

На правах рукописи

Кубенин Александр Сергеевич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВОЗДУШНОГО РЕЖИМА ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК
ВОЗДУХООБМЕНА**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении
«Научно-исследовательский институт строительной физики Российской
академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН)

Научный руководитель: **Гагарин Владимир Геннадьевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кочев Алексей Геннадьевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО "Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет",
кафедра «Теплогазоснабжения», заведующий
кафедрой

Крайнов Дмитрий Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
кафедра «теплоэнергетики, газоснабжения и
вентиляции», доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)»

Защита состоится «__» 2021 г. в 11 часов 00 минут на заседании
диссертационного совета Д 007.001.01 при ФГБУ «Научно-исследовательский
институт строительной физики Российской академии архитектуры и
строительных наук» по адресу: 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д.21,
светотехнический корпус, к.205, тел. (495)482-40-76, факс: (495)482-40-60.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом фонде НИИ
строительной физики РААСН и на сайте <http://niisf.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года

Ученый секретарь

диссертационного совета

Н.П.Умнякова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Энергосбережение и повышение энергоэффективности в строительном комплексе являются одними из важных направлений экономической политики государства. Ряд постановлений правительства направлен на последовательное ужесточение требований к тепловой защите ограждающих конструкций зданий, приводящее к постепенному сокращению норматива на удельный расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий. В этой связи направления науки и техники, связанные с энергосбережением в строительном комплексе, являются одними из приоритетных в РФ. Повышения требований к тепловой защите обуславливает необходимость постоянного совершенствования строительных материалов ограждающих конструкций, а также к развития нормативной и методологической базы по расчету характеристик теплопотребления.

Общий воздухообмен по зданию принято условно разделять на вентиляционный и фильтрационный. Первый определяется действием вентиляции в здании, а второй сквозной (поперечной) фильтрацией воздуха через внешние ограждения здания. Интенсивность фильтрационного воздухообмена характеризует инфильтрационные тепловые потери здания. Как правило вентиляционные тепловые потери составляют не менее 30% от всех тепловых потерь здания.

Это определяет актуальность темы исследований, направленных на повышение точности расчета воздушного режима жилых и общественных зданий.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами воздушного режима зданий занимались В.Н. Богословский, М.М. Грудзинский, Е.Х. Китайцева, В.Е. Константинова, Е.Г. Малявина, И.А. Романовская, В.К. Савин, А.Н. Сканави, Ю.А. Табунщиков, В.П. Титов и др.

Воздействие ветра на здание исследовали В.Г. Гагарин, С.В. Гувернюк, С.А. Исаев, Н.А. Попов, Э.И. Реттер, Ф.Л. Серебровский, А. G. Davenport и др.

Исследованию воздухопроницаемости ограждающих конструкций посвящены работы Батурина В.В., Беляева В.С., Бриллинга Р.Е., Васильева Б.Ф., Каменева П.Н., Козлова В.В., Ливчака И.Ф., Титова В.П., Ушкова Ф.В. и др.

Недостаточно проработанными остаются вопросы влияния внешнего ветрового давления, действующего на фасады здания, на формирование воздушного режима здания, и определения среднерасходных инфильтрационных характеристик по помещениям здания за отопительный период.

Объект исследования: воздушный режим жилых и общественных зданий.

Предмет исследования: методы расчета инфильтрационных теплопотерь по зданию.

Цель исследования. Разработка математических методов моделирования воздушного режима зданий с учетом влияния распределений внешнего знакопеременного ветрового давления на фасады зданий и направления поперечной фильтрации воздушных масс (инфильтрация/эксфильтрация) через ограждающие конструкции.

Задачи исследования.

1. На основе аэродинамических исследований получить подробные распределения аэродинамического коэффициента c на фасадах прямоугольных в плане зданий.

2. Разработать обобщенную математическую модель воздушного режима здания, учитывающую влияния распределений внешнего знакопеременного ветрового давления на фасады зданий и направления поперечной фильтрации воздушных масс через ограждающие конструкции.

3. Разработать алгоритм и программу, реализующие математическую модель воздушного режима здания.

4. Выявить безразмерные критерии, характеризующие фильтрационный воздухообмен в здании.

5. На основе проведения численных исследований воздушного режима зданий систематизировать безразмерные критерии по степени значимости их влияния на фильтрационный воздухообмен по зданию и определить критериальные зависимости.

6. Разработать методику расчета среднесуточного за отопительный период количества инфильтрующегося воздуха для жилых и общественных зданий, учитывающую влияния распределений внешнего знакопеременного ветрового давления и направления поперечной фильтрации воздушных масс (инфильтрация/эксфильтрация).

Научная новизна:

1. Для случая воздухообмена при отсутствии ветра получено точное выражение для давления внутри здания с учетом зависимости законов фильтрации от температуры и направления проникающих воздушных масс.
2. На основании численных исследований воздушного режима зданий был сформулирован набор безразмерных определяющих параметров фильтрационного воздухообмена в здании.

3. На основании численных исследований воздушного режима зданий предложены и обоснованы четыре возможные схемы фильтрационного воздухообмена здания.
4. Для каждой из возможных схем воздухообмена при наличии ветра получены аналитические выражения для давления внутри здания с учетом зависимости законов фильтрации от температуры и направления проникающих воздушных масс, позволяющие определять количество инфильтрующегося воздуха по зданию.

Теоретическая значимость исследования.

Разработана модель воздушного режима здания, учитывающая влияния распределений внешнего знакопеременного ветрового давления и направления поперечной фильтрации воздушных масс через ограждающие конструкции.

Сформулирован набор безразмерных определяющих параметров фильтрационного воздухообмена в здании.

В исследованиях выявлено четыре возможных схем воздухообмена в зданиях со сбалансированной приточно-вытяжной системой вентиляции и сформулированы математические условия реализации каждой из схем воздухообмена.

Практическая значимость исследования.

1. Разработан инженерный метод назначения ветрового давления на фасады произвольных в плане зданий, направленный на определение суммарного инфильтрационного расхода по зданию.

2. Получены аналитические выражения для давления внутри здания и величины суммарного количества инфильтрующегося воздуха по зданию для существующих схем фильтрационного воздухообмена в здании со сбалансированной приточно-вытяжной системой вентиляции.

3. Разработана методика расчета количества инфильтрующегося воздуха для жилых и общественных зданий, учитывающая влияние распределений внешнего знакопеременного ветрового давления и направления поперечной фильтрации воздушных масс (инфильтрация/эксфильтрация).

Методология и методы исследования.

Методическую основу исследования составляют существующие теоретические положения и экспериментальные исследования отечественных и зарубежных ученых в областях строительной теплофизики и строительной аэродинамики и стандартные методики численного и аэрофизического моделирования задач внешней и внутренней аэродинамики.

Основные методы, используемые в работе:

1) При компьютерном (численном) определении распределений ветрового давления на внешних ограждениях зданий использовались конечно-объемный метод компьютерного (CFD) моделирования в рамках сертифицированной программы ANSYS Fluent и совокупность лагранжевых методов, входящих в технологию бессточного компьютерного моделирования, разработанную в рамках НИР по ФЦП Министерства образования и науки РФ (соглашение 14.576.21.0079, проект RFMEFI57614X0079).

2) Методика экспериментальных исследований основывалась на требованиях государственных стандартов и базировалась на использовании показаний сертифицированных и поверенных приборов.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель воздушного режима здания, учитывающая влияния распределения внешнего знакопеременного ветрового давления и направления фильтрации воздушных масс;
- уточненный метод назначения внешнего ветрового давления на фасадах прямоугольных в плане зданий;
- классификация схем фильтрационного воздухообмена для прямоугольных в плане зданий с типовым поэтажным распределением светопрозрачных ограждающих конструкций;
- аналитические выражения для давления внутри здания и количества инфильтрующегося воздуха через внешние светопрозрачные ограждающие конструкции для всех возможных схем воздухообмена по зданию;
- методика расчета количества инфильтрующегося воздуха для жилых и общественных зданий, учитывающая влияния распределений внешнего знакопеременного ветрового давления и направления поперечной фильтрации воздушных масс (инфильтрация/эксфильтрация).

Степень достоверности результатов обеспечивается использованием классических методов строительной аэродинамики и теплофизики с опорой на достижения признанных отечественных и зарубежных ученых в данных областях. В диссертации используются обоснованные экспериментальные методики исследований с применением сертифицированных аэродинамических установок и стендов НИИ механики МГУ и общепринятые научные подходы компьютерного (CFD) моделирования движения газовых сред.

Для численного решения задач внешней аэродинамики применяется лицензированный программный продукт ANSYS Fluent. Достоверность полученных в работе аналитических выражений обеспечивается строгостью

математического аппарата и подкреплена результатами численных исследований воздушного режима зданий.

Апробация результатов. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Конференция-конкурс молодых учёных, 2011-2014 гг., г. Москва, МГУ.
2. Научная конференция «Ломоносовские чтения», 2012 г., 2014 г., г. Москва, МГУ.
3. XVII школа-семинар «Современные проблемы аэрогидродинамики», посвященная памяти академика Г.Г. Черного и 55-летию со дня основания НИИ механики МГУ, 2014 г., г. Туапсе.
4. XXV POLISH - RUSSIAN - SLOVAK SEMINAR -THEORETICAL FOUNDATION OF CIVIL ENGINEERING, 2015, Zilina, Slovakia.
5. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Механика», Москва, МГУ, Россия, 17-26 апреля 2017.
6. «Ломоносовские чтения - 2019». Секция «Механика», Москва, МГУ, Россия, 15-25 апреля 2019.
7. XVI международная конференция «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды / Indoor airquality and environmental», 2018, Италия, г. Флоренция.

Внедрение результатов работы.

Результаты работы использованы в проекте РФФИ № 13-08-90468 «Сопряженные задачи внешней и внутренней аэродинамики и теплофизики энергоэффективных зданий», при выполнении НИР в рамках государственного задания на оказание услуг ФАУ «ФЦС» при разработке национального стандарта ГОСТ Р 56728-2015 – «Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции».

Личный вклад автора.

Личный вклад автора заключается в разработке идеи работы, формулировке цели и задач, определении методов и методологии исследования, в получении результатов, представленных в диссертации. Была разработана математическая модель воздушного режима здания, учитывающая влияния распределений внешнего знакопеременного ветрового давления и направления поперечной фильтрации воздушных масс. Была написана программа, реализующая разработанную математическую модель. На основе анализа полученных программных расчетов был изучен воздушный режим высотных зданий с механической приточно-вытяжной вентиляцией и сформулированы

аналитические выражения для определения давлений внутри помещений здания и суммарного количества инфильтрующегося воздуха по зданию.

Соответствие паспорту специальности.

Диссертационное исследование соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение, а именно п.3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума»; п. 5 «Тепловой, воздушный и влажностный режимы зданий различного назначения, тепломассообмен в ограждениях и разработка методов расчета энергосбережения в зданиях».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 6 статей в научных журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 4 статьи в журналах, входящих в международную базу цитирования WOS/SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает в себя: введение, четыре главы и заключение, список литературы и 4-х приложений. Работа изложена на 157 страницах машинописного текста, включающего 43 таблицы, 41 рисунок, 102 формулы, список литературы из 118 наименований, в том числе 12 иностранных.

Благодарности, ссылки.

Автор выражает благодарность к.ф.-м.н., советнику РААСН С.В. Гувернюку и к.т.н., проф., Е.Г. Малявиной за консультации при проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, перечислены основные положения, которые составляют научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы.

В первой главе диссертации изложено состояние вопроса по исследованиям и методам расчета воздушного режима здания, воздухопроницаемости и тепловых потребностей здания, приходящихся на нагрев инфильтрующихся воздушных масс через внешние ограждения.

В результате обзора и анализа литературы было установлено:

1. В рассмотренных работах по расчету воздушного режима зданий используется единая характеристика сопротивления воздухопроницанию для ограждающих конструкций здания в случае инфильтрации и эксфильтрации воздуха через них.

2. Действующие строительные нормы и существующие инженерные подходы, касающиеся определения инфильтрационных потерь теплоты по зданию допускают, что все внешние воздухопроницаемые ограждающие конструкции здания находятся на наветренном фасаде здания. В некоторых случаях это допущение может привести к существенному завышению в определении величины количества инфильтрующегося воздуха по зданию $G_{\text{инф}}$.

3. Точность определения величины средней кратности воздухообмена зависит от точности определения инфильтрационных расходов по помещениям здания, т.к. вентиляционные расходы детерминированы санитарными нормами и заведомо известны.

4. Инфильтрация характеризует воздухообмен в тех помещениях здания или для здания в целом, где бездействует система вентиляции (в случаях периодичности в работе системы вентиляции с механическим побуждением). В жилых зданиях инфильтрационные расходы следует определять для помещений лестнично-лифтового пространства.

5. В большинстве случаев способы задания этого внутреннего давления либо вообще не указываются, либо берутся из необоснованных предположений, имеющих ограниченную область применения или даже противоречащие законам аэродинамики. Общим характерным недостатком является то, что закон сохранения интегрального массового баланса фильтрации и инфильтрации при воздухообмене через проницаемые ограждения либо не учитывается, либо о необходимости его учета говорится, но фактически не формулируются и не решаются соответствующие замкнутые балансовые уравнения. В частности такие, в которых учитывалась бы разница плотностей холодного атмосферного и подогретого внутреннего воздуха, заходящего внутрь и выходящего наружу под действием градиентов распределения внешнего ветрового давления.

Выполненный обзор позволили выявить актуальные проблемы и сформулировать цель и задачи исследования.

Вторая глава диссертации посвящена разработке программы расчета воздушного режима здания и отработке способа назначения ветрового давления при расчетах воздушного режима здания. В *разделе 2.1* представлена математическая модель воздушного режима здания со сбалансированной приточно-вытяжной системой вентиляции (1-4), учитывающая различие

массовой воздухопроницаемости (кг/м²·ч) инфильтрующегося и эксфильтрующегося воздуха при постоянной объемной воздухопроницаемости (м/ч).

$$\sum_n \left(\sum_j \sum_i \left(S_{ок}(i, j) |p_{нар}(i, j) - p_{внут}(n)|^{2/3} \right) + S_{дв}(n) |p_{внут}(n) - p_0|^{1/2} + \Delta G(n) \right) + \sum_e S_{вх}(e) |p_{нар}(e) - p_0|^{1/2} = 0, \quad (1)$$

$$S_{ок}(i, j) = w_{ок} \frac{A_{ок}(i, j)}{(\Delta p_0)^{2/3}} \text{sign}(p_{нар}(i, j) - p_{внут}(n)) \cdot \left[\frac{\rho_n \cdot (1 + \text{sign}(p_{нар}(i, j) - p_{внут}(n)))}{2} + \frac{\rho_v \cdot (1 - \text{sign}(p_{нар}(i, j) - p_{внут}(n)))}{2} \right], \quad (2)$$

$$S_{дв}(n) = w_{дв} \frac{A_{дв}(n)}{(\Delta p_0)^{1/2}} \text{sign}(p_0 - p_{внут}(n)) \rho_v, \quad (3)$$

$$S_{вх}(e) = w_{вх} \frac{A_{вх}(e)}{(\Delta p_0)^{1/2}} \text{sign}(p_{нар}(e) - p_0) \cdot \left[\frac{\rho_n \cdot (1 + \text{sign}(p_{нар}(e) - p_0))}{2} + \frac{\rho_v \cdot (1 - \text{sign}(p_{нар}(e) - p_0))}{2} \right], \quad (4)$$

где i, j – индексы светопрозрачной конструкции (окно, балконная дверь), индекс i характеризует расположение по периметру здания на j -ом этаже; e – индекс входной двери; n – индекс помещения здания; M – количество этажей в здании; $w_{ок}$ – объемная воздухопроницаемость окна, м/ч; $w_{дв}$ – объемная воздухопроницаемость двери в помещение здания, м/ч; $w_{вх}$ – объемная воздухопроницаемость входной двери в здание, м/ч; p_0 – условно постоянное давление внутри здания, Па; $p_{внут}$ – давление внутри помещения здания, Па; $p_{нар}$ – наружное давление на воздухопроницаемом элементе, Па; A – площадь воздухопроницаемого элемента, м², индекс «ок» означает площадь светопрозрачной конструкции (окно или балконная дверь), индекс «дв» означает площадь двери в помещение, индекс «вх» означает площадь двери в здание; $S_{ок}$ – характеристика аэродинамического сопротивления светопрозрачной конструкции (окно, балконная дверь и т.д.), кг/(ч·Па^{2/3}); $S_{дв}$, $S_{вх}$ – характеристики аэродинамического сопротивления входных дверей в помещения здания и в само здание, кг/(ч·Па^{1/2}); ΔG – вентиляционный дисбаланс в n -ом помещении здания, кг/м³.

Давление наружного воздуха в (2-4) определяется согласно выражению:

$$p_{\text{нар}} = p_{\text{грав}} + p_{\text{ветр}} = (H - h)(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}})g + \frac{\rho_{\text{н}} v^2}{2} k_{\text{дин}} \cdot c, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{н}}$ – плотность воздуха снаружи здания, кг/м³; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха внутри здания, кг/м³; H – высота здания, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; v – скорость ветра на уровне 10 м, м/с; $k_{\text{дин}}$ – коэффициент изменения ветрового давления с высотой; c – аэродинамический коэффициент давления на воздухопроницаемом элементе внешнего ограждения здания.

В *разделе 2.2* приведено описание рассматриваемых в аэродинамических исследованиях строительных объектов ЖК «D1» (рисунок 1), выбранных для отработки способа назначения параметров ветрового давления при расчетах воздушного режима, рисунок 1. 60-ти этажное здание «корпус № 2» ЖК высотой 191 м имеет длину 30 м, ширину 26 м при суммарном остеклении фасадов $A_{\text{ок}}=4800$ м², 23-х этажное здание «корпус № 3» высотой 75 м имеет длину 34 м, ширину 16 м при суммарной площади остекления фасадов $A_{\text{ок}}=1565$ м².

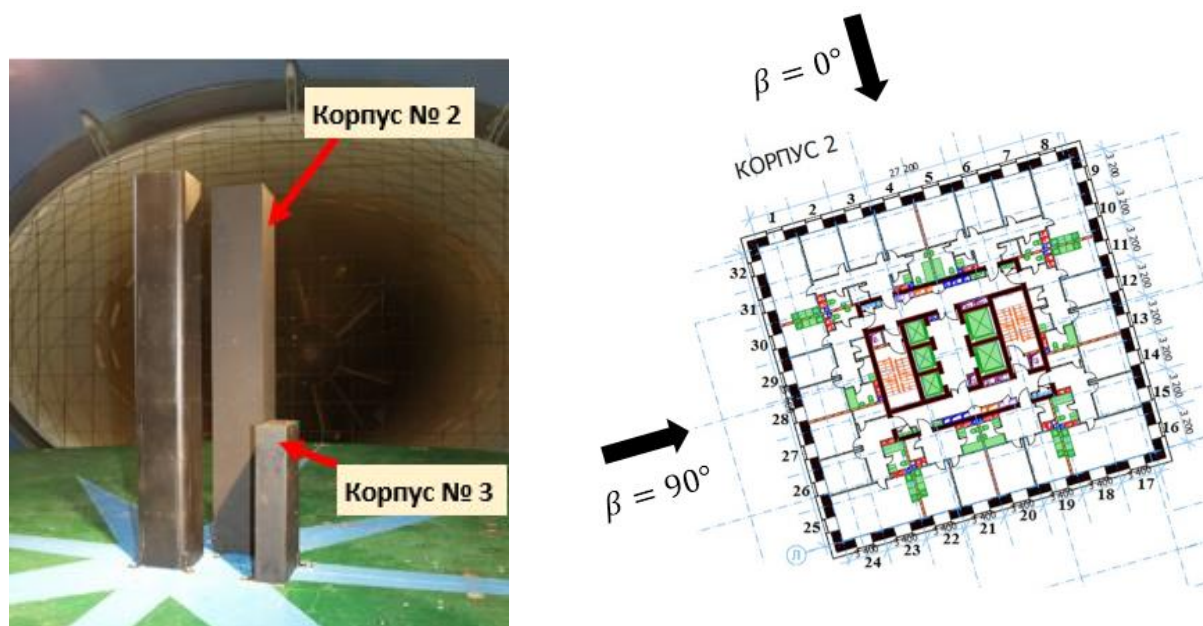


Рисунок 1 – Фотоснимок макета высотного жилого комплекса «D1» на рабочем столе аэродинамической трубы АДТ А6 МГУ и ситуационный план исследуемого здания «корпус № 2» с указанием расположения дренажных точек по периметру

В *разделе 2.3* представлены аэродинамические экспериментальные и компьютерные (CFD) исследования по определению ветровых воздействий на рассматриваемые здания (каждое здание рассматривалось как уединенное). Физическое моделирование обтекания макетов зданий воздушным потоком было проведено в специализированной аэродинамической трубе А-6 НИИ механики МГУ, оснащенной средствами создания неравномерного профиля скорости воздушного потока, моделирующего структуру нормативного ветра согласно СП

20.13330.2016 и ГОСТ Р 56728-2015. Серия экспериментальных продувок была воспроизведена численно в сертифицированном прикладном пакете вычислительного гидродинамического анализа ANSYS FLUENT 17.

Результаты эксперимента в виде дискретного распределения коэффициента c (рисунок 2, а) по фасадам здания использовались при задании ГУ в расчетах воздушного режима рассматриваемых зданий. На основе полученных непрерывных распределений коэффициента c при компьютерном моделировании (рисунок 2, б) путем осреднения были определены средние значения коэффициента c для наветренных и подветренных сторон здания $c_H=0,8$, $c_3=-0,5$. Аэродинамический коэффициент c определялся согласно формуле:

$$c = \frac{p_{\text{ветр}}}{0.5 \rho v_H^2}, \quad (6)$$

где $p_{\text{ветр}}$ – избыточное ветровое давление, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³; v_H – скорость нормативного ветра, м/с, на уровне высоты здания H , м.

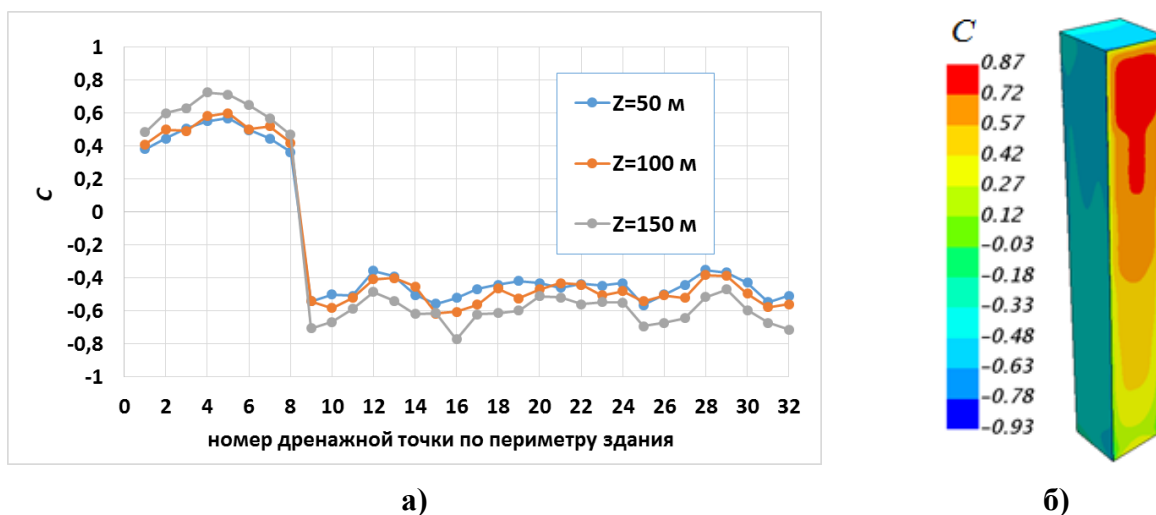


Рисунок 2 – Распределения аэродинамического коэффициента c , полученного в результате аэродинамических исследований (здание «корпус № 2», $\beta=0^\circ$):

а) эксперимент; б) компьютерное (CFD) моделирование

В *разделе 2.4* представлены результаты расчетов воздушного режима зданий «корпус № 2» и «корпус № 3» при различных способах назначения ветрового давления. Результаты расчета воздушного режима при назначении коэффициента c на основе экспериментальных данных приняты за эталонные. Было установлено, что при невысоких скоростях ветра до 4 м/с результаты расчетов величины количества инфильтрующегося воздуха практически не отличаются. При высоких скоростях ветра результаты начинают различаться. Наиболее близки к эталонному результаты расчета при схеме назначения коэффициента c на фасадах здания $c_H=0,8$, $c_3=-0,5$. На рисунке 3 представлены

результаты расчетов воздушного режима для здания «корпус № 2» при температурах воздуха внутри и снаружи здания $t_{\text{н}} = -2,2^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{в}} = 21^{\circ}\text{C}$ и сопротивлениях воздухопроницанию окон и входных дверей в здание $R_{\text{у,ок}} = 1 \text{ м}^2\text{ч/кг}$, $R_{\text{у,дв}} = 0,55 \text{ м}^2\text{ч/кг}$.

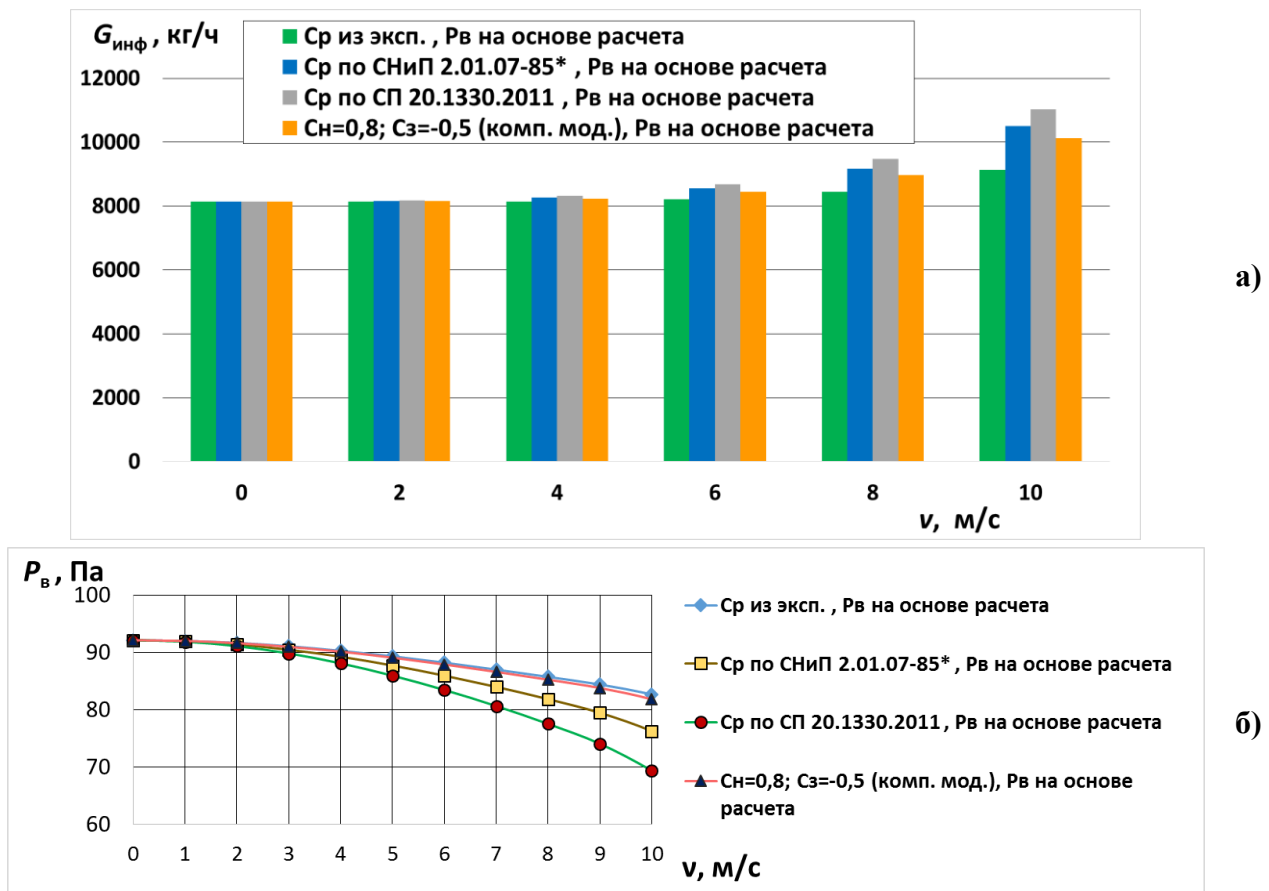


Рисунок 3 – Результаты расчетов воздушного режима здания (здание «корпус № 2», $\beta=0^{\circ}$):

а) зависимость количества инфильтрующегося воздуха от скорости ветра;

б) зависимость давления внутри здания от скорости ветра

Третья глава посвящена численным исследованиям воздушного режима жилых и общественных зданий для определения положения характерных линий уровня ξ , разделяющих каждый фасад на зоны инфильтрации и эксфильтрации.

В **разделе 3.1** сформулирован набор безразмерных определяющих параметров, влияющих на фильтрационный воздухообмен в здании, и сформулирована задача для численного эксперимента: определить функциональные зависимости:

$$\xi_{\text{нав}} = f_1(\delta, \sigma, Eu), \quad \xi_{\text{подв}} = f_2(\delta, \sigma, Eu), \quad \xi_* = f_3(\delta, \sigma, Eu); \quad (7)$$

при граничных условиях:

$$c_{\text{н}} = 0,8, c_{\text{з}} = -0,5; \alpha(j) = \alpha; \sigma(j) = \sigma; \quad (8)$$

где $\xi_{\text{нав}} = \frac{h_{\text{нав}}}{H}$ – безразмерная высота (уровень), где наблюдается равенство по поступлению количества инфильтрующегося и эксфильтрующегося воздуха на

наветренной стороне здания, $\xi_{\text{подв}} = \frac{h_{\text{подв}}}{H}$ – безразмерная высота (уровень), где наблюдается равенство по поступлению количества инфильтрующегося и эксфильтрующегося воздуха на подветренной стороне здания, $\xi_* = \frac{h_*}{H}$ – безразмерная высота (уровень) в здании, где наблюдается равенство по поступлению количества инфильтрующегося и эксфильтрующегося воздуха по всему периметру здания; $\delta = \frac{\rho_n}{\rho_v}$ – отношение плотностей воздуха, σ – коэффициент равный отношению суммарной площади окон подветренной части здания к суммарной площади окон наветренной части здания, $Eu = \frac{\rho_n v_H^2 (c_n - c_3)}{2(\rho_n - \rho_v) g H}$ – число Эйлера, показывающее соотношение вкладов ветрового и гравитационного давлений в воздухообмен по зданию.

На основе анализа климатических данных для холодного периода года СП «Строительная климатология» были сформулированы границы изменения определяющих безразмерных параметров в исследованиях:

$$\delta \in [1,046; 1,185], \quad \sigma \in [0,1; 3], \quad Eu \in [0; 57,4]. \quad (9)$$

Результаты расчетов воздушного режима при наличии ветра позволили выявить четыре возможных схемы фильтрационного воздухообмена, рисунок 4.

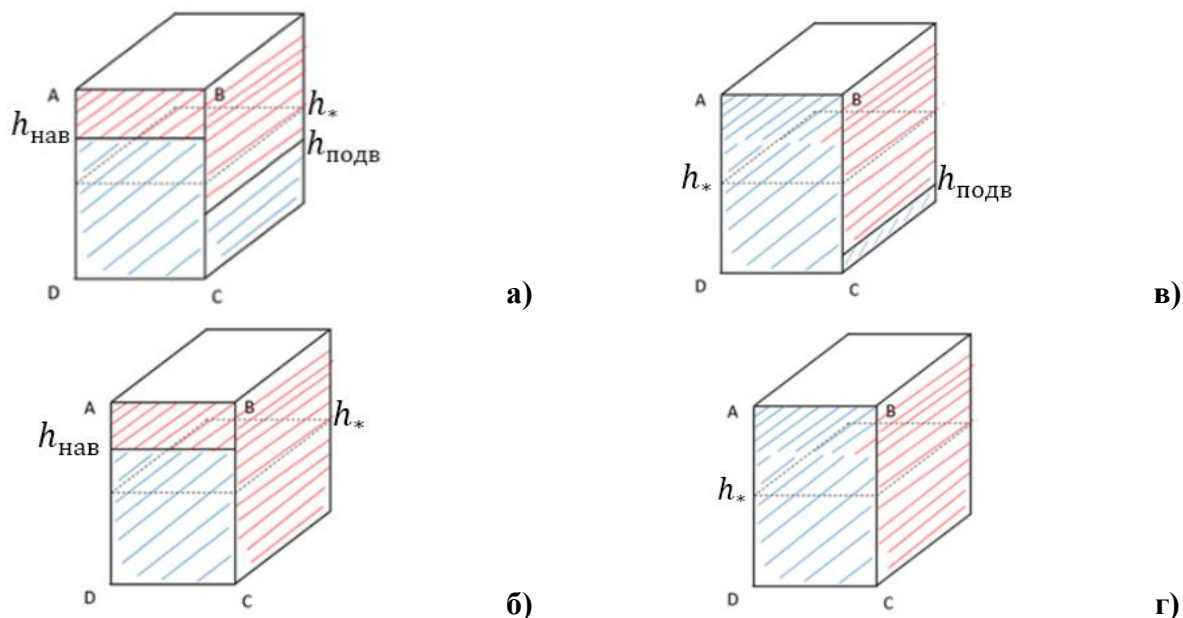


Рисунок 4 – Схематическое обозначение зон инфильтрации и эксфильтрации по зданию:

- а) схема воздухообмена № 1; б) схема воздухообмена № 2;
- в) схема воздухообмена № 3; г) схема воздухообмена № 4

Схему № 1 можно назвать самой распространённой, она типична для больших городов, где здания в среднем выше 7 этажей и наблюдается умеренная

интенсивность ветра (по скорости 2-4 м/с). Для этой схемы воздухообмена на основе анализа расчетных данных установлено:

$$h_{\text{нав}} \cong h_0 + \frac{\sigma}{1+\sigma} \cdot \frac{(c_n - c_3) \rho_n \cdot v_H^2}{2g}, \quad (10)$$

$$h_{\text{подв}} \cong h_0 - \frac{1}{1+\sigma} \cdot \frac{(c_n - c_3) \rho_n \cdot v_H^2}{2g}, \quad (11)$$

где $h_{\text{нав}} = \xi_{\text{нав}} \cdot H$ – размерный аналог величины $\xi_{\text{нав}}$, м; $h_{\text{подв}}$ – размерный аналог величины $\xi_{\text{подв}}$, м; h_0 – высота (уровень) в здании, где наблюдается равенство по поступлению количества инфильтрующегося и эксфильтрующегося воздуха по всему периметру здания при отсутствии ветра.

Полученные выражения (10-11) справедливы для схем №№ 1-3: для схемы № 2 фильтрационного воздухообмена можно определить $h_{\text{нав}}$ (10); для схемы № 3 – $h_{\text{подв}}$ (11). Для схемы № 4 по результатам расчетов установлено: $h_* \cong 0,5$ (12).

Четвертая глава посвящена разработке методики расчета величины количества инфильтрующегося воздуха для жилых и общественных зданий, необходимой для расчета тепловых потерь по зданию.

При отсутствии ветра расположение линии уровня, разделяющей фасады на зоны инфильтрации и эксфильтрации, и давление внутри помещений здания определяются аналитически:

$$\xi_0 = \frac{h_0}{H} = \frac{1}{1 + \delta^{\frac{3}{5}}}, \quad (13)$$

$$p_b = \frac{(\rho_n - \rho_b) g \cdot \delta^{\frac{3}{5}} \cdot H}{1 + \delta^{\frac{3}{5}}}. \quad (14)$$

После определения h_0 , далее согласно (10) и (11) было определено точное расположение сечений на уровнях $h_{\text{нав}}$, $h_{\text{подв}}$ и, соответственно, во-первых, сформулированы критериальные условия существования каждой схемы фильтрационного воздухообмена при наличии ветра: схеме воздухообмена № 1 соответствует условие (15), схеме № 2 – условие (16), схеме № 3 – условие (17), схеме № 4 – условие (18):

$$\left\{ \begin{array}{l} Eu < \frac{\delta^{\frac{3}{5}}(1+\sigma)}{\sigma \left(1 + \delta^{\frac{3}{5}}\right)}, \quad Eu < \frac{1+\sigma}{1 + \delta^{\frac{3}{5}}}, \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\frac{1+\sigma}{1 + \delta^{\frac{3}{5}}} < Eu < \frac{\delta^{\frac{3}{5}}(1+\sigma)}{\sigma \left(1 + \delta^{\frac{3}{5}}\right)}, \quad (16)$$

$$\frac{\delta^{\frac{3}{5}}(1+\sigma)}{\sigma\left(1+\delta^{\frac{3}{5}}\right)} < Eu < \frac{1+\sigma}{1+\delta^{\frac{3}{5}}}, \quad (17) \quad \left\{ \begin{array}{l} Eu > \frac{\delta^{\frac{3}{5}}(1+\sigma)}{\sigma\left(1+\delta^{\frac{3}{5}}\right)}, \\ Eu > \frac{1+\sigma}{1+\delta^{\frac{3}{5}}}. \end{array} \right. \quad (18)$$

Во-вторых, получены выражения для давления внутри помещений здания:

– для схем № 1,2,3:

$$p_b = \frac{(\rho_n - \rho_b)gH \cdot \delta^{3/5}}{1 + \delta^{3/5}} + \frac{\rho_n \cdot v_H^2 \cdot (c_n + \sigma \cdot c_3)}{2(1 + \sigma)}; \quad (19)$$

– для схемы № 4:

$$p_b = \frac{1}{2}(\rho_n - \rho_b)gH + \frac{c_n \cdot \delta^{3/2} + c_3 \cdot \sigma^{3/2}}{\delta^{3/2} + \sigma^{3/2}} \cdot \frac{\rho_n \cdot v_H^2}{2}. \quad (20)$$

Совокупность выражений (15-20) по существу образуют методику определения количества инфильтрующегося воздуха для прямоугольных в плане (или близким к ним) жилых и общественных зданий, учитывающую влияния распределений внешнего знакопеременного ветрового давления и направления поперечной фильтрации воздушных масс (инфильтрация/эксфильтрация). Схема воздухообмена определяется согласно (15-18), (19-20) позволяют получить выражения для величины количества инфильтрующегося воздуха по зданию.

Согласно разработанной методике количество инфильтрующегося воздуха по зданию общественного или жилого типа следует искать в виде:

$$G_{\text{инф}} = G_{\text{инф,ок}} + G_{\text{инф,дв}} = \beta_{\text{ок}}(A_{\text{ок}}/R_{\text{и,ок}}^{\text{тр}}) \cdot (\Delta p/10)^{2/3} + \beta_{\text{дв}}(A_{\text{дв}}/R_{\text{и,дв}}^{\text{тр}}) \cdot (\Delta p/10)^{1/2}, \quad (21)$$

где Δp – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях воздухопроницаемых ограждающих конструкций, Па; $A_{\text{ок}}, A_{\text{дв}}$ – площади светопрозрачных конструкций (окна, балконные двери и пр.) и входных дверей в здание, м²; $G_{\text{инф,ок}}, G_{\text{инф,дв}}$ – величины количества инфильтрующегося воздуха по зданию через светопрозрачные конструкции и входные двери в здание, соответственно, кг/ч; $\beta_{\text{ок}}, \beta_{\text{дв}}$ – уточняющие коэффициенты, позволяющие учитывать для здания влияние на фильтрационный воздухообмен действия на фасады знакопеременного ветрового давления.

Отличие данного способа определения величины $G_{\text{инф}}$ от норм СП50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» состоит в наличии уточняющих коэффициентов $\beta_{\text{ок}}, \beta_{\text{дв}}$ выраженных относительно характерной разности давления Δp (22) (формула 7.2 СП50.13330.2012):

$$\Delta p = 0,55H(\gamma_n - \gamma_b) + 0,03\gamma_n v^2. \quad (22)$$

Для схемы фильтрационного воздухообмена № 1 коэффициенты $\beta_{ок}$, $\beta_{дв}$ следует определять как:

$$\beta_{ок} = \frac{0,9}{(1+\delta^{3/5})^{5/3}} \cdot \left[\left(1 + Eu \cdot \frac{\sigma(1+\delta^{3/5})}{1+\sigma} \right)^{5/3} + \sigma \left(1 - Eu \cdot \frac{(1+\delta^{3/5})}{1+\sigma} \right)^{5/3} \right], \quad (23)$$

$$\beta_{дв} = \left(\frac{1,82}{1+\delta^{3/5}} + \frac{1,82\sigma Eu}{1+\sigma} \right)^{1/2}. \quad (24)$$

Для схемы фильтрационного воздухообмена № 2:

$$\beta_{ок} = \frac{0,9}{(1+\delta^{3/5})^{5/3}} \cdot \left[1 + Eu \cdot \frac{\sigma(1+\delta^{3/5})}{1+\sigma} \right]^{5/3}, \quad (25)$$

$$\beta_{дв} = \left(\frac{1,82}{1+\delta^{3/5}} + \frac{1,82\sigma Eu}{1+\sigma} \right)^{1/2}. \quad (26)$$

Для схемы фильтрационного воздухообмена № 3:

$$\beta_{ок} = \frac{0,9}{(1+\delta^{3/5})^{5/3}} \cdot \left[\left(1 + Eu \cdot \frac{\sigma(1+\delta^{3/5})}{1+\sigma} \right)^{5/3} + \sigma \left(1 - Eu \cdot \frac{1+\delta^{3/5}}{1+\sigma} \right)^{5/3} - \left(Eu \cdot \frac{\sigma(1+\delta^{3/5})}{1+\sigma} - \delta^{3/5} \right)^{5/3} \right], \quad (27)$$

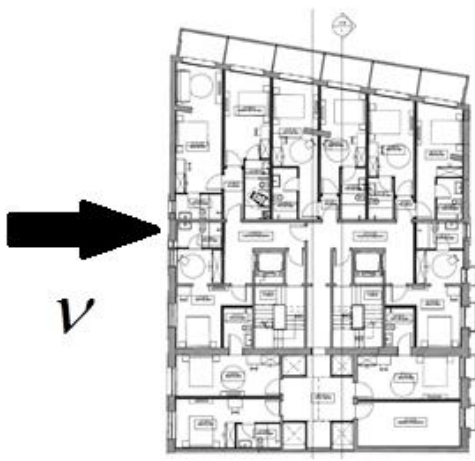
$$\beta_{дв} = \left(\frac{1,82}{1+\delta^{3/5}} + \frac{1,82\sigma Eu}{1+\sigma} \right)^{1/2}. \quad (28)$$

Для схемы фильтрационного воздухообмена № 4:

$$\beta_{ок} = \frac{0,9}{(1+\delta^{3/5})^{5/3}} \cdot \left[\left(1 + Eu \cdot \frac{\sigma(1+\delta^{3/5})}{1+\sigma} \right)^{5/3} + \sigma \left(1 - Eu \cdot \frac{1+\delta^{3/5}}{1+\sigma} \right)^{5/3} \right], \quad (29)$$

$$\beta_{дв} = \left(\frac{1,82}{1+\delta^{3/5}} + \frac{1,82\sigma Eu}{1+\sigma} \right)^{1/2}. \quad (30)$$

В конце главы (*раздел 4.6*) представлены примеры расчетов удельной вентиляционной характеристики для зданий: гостиничного комплекса «VORAMAR» (рисунок 5) и высотного здания «корпус № 2» ЖК «D1» матричным методом, разработанным Неклюдовым А.Ю. (Неклюдов А.Ю. Совершенствование методов расчета тепловой нагрузки на системы отопления и вентиляции с учетом влияния теплотехнических неоднородностей оболочки здания // дис. канд. техн. наук: 05.23.03 – М., 2016. – 188 с.).



а)



б)

Рисунок 5 –План (а) и общий вид гостиничного комплекса «VORAMAR» (б)

Гостиничный комплекс VORAMAR в исходной конфигурации является 5-ти этажным зданием высотой $H=17$ м и с суммарной площадью светопрозрачных воздухопроницаемых конструкций $A_{ок}=800 \text{ м}^2$. Помимо исходной конфигурации здания были рассмотрены удлиненные модификации здания в 9, 13 и 17 этажей, что было достигнуто введением дополнительных типовых этажей. Высоты данных модификаций 29 м, 41 м и 53 м при площадях светопрозрачных воздухопроницаемых конструкций 1440 м^2 , 2080 м^2 , 2720 м^2 , соответственно.

Инфильтрационные расходы по помещениям здания, составляющие матрицу $G_{инф}$ (31), определялись путем перемножения матриц геометрических характеристик $C_{инф}$ (в виде площадей и длин проницаемых элементов внешнего ограждения здания) и матрицы характеристик воздухопроницаемости P .

$$G_{инф} = \begin{pmatrix} G_{инф1} \\ G_{инф2} \\ G_{инф3} \\ \dots \\ G_{инфn} \end{pmatrix} = C_{инф} \cdot P = \begin{pmatrix} A_{111} & \dots & A_{11i} & A_{211} & \dots & A_{21j} & L_{11} & \dots & L_{1k} \\ A_{121} & \dots & A_{12i} & A_{221} & \dots & A_{22j} & L_{21} & \dots & L_{2k} \\ A_{131} & \dots & A_{13i} & A_{231} & \dots & A_{23j} & L_{31} & \dots & L_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{1n1} & \dots & A_{1ni} & A_{2n1} & \dots & A_{2nj} & L_{n1} & \dots & L_{nk} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_{111} & \dots & P_{11x} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{1i1} & \dots & P_{1ix} \\ P_{211} & \dots & P_{21x} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{2j1} & \dots & P_{2jx} \\ P_{311} & \dots & P_{31x} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{3k1} & \dots & P_{3kx} \end{pmatrix} \cdot \quad (31)$$

Каждый индивидуальный член матрицы P определяется согласно выражению:

$$P_{инд} = \left(\frac{\Delta P_{инд}}{10} \right)^{n_{инд}} \cdot \frac{1}{R_{u,инд}}, \quad (32)$$

где $n_{инд}$ – показатель фильтрации индивидуального воздухопроницаемого элемента внешней ограждающей конструкции здания, $R_{и,инд}$ – сопротивление воздухопроницанию ограждающей конструкции при $\Delta p_0 = 10 \text{ Па}$, $\text{м}^2 \cdot \text{ч}/\text{кг}$, $\Delta P_{инд}$ – разность давлений воздуха на внешней и внутренних сторонах воздухопроницаемого элемента, Па.

Полученная матрица суммировалась с матрицей вентиляционных расходов по помещениям здания $G_{вент}$ (строки матриц $G_{инф}$ и $G_{вент}$ соответствуют помещениям здания) и в итоге тем самым определялась матрица парциальных вентиляционных характеристик $K_{вент}^z$ (33), где каждая строка матрицы является парциальной вентиляционной характеристикой i -ого помещения здания. Сумма строк матрицы $K_{вент}^z$ является удельной вентиляционной характеристикой по зданию:

$$K_{вент}^z = \frac{H_v^z}{V_{от}} = (G_{вент} \cdot s \cdot z_{вент} + G_{инф} \cdot s \cdot z_{инф}) \cdot \frac{1}{V_{от}} = \begin{pmatrix} k_{вент_1}^z \\ k_{вент_2}^z \\ k_{вент_3}^z \\ \dots \\ k_{вент_n}^z \end{pmatrix}. \quad (33)$$

Было рассмотрено два варианта назначения при расчетах ветрового давления, действующего на фасады здания. В одном случае при допущение, что все воздухопроницаемые элементы здания находятся на наветренном фасаде, на каждом индивидуальном воздухопроницаемом элементе внешнего ограждения здания задается максимальная разность давления Δp :

$$\Delta p = (H - h)(\rho_n - \rho_b)g + 0,5\rho_n v^2(c_n - c_3)k_{дин} - p_b, \quad (34)$$

$$p_b = 0,5H(\rho_n - \rho_b)g + 0,25\rho_n v^2 k_{дин}(c_n - c_3). \quad (35)$$

В другом случае на каждом индивидуальном воздухопроницаемом элементе внешнего ограждения здания перепад давления Δp задается в соответствии с принадлежностью к наветренной или подветренной зоне воздухопроницаемого элемента при определении p_b согласно (19):

$$\Delta p_{нав} = (H - h)(\rho_n - \rho_b)g + 0,5c_n \rho_n v^2 k_{дин} - p_b, \quad (36)$$

$$\Delta p_{подв} = (H - h)(\rho_n - \rho_b)g + 0,5c_3 \rho_n v^2 k_{дин} - p_b. \quad (37)$$

Расчеты величины удельной вентиляционной характеристики гостиничного комплекса «VORAMAR» (при параметрах $t_n = 1,2^\circ\text{C}$, $t_b = 21^\circ\text{C}$, $v = 2 \text{ м/с}$, $R_{u, \text{ок}} = 0,23 \text{ м}^2\text{ч/кг}$, $R_{u, \text{дв}} = 0,16 \text{ м}^2\text{ч/кг}$) показали, что расхождение в определении отдельной вентиляционной характеристики между двумя вариантами расчетов монотонно возрастает с повышением

этажности (высоты) здания, рисунок 7. Обнаруженная закономерность говорит о том, что для высотных зданий точность определения удельной вентиляционной характеристики может существенно зависеть от точности определения инфильтрационных расходов по помещениям здания и допущение о том, что все воздухопроницаемые элементы внешнего ограждения здания условно находятся на наветренной стороне может быть неприменимо в силу достаточно неточного определения параметров энергосбережения здания.

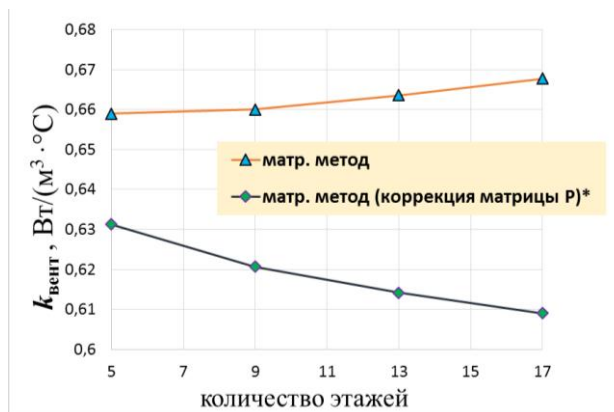


Рисунок 7 – Расчеты удельной вентиляционной характеристики для здания гостиничного комплекса «VORAMAR»

Таблица 1 – Расчеты удельной вентиляционной характеристики для здания «корпус № 2»

уточненный матричный метод	матричный метод
$G_{\text{инф}}$, кг/ч	
8143	15931
$k_{\text{вент}}$, Вт/(м³·°C)	
0,116	0,13
$q_{\text{от}}^p$, Вт/(м³·°C)	
0,205	0,221
отклонение $q_{\text{от}}^p$ от $q_{\text{от}}^{\text{тр}}$, %	
11,6	4,7
класс энергосбережения	
C+	C

Аналогичные расчеты удельной вентиляционной характеристики для здания «корпус № 2» при двух вариантах задания распределения величины Δp по фасадам здания ($t_n = -2,2^\circ\text{C}$, $t_b = 21^\circ\text{C}$, $v = 2,2 \text{ м/с}$, $R_{u, \text{ок}} = 1 \text{ м}^2\text{ч/кг}$, $R_{u, \text{дв}} = 0,55 \text{ м}^2\text{ч/кг}$) подтверждают данный вывод (таблица 1).

Для высотного здания «корпус № 2» учет действия на фасады здания знакопеременного

ветрового давления и направления поперечной фильтрации воздушных масс существенно уточняет определение величины суммарного количества инфильтрующегося воздуха по зданию и, соответственно, определение кратности воздухообмена по зданию. В итоге происходит уточнение величины расчетной удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания $q_{\text{от}}^p$ и класса энергосбережения здания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования:

1. В работе показана актуальность разработки простых, доступных и при этом достаточно точных методик определения количества инфильтрующегося воздуха для распространённых случаев объемно-плановых конфигураций внешних ограждений жилых и общественных зданий, в которых можно учесть действие на фасады зданий распределений внешнего знакопеременного ветрового давления.

2. Сравнительный анализ результатов расчетов воздушного режима прямоугольных в плане зданий позволил внести уточнения в принятую концепцию назначения ветрового давления при указанных расчетах.

3. Полученные экспериментальные данные по распределениям аэродинамического коэффициента c в виде электронной базы, представляют самостоятельное значение, в частности, – для верификации технологий CFD-моделирования взаимодействий ветровых потоков со строительными сооружениями.

4. В работе был исследован и аналитически описан фильтрационный воздухообмен для прямоугольных в плане зданий.

5. В работе показано, что учет действия на фасады здания знакопеременного ветрового давления и направления поперечной фильтрации воздушных масс для высоких зданий существенно уточняет определение величины суммарного количества инфильтрующегося воздуха по зданию и, соответственно, величины кратности воздухообмена.

6. На основе численных и аналитических исследований воздушного режима прямоугольных в плане зданий с однотипным поэтажным распределением внешних светопрозрачных воздухопроницаемых конструкций разработана уточненная методика определения количества инфильтрующегося воздуха для жилых и общественных зданий.

7. В работе представлены алгоритмы внедрения разработанной методики определения количества инфильтрующегося воздуха для жилых и общественных зданий в соответствующие нормативные документы.

Рекомендации по использованию результатов диссертации:

Уточнённый метод назначения ветрового давления на фасады здания рекомендуется использовать в инженерной практике. Разработанная уточненная методика определения количества инфильтрующегося воздуха для жилых и общественных зданий рекомендуется для внедрения в нормативные документы ГОСТ Р 55656-2013 «Энергетические характеристики зданий. Расчет

использования энергии для отопления помещений», СП 345.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты», СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» (приложение Г).

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации:

Уточненная методика определения количества инфильтрующегося воздуха для жилых и общественных зданий позволяет достаточно просто учитывать ветровое воздействие на здание. Методика универсально применима касательно любых зданий с постоянной плановой конфигурацией. В дальнейших перспективах исследований согласно сформулированной в работе концепции учета ветрового воздействия при расчетах воздушного режима планируется получить необходимую аэродинамическую информацию для простых форм зданий (например, для круглых, овальных, треугольных, трапециевидных в плане), которая расширит диапазон применения методики. Среди перспектив дальнейшей разработки темы также можно отметить исследования воздушного режима зданий с учетом наличия внутренних ограждений и разработку доступного и достаточно точного способа учета влияния «пористости» здания на инфильтрационные характеристики здания при помощи уточняющих коэффициентов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, включенных в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Кубенин А. С.** Методика определения максимальных расходов теплоты на нагрев инфильтрующегося воздуха через окна здания за весь отопительный период / **А.С. Кубенин** // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – Т. 7, № 5. – С. 1–14.
2. **Кубенин А. С.** Исследование влияние направления ветра на процессы инфильтрации воздуха через окна здания / **А.С. Кубенин** // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – Т. 7, № 4. – С. 1–19.
3. **Кубенин А. С.** Численное моделирование аэродинамики жилого комплекса с прилегающей застройкой / **А.С. Кубенин, А.Н. Федосова** // Научное обозрение. – 2015. – № 8. – С. 136–141.

4. Гагарин В. Г. О достоверности компьютерных прогнозов при определении ветровых воздействий на здания и комплексы / В. Г. Гагарин, С.В. Гувернюк, **А.С. Кубенин** // Жилищное строительство. – 2014. – № 7. – С. 3–8.

5. **Кубенин А.С.** Исследование аэродинамики протяженных конструкций на основе расчетно-экспериментального подхода / А.С. Кубенин, А.Н. Федосова, О.И. Поддаева // Научное обозрение. – 2015 – № 21. – С. 79–84.

6. **Кубенин А.С.** Прогнозирование ветровой нагрузки на уникальное высотное здание на основе численного моделирования/ А.С. Кубенин, А.Н. Федосова // Научное обозрение. – 2015 – № 8. – С. 130–135.

Публикации в периодических научных изданиях, входящих в международные реферативные базы (WOS, SCOPUS):

7. Гагарин В.Г. К методике расчета влияния ветровых воздействий на воздушный режим зданий / В. Г. Гагарин, С. В. Гувернюк, **А. С. Кубенин**, П. П. Пастушков, В.В. Козлов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 4. – С. 234–240.

8. Alexeev E. V. Using cfd simulation to estimate the comfort of pedestrian zones in the urban environment / E. V. Alexeev, V. G. Gagarin, **A. S. Kubenin**, P. S. Churin // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10, no. 21. – P. 42800–42803.

9. Poddaeva O. Measures of improving the accuracy of the calculation of energy efficiency and energy saving of construction transport infrastructure / O. Poddaeva, **A. Kubenin**, D. Gribach // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. — Vol. 692 of Advances in Intelligent Systems and Computing. — Springer International Publishing, 2017. – P. 490–497.

10. **Kubenin A.** Numerical simulation of wind effects on buildings and structures of complex geometry included / **A. Kubenin**, A. Fedosova // XXV POLISH - RUSSIAN - SLOVAK SEMINAR -THEORETICAL FOUNDATION OF CIVIL ENGINEERING. – Vol. 153 of Procedia Engineering. – Zilina, Slovakia, 2016. – P. 920–925.

Публикации в других изданиях:

11. Гагарин В.Г. Вопросы применения современных компьютерных технологий для решения практических задач строительной аэродинамики / В. Г. Гагарин, С. В. Гувернюк, **А. С. Кубенин**, А. А. Синявин // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2014. – Т. 18. – С. 151–156.

12. **Кубенин А. С.** Некоторые вопросы расчета воздушного режима зданий / **А.С. Кубенин** // СБОРНИК ДОКЛАДОВ VI Международной научно-технической конференции Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции. – Издательство МИСИ-МГСУ Москва, 2015. – С. 153–158.

13. Гувернюк С. В. К оценке относительной комфортности пешеходных зон на территории высотной застройки / С.В. Гувернюк, **А.С. Кубенин** // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor airquality and environmental: материалы XVI Межд. науч. конф., 16–29 сентября 2018 г. (Флоренция). — ВолгГМУ Волгоград, 2018. – С. 21–27.