнего давления происходит с некоторым запаздыванием и это обстоятельство может быть определяющим при формировании пиковых нагрузок на облицовку НФС². Использование математической модели (3)-(5) позволяет находить лишь средние значения ветровой нагрузки на облицовочные элементы НФС.

Для подтверждения приведенных соображений о механизме влияния нестационарности внешнего набегающего потока на результирующую пиковую ветровую нагрузку на облицовку НФС, были проведены экспериментальные исследования модели фасадной системы с вентилируемой прослойкой (раздел 3.2).



Рис. 8. Модель НФС с вентилируемой прослойкой и проницаемым внешним ограждением (вид спереди)

Экспериментальная модель НФС выполнена в виде квадратной панели размером $0.5 \times 0.5 \text{ м}^2$, состоящей из сплошной и перфорированной квадратных пластин, между которыми имеется регулируемая воздушная прослойка (рис. 8). Торцевые стенки панели непроницаемы. Были приняты конструктивные меры для обеспечения жесткости конструкции, исключающие возможность прогиба или смещения пластин во время эксперимента. Взаимодействие воздушной прослойки с окружающей средой осуществляется только через перфорацию лицевой стенки. Модель снабжена датчиками давления, один из которых расположен внутри воздушной прослойки, а другой – на внешней стороне лицевой стенки. Длина пневматических трасс обоих датчиков одинакова и достаточно мала, чтобы достоверно измерять пульсационные составляющие P_e и P_i . Моделирование порывистости внешнего потока осуществлялось на струйном стенде, содержащем генератор искусственных порывов воздушного потока ГИС-2³. Скоростной напор струи в порыве достигал 400 Па, частота следования порывов варьировалась от 0 до 30 Гц.

² Если облицовка способна прогибаться, то этот дополнительный эффект легко учесть путем введения зависимости объема прослойки НФС от перепада давления ($P_e - P_i$).

³ Патент НИИ механики МГУ.

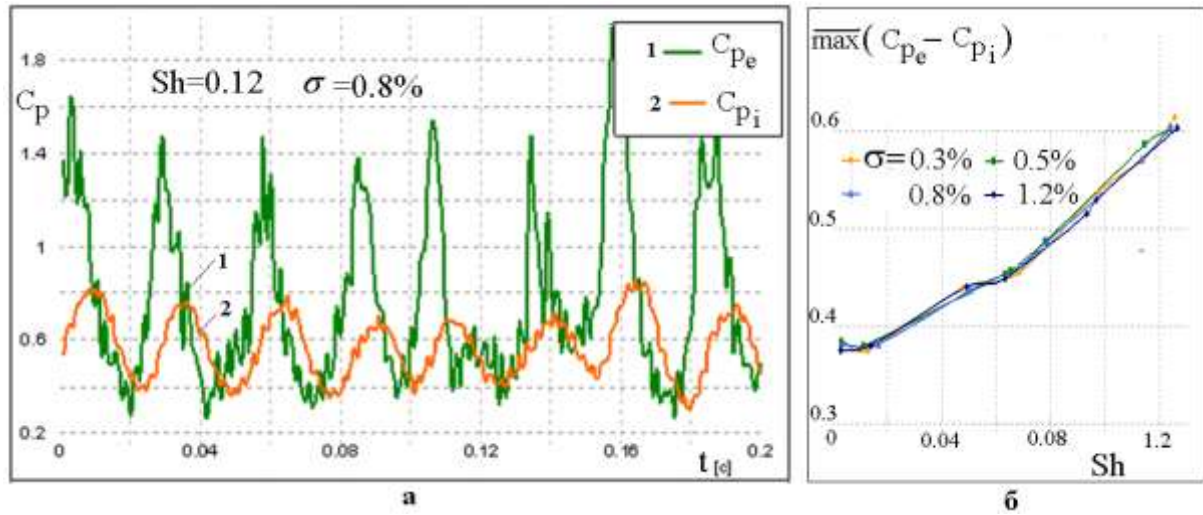


Рис. 9. Результаты эксперимента. Пульсации внешнего и внутреннего давления (а) и зависимость от числа Струхала осредненной по 10 периодам пиковой нагрузки на облицовочный слой (б)

Экспериментально определены зависимости от времени коэффициентов внешнего C_{pe} и внутреннего C_{pi} давлений на поверхности проницаемой панели (рис. 9,а) при различных числах Струхала $Sh=L\omega_{gis}/V_{gis}$ и толщинах H вентилируемой прослойки (L – расстояние между отверстиями перфорации; V_{gis} и ω_{gis} – средняя скорость и частота искусственных порывов в струе). Наблюдается возрастание пиковых значений давления от числа Струхала (рис. 9,б). Результаты экспериментальных исследований указывают на необходимость учета сжимаемости среды при математическом моделировании пиковых ветровых воздействий на НФС.

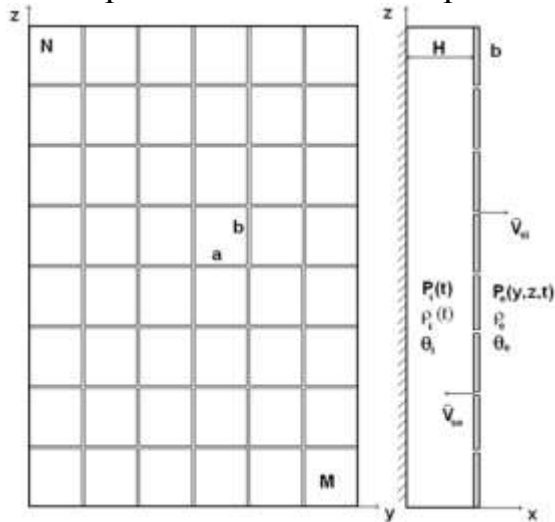


Рис. 10. Схематичное изображение одной «определяющей» клетки

Согласно предложенной математической модели (разделы 3.3-3.4) весь фасад здания представляется в виде набора «определяющих клеток». Каждая клетка представляет собой прямоугольник, включающий в себя $M \times N$ облицовочных элементов фасадной системы с размерами $a \times b$ (рис. 10). Неизвестное давление P_i в клетке зависит только от времени, а плотность воздуха линейно зависит от давления по изотермическому закону при заданной температуре прослойки НФС. Для определения $P_i(t)$ используется уравнение баланса массы (в данном случае оно приведено для частного случая, когда границы клетки внутри прослойки непроницаемые):

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = A \sum_{m=1}^M \sum_{n=2}^N \rho(y,z) \text{sign}(\Delta P(t)) \frac{\sqrt{\beta^2 + |\Delta P(t)| 4\alpha/\rho} - \beta}{2\alpha} \quad (6)$$

Здесь суммирование ведется по всем щелевым зазорам между панелями на площади данной клетки и обозначено:

$$A = \frac{1 + \gamma(\theta_i - \theta_0)}{\rho_0 b N M H} P_0 S_0; \quad \Delta P = P_e(y_{m,n}, z_{m,n}) - P_i \quad (7)$$

$$\rho = 0.5(\rho_e(1 + \text{sign}(\Delta P)) + \rho_i(1 - \text{sign}(\Delta P))) \quad (8)$$

$$\rho_i = \frac{\rho_0}{1 + \kappa(\theta_i - \theta_0)} \frac{P_i}{P_0}; \quad \rho_e = \frac{\rho_0}{1 + \kappa(\theta_e - \theta_0)} \quad (9)$$

θ – температура, κ – коэффициент температурного расширения воздуха; индекс i – значение внутри воздушной прослойки; индекс e – значение вне воздушной прослойки; индекс 0 – стандартные параметры воздуха при нормальных условиях; параметры α, β те же, что и в (5).

Математическая модель, описывающая нестационарное ветровое воздействие на фасады всего здания строится на основании модели определяющих клеток (МОК) с учетом взаимодействия соседних клеток. Каждое уравнение (6) системы (6)-(9) дополняется четырьмя слагаемыми, соответствующими потокам массы через границы клетки с учетом перепада давлений в смежных клетках и сосредоточенных на границах клеток обобщенных коэффициентов гидравлических потерь при перетекании воздуха из клетки в клетку. Количество связанных уравнений типа (6) равно числу определяющих клеток на фасадах здания. Соответствующая система обыкновенных дифференциальных уравнений решается численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

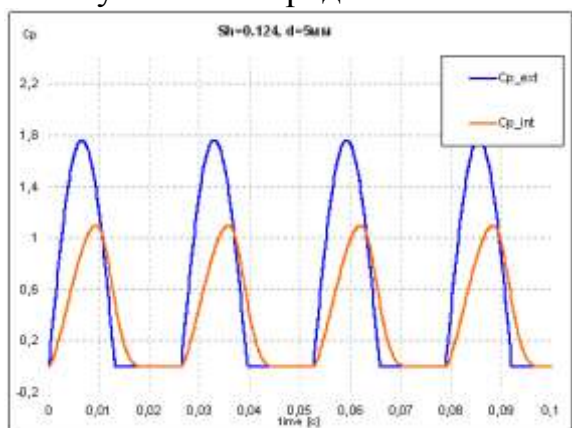


Рис. 11. Результаты расчета. Пульсации внешнего и внутреннего давления для модели НФС на рис.8

Представленная математическая модель согласуется с результатами экспериментальных исследований модели фасадной системы с использованием генератора ветровых порывов (рис. 9,а). Численно воспроизведен эффект сдвига фазы колебаний давления внутри воздушной прослойки относительно колебаний внешнего давления (рис. 11). Сдвиг фазы колебаний внешнего и внутреннего давлений является

определяющим механизмом при формировании пиковой нагрузки на облицовочный слой НФС.

Математическая модель МОК реализована в виде программного комплекса, позволяющего по заданным параметрам фасадов здания и распределению внешнего нестационарного давления $P_e(t, x, y, z)$ рассчитывать распределения пиковой и средней ветровых нагрузок на облицовочный слой НФС. В частном случае, при стационарном или медленно изменяю-

щемся распределении P_e методики МОК и ПРТПС дают близкие результаты для внутреннего давления P_i в прослойке НФС.

Если задача внешнего обтекания здания решена в полной постановке, учитывающей наличие ветровых порывов в набегающем потоке и образование вторичных вихрей при отрывном обтекании здания, то полученное распределение внешнего давления $P_e(t, x, y, z)$ по фасадам здания непосредственно пригодны для применения теории МОК в качестве граничных условий. Однако на практике известны лишь среднестатистические характеристики $w_m = M(P_e - P_\infty)$ и $w_p = \text{СКП}(P_e - P_\infty)$, где M – среднее значение, СКП – среднеквадратичная пульсация в точке (x, y, z) фасада. Это относится как к результатам численного моделирования RANS/URANS так и к данным физических экспериментов в аэродинамических трубах, а также – к нормативным соотношениям СНиП, Еврокода, и др. В этом случае для применения МОК требуется восстанавливать случайную величину P_e , опираясь на ту или иную модель ветрового порыва. В работе исследованы решения МОК для семейства порывов, имеющих нормальный закон распределения по пяти определяющим параметрам: высоте, продольной и поперечной протяженности, амплитуде и длительности порыва. Определены наиболее опасные варианты, приводящие к экстремальным значениям нагрузки на облицовку НФС.

В разделе 3.5 изложена методика практического применения теории МОК для расчета пиковых нагрузок на облицовочный слой НФС зданий, для которых известны распределения w_m и w_p – либо по результатам численного/физического моделирования обтекания, либо непосредственно по приближенным нормативным соотношениям. Согласно этой методике осуществляется разбиение фасадов здания на определяющие клетки, задаются геометрические и физические параметры облицовочного слоя и воздушной прослойки НФС, включая степень проницаемости облицовочного слоя и уровни загромождения вентилируемой прослойки. По величинам w_m и w_p определяются параметры случайного одиночного порыва с максимально неблагоприятным скачкообразным фронтом нарастания от среднего значения w_m до $w_m + k_w w_p$ (здесь коэффициент $k_w = 1 \div 3$). При этом локализация по высоте, масштаб зоны и длительность порыва рассматриваются как случайная величина с нормальным законом распределения (и с ограничением на то, чтобы зона порыва не выходила за пределы площади фасада). В результате решения системы уравнений МОК для конечного набора рассматриваемых распределений внешнего давления на фасадах здания находятся распределения внутреннего давления в прослойке НФС и по ним определяются пиковые значения перепада давления на облицовочном слое, характерные времена действия и импульс пиковых нагрузок.

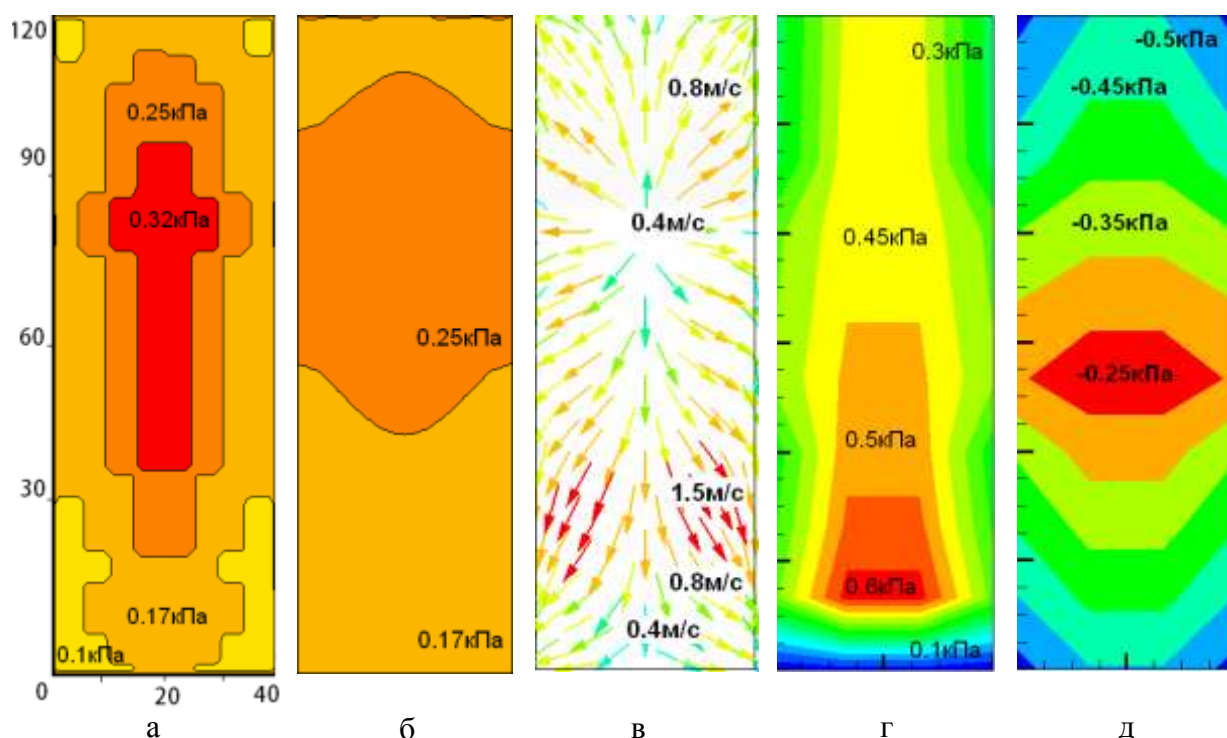


Рис. 12. Расчетные воздействия на НФС наветренной стороны здания с изолированными угловыми зонами; полученные по методике ПРТПС стационарные составляющие полей внешнего (а) и внутреннего (б) распределений ветрового давления, а также – скорости потока в вентилируемой прослойке (в); распределение пиковых прижимающих (г) и отрывающих (д) нестационарных нагрузок на единицу площади облицовочного слоя по методике МОК.

Практическое применение разработанных методик определения ветровых воздействий на НФС с вентилируемой прослойкой демонстрируется на конкретных примерах расчета для здания высотой 120м с квадратным горизонтальным сечением 40м×40м и с геометрической проницаемостью облицовочного слоя НФС $\sigma=0.5\%$. Набегающий ветровой поток характеризуется средней скоростью распределения по высоте, соответствующей по классификации СНиП первому ветровому району с типом местности «С». Методом компьютерного моделирования RANS/URANS найдены распределения w_m среднего ветрового давления на внешней стороне фасадов здания (на рис. 12,а это распределение показано для наветренного фасада). По этим данным методом ПРТПС найдены стационарные распределения давления и скорости движения воздуха в вентилируемой прослойке (рис. 12б,в, результаты приведены для лицевого фасада с изолированными угловыми ребрами). Затем с помощью методики МОК рассчитаны пиковые ветровые нагрузки (рис. 12г,д). Результаты расчета ветровых нагрузок на облицовочный слой наветренной части НФС для случая герметизированных угловых зонах, сравниваются с данными, полученными согласно СНиП (см. таблицу 1, первое число в колонках 2-6 соответствует десяти-метровому участку угловой зоны, второе – центральной зоне наветренного фасада).

Таблица 1. Ветровая нагрузка на наветренный фасад с изолированными угловыми зонами

Высота z, м	СНиП		ПРТПС среднее (Кг/м ²)	МОК, пиковое	
	среднее (Кг/м ²)	пиковое (Кг/м ²)		на прижим (Кг/м ²)	на отрыв (Кг/м ²)
1-13	16\\23	43\\61	-1\\2	38\\62	-51\\-45
13-26	20\\23	48\\55	-2\\1	34\\56	-45\\-38
26-40	20\\26	45\\59	-2\\2	31\\53	-39\\-33
40-53	20\\26	43\\57	-3\\3	40\\51	-34\\-27
53-66	20\\26	42\\55	-3\\3	39\\49	-25\\-22
66-80	23\\36	47\\54	-2\\2	38\\48	-29\\-26
80-93	23\\29	46\\59	-4\\3	28\\47	-34\\-31
93-106	20\\26	40\\52	-3\\4	27\\46	-42\\-36
106-119	16\\23	31\\45	-5\\4	27\\46	-47\\-40

В конце главы формулируются практические выводы, в частности отмечено, что:

- облицовочные элементы наветренного фасада, в зависимости от профиля набегающего ветрового потока и конфигурации здания, могут испытывать нагрузку не только на прижим, но и на отрыв, в то время как строительные нормы и правила предусматривают возможность лишь положительной (на прижим) ветровой нагрузки для наветренного фасада;
- стационарную ветровую нагрузку на облицовочные элементы можно существенно снизить (практически до нуля), дополнив подконструкционный слой НФС загромождениями прослойки в угловых зонах.

В четвертой главе обосновывается комплексная расчетно-экспериментальная методика определения ветровых воздействий на здания, сочетающая физическое и численное моделирование в рамках одного проекта.

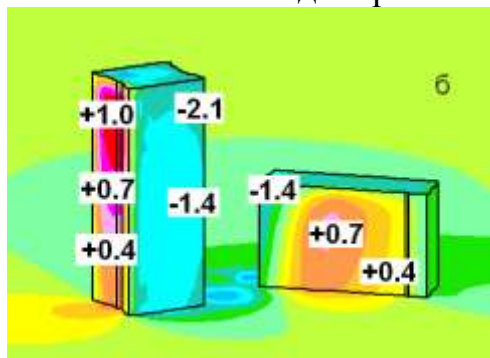


Рис. 13. Эффект аэродинамической интерференции (ветер - слева направо).

Приводятся примеры практических исследований ветровых воздействий на различные здания и ансамбли зданий методами численного и физического моделирования. Для ряда реальных строительных объектов осуществ-

лен расчет ветровых нагрузок на светопрозрачные конструкции и облицовочные элементы НФС, получены поэтажные распределения интегральных сил и моментов, действующих на несущие конструкции здания. Рассмотрен вопрос о влиянии близкого расположения относительно друг друга зданий соизмеримых масштабов на результирующую ветровую нагрузку. Численные исследования на примере возводимого по адресу ул. Пырьева, вл.2 строительного сооружения (рис.13,а) позволили оценить эффект аэродинамической интерференции двух высотных корпусов, расположенных в непосредственной близости друг от друга (рис.13,б).

Предложенная расчетно-экспериментальная методика определения внешнего распределения ветрового давления включает экспериментальные исследования в аэродинамической трубе и численное компьютерное моделирование. Экспериментальная работа проводится в упрощенной постановке задачи с ограниченным количеством точек измерения. Сравнение экспериментальных данных с результатами параллельно проводимых численных расчетов в той же упрощенной постановке задачи позволяет настроить и верифицировать расчетную модель определения ветровых нагрузок для конкретного строительного сооружения. После чего проводится завершающая серия детальных расчетов внешней и затем внутренней аэродинамики НФС сооружения.

Основные выводы. Разработаны уточненные и созданы новые методы расчета ветровых нагрузок на элементы вентилируемых навесных фасадных систем. Приведены примеры применения разработанных методик для расчета ветровых нагрузок на фасады реальных строительных сооружений. Полученные результаты обобщены.

1. Исследованы общие и особые свойства внешнего обтекания модельных конфигураций строительных сооружений. В качестве математической модели использована система уравнений Рейнольдса, замыкаемая дифференциальной моделью турбулентности. Основываясь на серии методических численных расчетов с использованием указанной математической модели, для внешних задач строительной аэродинамики рекомендован набор общих параметров компьютерной модели, размеров расчетной области и геометрии расчетной сетки. Выбор параметров подтвержден данными экспериментальных исследований. Представленная вычислительная технология неоднократно применялась для определения внешнего распределения давления по поверхностям фасадов проектируемых зданий.

2. Экспериментально исследованы течения внутри воздушной прослойки НФС. В аэродинамической трубе получены пространственные распределения внутреннего и внешнего давления для круглой призмы с проницаемым внешним слоем и воздушной прослойкой под ним. Установлена зависимость нагрузки на элементы облицовочного слоя от параметров фасадной системы – геометрической проницаемости, ширины воздушной прослойки, толщины облицовочного слоя – и от характеристик набегающего потока – скорости и интенсивности турбулентности. Показано, что распределение внешнего давления не зависит от внутренних параметров фасадной системы. Исследования модели фасадной системы на струйном стенде с применением генератора искусственных вихревых порывов выявили зависимость нагрузки на облицовочные элементы от частоты внешнего воздействия и эффект запаздывания, связанный с влиянием сжимаемости воздуха в прослойке НФС при малой проницаемости σ облицовочного слоя.

3. Предложена и программно реализована математическая модель «плоской развертки тонкого пористого слоя», позволяющая рассчитывать

стационарные распределения скорости и давления воздуха внутри вентилируемой прослойки НФС с проницаемым внешним ограждением. Показано, что стационарную ветровую нагрузку на облицовочные элементы можно существенно снизить, дополнив подконструкционный слой НФС загромаждениями прослойки в угловых зонах.

4. Разработана и экспериментально обоснована математическая модель «определяющих клеток» (МОК) для расчета нестационарных пиковых нагрузок на проницаемое внешнее ограждение НФС, которая позволяет учесть эффект сжимаемости среды внутри воздушной прослойки, приводящий к запаздыванию релаксации внутреннего давления в прослойке НФС при воздействии быстро меняющегося нестационарного внешнего давления.

5. Развита методика применения теории МОК для практических расчетов пиковых нагрузок на облицовочные элементы НФС с вентилируемой воздушной прослойкой, учитывающая ветровые порывы. Проведены конкретные расчеты для прямоугольных НФС. Получено, что облицовочные элементы наветренного фасада, в зависимости от профиля набегающего ветрового потока и конфигурации здания, могут испытывать нагрузку не только на прижим, но и на отрыв, в то время как строительные нормы и правила предусматривают возможность лишь положительной ветровой нагрузки по всему наветренному фасаду.

6. Сформулирована комплексная расчетно-экспериментальная методика определения ветровых воздействий на здания, сочетающая физическое и численное моделирование в рамках одного проекта.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

1. П.В. Леденев Численное моделирование обтекания полуцилиндра // Труды конференции-конкурса молодых ученых. Под ред. академика РАН Г.Г. Черного, профессора В.А. Самсонова. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2007. С. 167-175.

2. С.В. Гувернюк, П.В. Леденев, В.Е. Петров. К расчету нестационарных аэродинамических нагрузок на плохообтекаемое препятствие в сдвиговом турбулентном потоке // Материалы XV международной конференции по механике и современным прикладным системам (ВПСПКСМ'2007, Алушта). М.: Вузовская книга, 2007. С. 194-195.

3. В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк, П.В. Леденев Компьютерное моделирование ветровой нагрузки на элементы фасадов зданий для развития методики СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» // Материалы Второй Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». М.: МГСУ, 2007. С. 135-141.

4. П.В. Леденев. Возможности численного моделирования в проблеме определения аэродинамических нагрузок на плохообтекаемое препятствие в турбулентном потоке // Материалы VIII международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». М.: МЦНМО, 2008. С. 96-97.

5. П.В. Леденев. Сравнение результатов 2D и 3D моделирования турбулентного обтекания полуцилиндра // Юбилейная XX Международная Интернет-

ориентированная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2008). Материалы конференции 10-12 ноября 2008. М.: ИМАШ РАН, 2008. С. 118.

6. П.В. Леденев. Численное моделирование пространственных аэродинамических эффектов при поперечном обтекании полуцилиндрической колонны // Материалы IX международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». М.: МЦНМО, 2009. С. 119-120.

7. В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк, П.В. Леденев. О расчетном и экспериментальном определении ветровых нагрузок при проектировании зданий с навесными фасадными системами // СтройПРОФИль №3(73), 2009. С. 15.

8. С.В. Гувернюк, П.В. Леденев. О влиянии эффектов трехмерного обтекания на распределение ветровых нагрузок на фасады высотных зданий // Вестник отделения архитектуры и строительных наук, Вып. 13. Т. 2. Москва-Орел: РААСН, АСИ ОрелГТУ, 2009. С.148-159.

9. П.В. Леденев. Численное моделирование ветрового воздействия на строительное сооружение с полуцилиндрическим профилем при турбулентном обтекании // Материалы третьей Международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». М.: МГСУ, 2009. С. 219-223.

10. П.В. Леденев. О роли трехмерных эффектов при моделировании отрывного обтекания полуцилиндрического препятствия турбулентным потоком // Труды конференции-конкурса молодых ученых. Под ред. академика РАН Г.Г. Черного, профессора В.А. Самсонова. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 2009. С. 149-156.

11. В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк, П.В. Леденев. Аэродинамические характеристики зданий для расчета ветрового воздействия на ограждающие конструкции // Жилищное строительство №1'2010, 2010. С. 7-11.

12. П.В. Леденев. Численное моделирование течений около тел, экранированных проницаемой оболочкой // Материалы X международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». М.: МЦНМО, 2010. С. 105-106.

13. В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк, П.В. Леденев. Ветровые нагрузки на облицовку навесных фасадных систем с вентилируемой прослойкой // Academia. Архитектура и строительство, 2010. С. 124-130.

14. В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк, П.В. Леденев. Расчет ветрового воздействия на облицовку навесных фасадных систем согласно нормам России, Британии, Голландии, США и Еврокода // Academia. Архитектура и строительство, 2010. С. 157-160.

15. В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк, В.В. Козлов, П.В. Леденев, Е.Ю. Цыкановский. Результаты исследования свойств навесных фасадных систем с вентилируемой воздушной прослойкой в рамках гранта РФФИ «Аэротеплофизика проницаемых тел в низкоскоростных воздушных потоках» // Academia. Архитектура и строительство, 2010. С. 124-130.

16. С.В. Гувернюк, В.В. Козлов, П.В. Леденев. Численное моделирование продольной фильтрации воздуха в подоблицовочном слое навесной фасадной системы // Academia. Архитектура и строительство, 2010. С. 341-344.

17. П.В. Леденев. О двумерной составляющей трехмерного обтекания удлиненных стержней // Труды конференции-конкурса молодых ученых. Под ред.

академика РАН Г.Г. Черного, профессора В.А. Самсонова. М.: Изд-во Моск. Унта, 2010. С. 213-220.

18. П.В. Леденев, А.А.Синявин. Экспериментальное исследование ветрового давления при обтекании тандема двух зданий. // Научно-технический журнал Вестник МГСУ, 2011, №3, т.1, стр. 377-382.

19. П.В. Леденев, Д.В.Мурашов. Экспериментальное исследование течения внутри воздушного зазора навесной фасадной системы. // Научно-технический журнал Вестник МГСУ, 2011, №3, т.1, стр. 383-388.

Условные обозначения.

МОК – метод «определяющих клеток»;

НФС – навесная фасадная система;

ПРТПС – метод «плоской развертки тонкого пористого слоя»;

RANS – осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, замыкаемые с помощью двухпараметрической дифференциальной модели турбулентности;

STAR-CD, STAR CCM+, VP2/3 – лицензированные пакеты компьютерных программ инженерного анализа турбулентных течений жидкости и газа.

URANS – нестационарная версия RANS;

a, b – ширина и высота облицовочного элемента, м;

$C_p = (P - P_\infty) / q_\infty$ – аэродинамический коэффициент давления;

C_{f1}, C_{f2} – коэффициенты турбулентного и ламинарного (м/с) трения;

H – ширина воздушной прослойки, м;

h, L – толщина облицовочного слоя и шаг перфорации, м;

$M \times N$ – количество облицовочных элементов в клетке;

P – давление (P_∞ – в атмосфере, P_e – на внешней стороне фасада, P_i – внутри воздушной прослойки), Па;

$q_\infty = 0.5 \rho_e (V_\infty)^2$, Па;

S_0 – ширина щелевого отверстия, м;

$Sh = L \omega_{gis} / V_{gis}$ – число Струхала;

V – скорость движения воздуха (V_∞ – в невозмущенном потоке, V_{gis} – в струе, V_i – внутри прослойки НФС, V_s – в отверстии щелевого зазора облицовочного слоя, V_n – по нормали через облицовочный слой, распределенная на единицу площади), м/с;

w – ветровая нагрузка (w_m – стационарная, w_p – среднеквадратичная пульсационная составляющая), Па;

α, β – безразмерный и размерный (м/с) коэффициенты в квадратичном законе проницаемой стенки;

θ – температура воздуха (θ_e – снаружи, θ_i – внутри прослойки НФС), К;

$\nu = 1.51 \cdot 10^{-5}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с;

ρ – плотность воздуха (ρ_e – снаружи, ρ_i – внутри воздушной прослойки), кг/м³;

ω_{gis} – частота колебаний в струе, Гц.