

На правах рукописи



КРИВОШЕИН Михаил Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ
МНОГОКВАРТИРНЫХ ЗДАНИЙ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ
ВЫТЯЖНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Галдин Владимир Дмитриевич

Официальные оппоненты: **Аверкова Ольга Александровна**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород,
кафедра «Теплоснабжения и вентиляции»,
профессор;

Малявина Елена Георгиевна,
кандидат технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, кафедра «Теплоснабжения и вентиляции», профессор;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита диссертации состоится «25» июня 2019 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.06 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/krivosheimihail-aleksandrovich>

Автореферат диссертации разослан «4» апреля 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пухкал Виктор Алексеевич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В структуре теплотерь современных зданий значительную долю занимают потери теплоты на подогрев приточного вентиляционного воздуха. По данным различных исследователей в современных жилых зданиях доля потерь теплоты на вентиляцию (при обеспечении нормативного воздухообмена) составляет от 40 до 60 % от общих теплотерь. Управление и регулирование воздухообменом зданий с учетом режима их эксплуатации и потребностей в сочетании с регулируемыми системами отопления открывает значительные резервы для экономии тепловой энергии.

Одним из технических решений, позволяющих реализовать регулируемый воздухообмен в зданиях, является применение систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами (по терминологии АВОК – системы механической вытяжной вентиляции с индивидуальными вентиляторами).

Приток воздуха в таких системах обеспечивается за счет приточных вентиляционных устройств (оконных или стеновых клапанов), а удаление воздуха осуществляется посредством индивидуальных вентиляторов, устанавливаемых в вытяжных вентиляционных каналах. Основными достоинствами данных систем является возможность обеспечения требуемого воздухообмена, как в холодный, так и в теплый периоды года, и индивидуального поквартирного регулирования системы вентиляции.

Однако, как показывает практика, эффективность работы подобных систем в значительной мере зависит от ряда факторов: характеристик применяемых вентиляторов, режима их включения, регулирования (открытия – закрытия) приточных устройств, оконных створок, сочетаний внешних климатических воздействий и др. Как следствие – несоответствие фактических расходов на отдельных участках вентиляционной сети проектным значениям, перетекание воздуха между квартирами различных этажей, ухудшение работы системы вентиляции в целом.

Необходимость повышения надежности и эффективности управления систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами определяет актуальность данной работы.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической основой исследования послужили работы ряда отечественных и зарубежных ученых: П.Н. Каменева, В.Е. Константиновой, К.С. Светлова, И.Ф. Ливчака, А.П. Меренкова, В.Я. Хасилева, Э.Я. Гинзбурга, Н.Н. Разумова, С.Е. Бутакова, Г.Г. Вахвахова, В.Г. Лобачева, М.М. Андрияшева, И.Е. Идельчика, М.М. Грудзинского, В.П. Титова, В.Н. Богословского, Ю.А. Табунщикова, Т.А. Дацюк, В.А. Пухкала, В.М. Уляшевой, Е.Х., Китайцевой, Е.Г. Малявиной, С.В. Бирюкова, D. Etheridge, M. Cook, G.R. Hunt, O.Connick, A. Acred и других авторов.

Цель исследования заключается в выявлении и анализе закономерностей распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами, повышении надежности и эффективности данных систем.

Задачи исследования:

- разработка физической и математической модели систем вентиляции с индивидуальными вытяжными вентиляторами;
- анализ и совершенствование методов решения задач о потокораспределении в системах вентиляции зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами;
- исследование закономерностей распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий на основе численного моделирования их работы при различных сочетаниях внешних и внутренних воздействий;
- анализ распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий при различных способах организации притока воздуха в жилых помещениях квартир;
- разработка технических решений, повышающих надежность и эффективность управления системами вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами;
- лабораторные и натурные исследования систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

Объект исследования – системы вентиляции жилых многоквартирных зданий.

Предмет исследования – закономерности распределения воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

Научная новизна исследования:

1. Разработана математическая модель, описывающая работу систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами, с представлением аэродинамических характеристик вентиляторов и воздухопроницаемых элементов сети в виде полиномиальных зависимостей давления от расхода воздуха.
2. Усовершенствован графический метод решения обратной задачи аэродинамического расчета через построение характеристики сети для одного или нескольких совместно работающих вентиляторов.
3. Исследованы закономерности распределения потоков воздуха в системах вентиляции различного конструктивного решения с учетом размещения в помещениях нескольких вытяжных каналов, характеристик воздухопроницаемых элементов, вентиляторов, режимов их работы.
4. Разработаны технические решения, повышающие надежность и эффективность работы систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

Методология и методы исследования. В работе использовались графические, аналитические методы и математическое моделирование. В ходе диссертационного исследования использовались численное моделирование и натуральный эксперимент.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно п.1 «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии», п.3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума».

Теоретическая значимость работы состоит в разработке математической модели и результатах теоретических исследований систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

Практическая значимость заключается в разработке технических решений, повышающих надежность и эффективность управления системами вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность исследований подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов, полученных на основе математического моделирования, графических и аналитических расчетов с результатами лабораторных и натурных исследований.

Основные положения работы докладывались на заседании кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета; 70-й всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург: СПбГАСУ 2017 г.); VI региональной молодежной научно-технической конференции «Омский регион – месторождение возможностей (Омск: ОГИС 2015 г.); на заседании кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» НИУ МГСУ.

Премии и гранты: целевой грант фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «УМНИК» – 2015 г.

Внедрение результатов. Методика расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами и разработанные технические решения использованы при разработке стандарта организации СТО СРО НП СПАС-05-2013. «Энергосбережение в зданиях. Расчет и проектирование систем вентиляции жилых многоквартирных зданий».

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 7 печатных работах, общим объемом 3,9 п. л., лично автором – 3,5 п. л., в том числе 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы 164 страницы, в том числе: 143 страницы – основной текст, содержащий 7 таблиц, 105 рисунков, 23 формулы; список литературы из 171 наименования на 12 страницах; 8 приложений на 9 страницах.

Во введении обоснована актуальность темы, поставлена цель и определены задачи исследования, показана ее научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации и внедрении результатов работы.

В первой главе проведен анализ систем вентиляции, применяемых в жилых многоквартирных зданиях; представлена общая классификационная схема систем вентиляции; выполнен обзор известных работ в области энергосбережения зданий с регулируемым воздухообменом; рассмотрены методы расчета и прогнозирования распределения потоков воздуха в системах вентиляции зданий, в том числе с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

Во второй главе разработаны физическая и математическая модели систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами; усовершенствован графический метод решения обратной задачи аэродинамического расчета через построение характеристики сети для одного или нескольких совместно работающих вентиляторов; проведена оценка корректности разработанных методов на лабораторном стенде, моделирующем сборный вытяжной канал с каналами-спутниками, в которые встроены вытяжные вентиляторы.

В третьей главе представлены результаты исследований распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами; проведен анализ закономерностей распределения потоков воздуха при различных конструктивных решениях систем вентиляции; проведены исследования закономерностей распределения потоков воздуха и перепадов давлений в сети вытяжных вентиляционных каналов жилых зданий при варьировании ряда внешних и внутренних факторов: изменении температуры наружного воздуха, изменении режима работы индивидуальных вентиляторов, открытии створок окон и приточных клапанов, включении кухонных вытяжек, установки в вытяжных каналах обратных клапанов и клапанов постоянного расхода воздуха и др.; разработаны общие технические решения, повышающие надежность и эффективность управления системами вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

В четвертой главе приведены результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещениях методами вычислительной гидродинамики CFD при различных вариантах организации притока воздуха; выполнена оценка влияния регулирования воздухообмена на температурный режим и теплотери помещения при различных температурах наружного воздуха.

В пятой главе представлены технические решения устройства (блока управления), предназначенного для программируемого управления работой вентиляторов, устанавливаемых в вытяжных каналах квартир; приведены результаты натурных исследований систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами и регулируемым воздухообменом.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Математическая модель, описывающая работу систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами

Система вентиляции здания рассматривается в виде аэродинамической сети определенной конфигурации, состоящей из узлов, соединенных между собой связями, характеризующими сопротивление ограждающих конструкций, вентиляционных каналов, приточных или вытяжных решеток, клапанов и др. элементов системы вентиляции. В узлы, под воздействием перепада давлений, поступает и удаляется определенное количество воздуха.

Узлами сети в данном случае являются отдельные квартиры, а также точки слияния и деления потоков воздушной среды. Окружающая среда принимается в качестве мнимого узла. Вытяжные вентиляторы представляются в виде источников дополнительного давления $P_{вент}$, создаваемого на отдельных участках сети.

Движение воздуха по участкам аэродинамической сети описывается нелинейными уравнениями, отражающими взаимосвязь между перепадом давлений и расходом воздуха.

На основе анализа известных зависимостей «давление – расход воздуха», применяемых при математическом моделировании систем вентиляции, предложены уравнения общего вида для описания воздухопроницаемых элементов сети

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^k (s_{i,j} \cdot G_i^j), \quad (1)$$

где $s_{i,1}, s_{i,2}, s_{i,3} \dots s_{i,k}$ – коэффициенты, определяемые в результате аппроксимации известной характеристики того или иного вентиляционного элемента, полученной по результатам испытаний; G_i – массовый расход воздуха, кг/ч.

Учет работающих в сети вентиляторов предложено описывать уравнением вида:

$$P_{вент} = s_0 + \sum_{j=1}^k (s_j \cdot G_i^j), \quad (2)$$

где s_0 – нулевой коэффициент, соответствующий давлению вентилятора при нулевом расходе, Па; $s_1, s_2, s_3 \dots s_k$ – коэффициенты, определяемые в результате аппроксимации напорно-расходной характеристики вентилятора.

Использование формул вида (1) и (2) обеспечивает универсальность подхода к аппроксимации зависимостей «давление – расход воздуха» для всех элементов аэродинамической сети и позволяет более точно определять расходы воздуха и потери давления при математическом моделировании воздушного режима здания.

В качестве примера на рисунке 1 приведены результаты испытаний и аппроксимация зависимости «давление – расход воздуха» по известным и предложенным в диссертационной работе формулам для некоторых элементов систем вентиляции.

Математическая модель воздушного режима здания описывается системой нелинейных уравнений, составленных на основе графа системы вентиляции

с указанием ветвей, узлов, расположения источников давления (вентиляторов) и предварительным заданием направления движения воздуха.

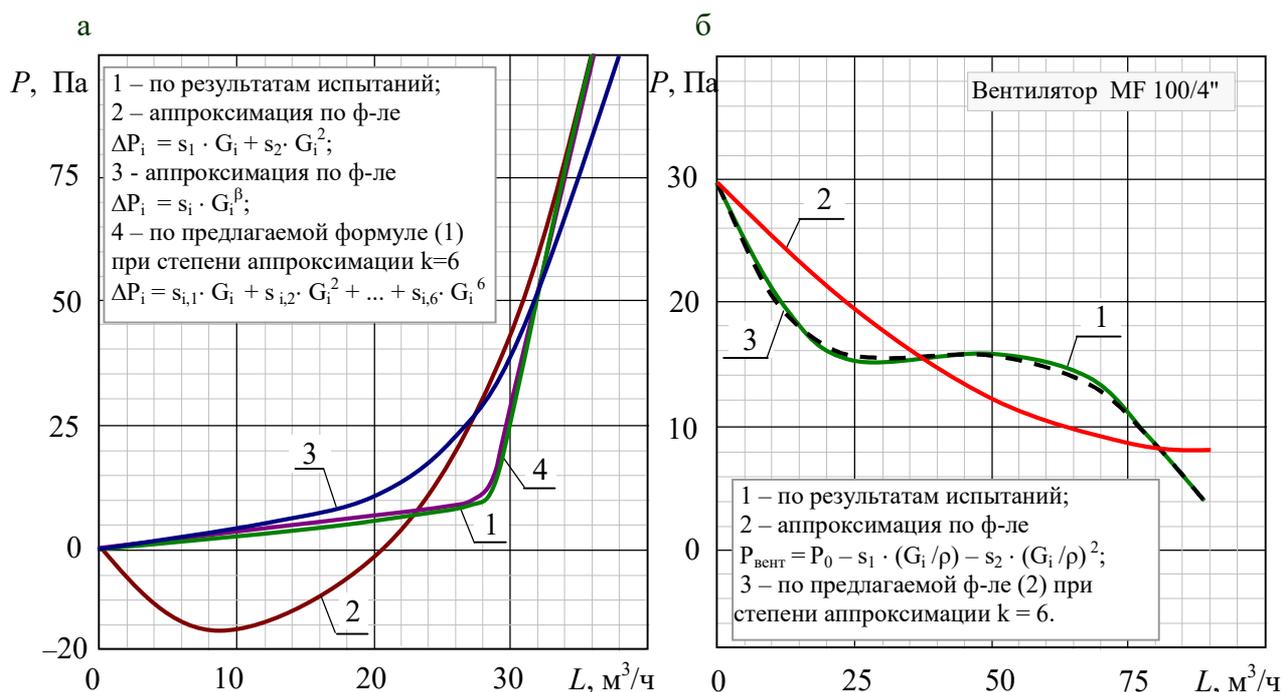


Рисунок 1 – Результаты испытаний и аппроксимация зависимости «давление – расход воздуха» для некоторых вентиляционных элементов: а – приточного клапана «VentAir»; б – вентилятора марки MF 100/4'' фирмы «Vortice» по различным формулам

Решение систем уравнений получено методом обобщенного приведенного градиента с использованием программы Microsoft office Excel. Критериями сходимости являются расходы воздуха, подходящие и уходящие от узлов (допустимая невязка – 0,01 м³/ч) и давления, создаваемые и теряемые в каждом независимом контуре графа (допустимая невязка – 0,01 Па).

Алгоритм расчета систем вентиляции представлен на рисунке 2.

Рассмотрен графический метод расчета систем вентиляции при работе в сети воздуховодов одного или нескольких вентиляторов. Известные решения дополнены рассмотрением «обратной» задачи – определением расхода воздуха на отдельных участках аэродинамической сети при заданных (известных) аэродинамических характеристиках вентиляторов.

Особенность метода – построение характеристики сети, на которую накладывается характеристика вентиляторов с уточнением потерь давления в местах смещения и разделения потоков. После наложения характеристик определяются расходы воздуха через все участки аэродинамической сети.

В качестве примера на рисунке 3 представлены расчетная схема и графическое представление режимов совместной работы двух вентиляторов в сети вытяжных каналов.

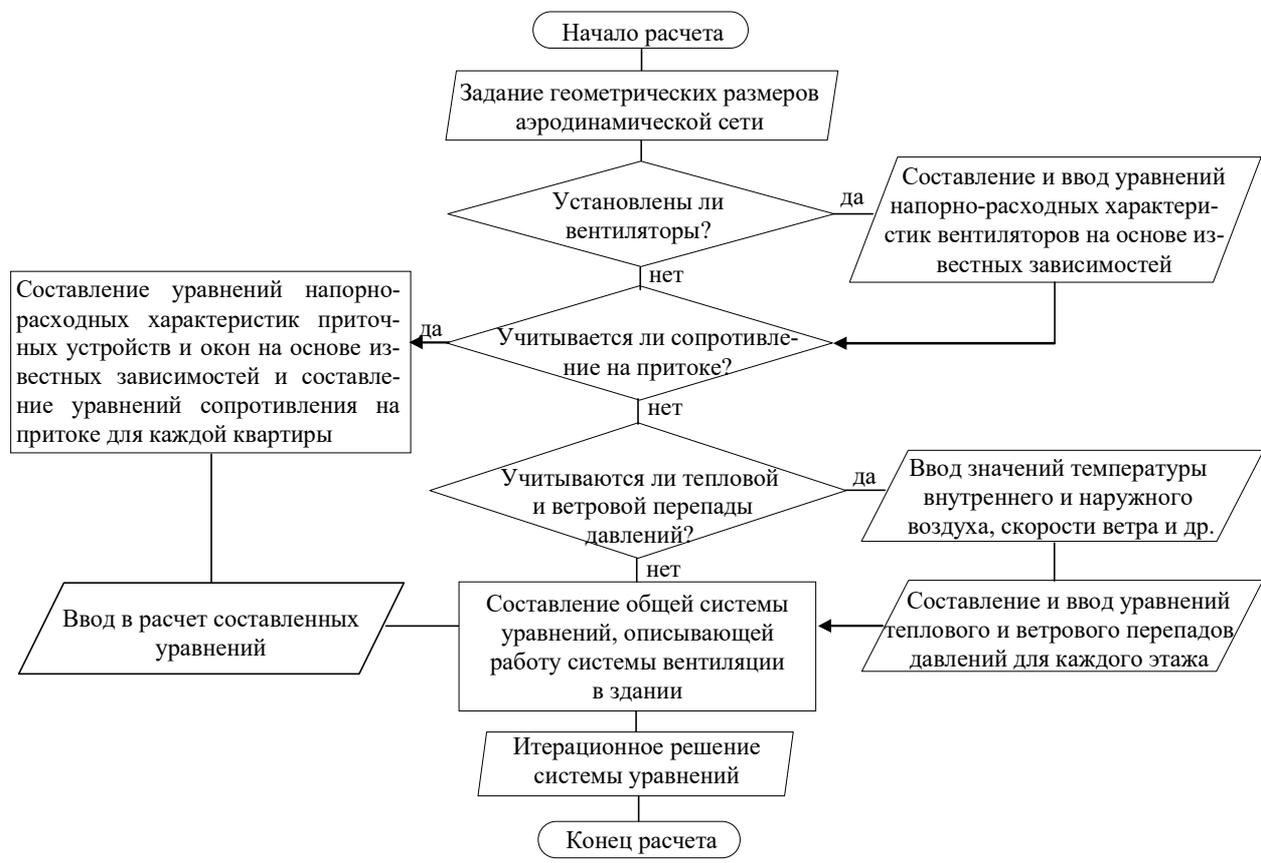


Рисунок 2 – Алгоритм расчета системы вентиляции

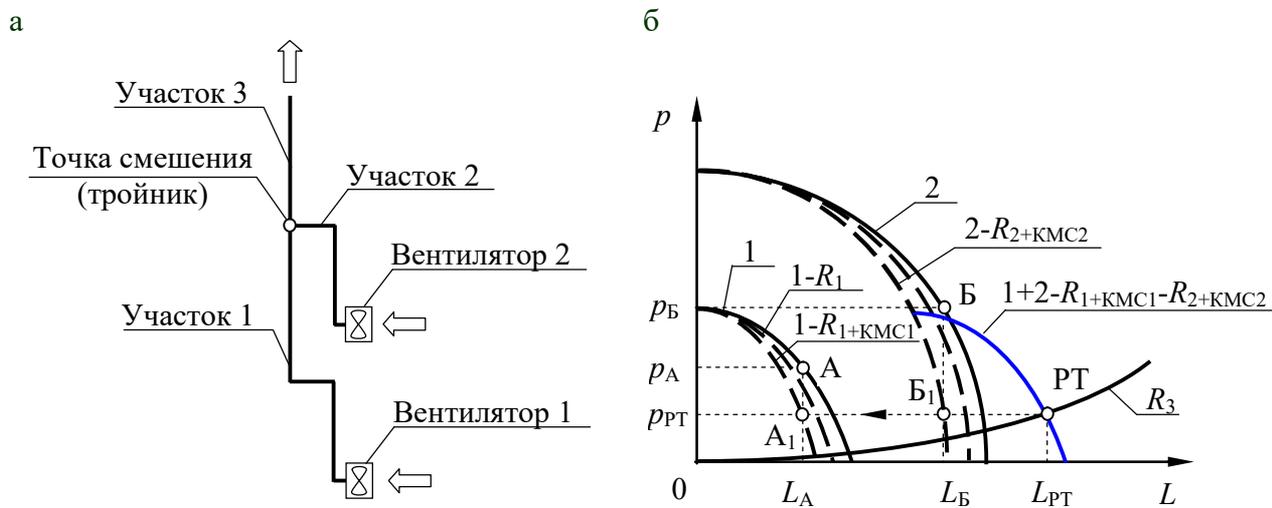


Рисунок 3 – Расчетная схема (а) и режим совместной работы вентиляторов (б) к решению задачи совместной работы двух вентиляторов в сети вытяжных каналов

2. Результаты теоретических исследований распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий

Анализ закономерностей распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами проведен на основе разработанной математической модели при варьировании ряда внешних и внутренних факторов.

В частности:

- систем вентиляции с вертикальными сборными каналами и каналами спутниками, присоединяемыми к сборному каналу через этаж;
- систем вентиляции с отдельными вентиляционными каналами;
- систем вентиляции с горизонтальными сборными каналами на чердаке;
- систем вентиляции с холодным и теплым чердаком.

Варьируемые параметры:

- режим работы (включение – выключение) индивидуальных вентиляторов по этажам;
- режим включения вентиляторов в пределах одной квартиры (санузел – кухня);
- открытие створок окон на различных этажах;
- влияние температуры наружного воздуха (изменение гравитационных перепадов давлений);
- режим работы (регулирование) приточных вентиляционных устройств (приточных клапанов);
- влияние замены индивидуальных вентиляторов кухонными вытяжками;
- регулирование расхода воздуха в процессе эксплуатации посредством установки в вентканалах обратных клапанов и (или) клапанов постоянного расхода воздуха.

Выполнены расчеты систем вентиляции ряда многоквартирных зданий.

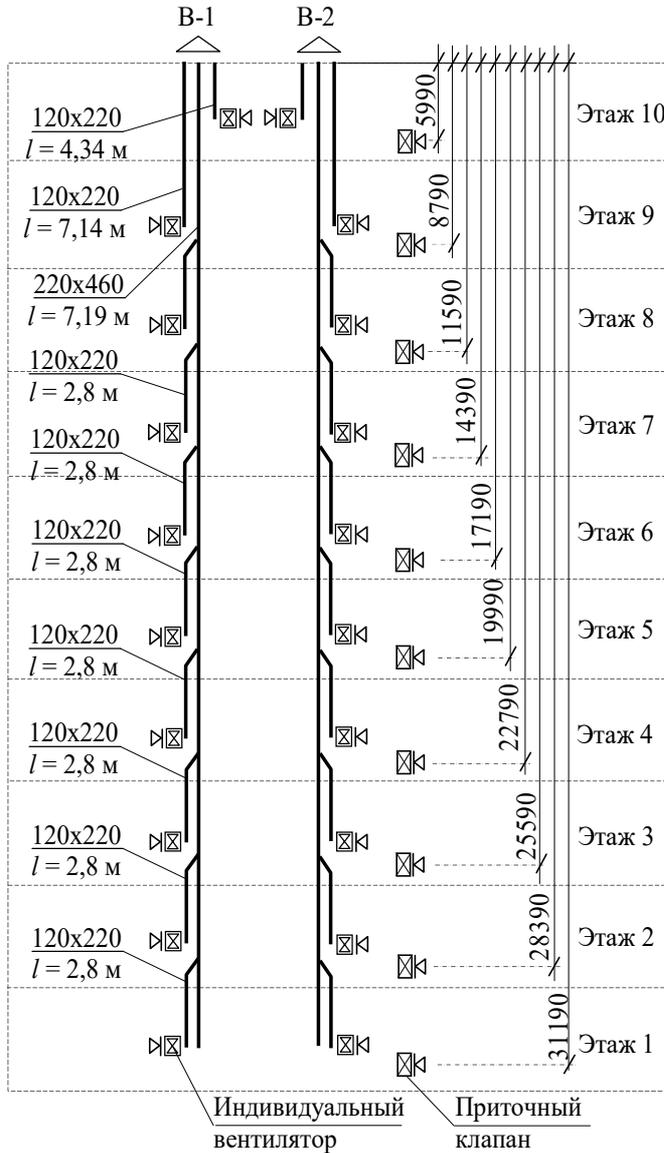
В качестве примера на рисунке 4 приведена расчетная схема и график системы вентиляции 2-х комнатных квартир десятиэтажного жилого дома, подключенных к двум вытяжным вентиляционным каналам.

Результаты расчетов данной системы при варьировании ряда внешних и внутренних факторов, приведены на рисунке 5.

Анализ результатов расчетов позволил отметить ряд особенностей и закономерностей распределения потоков воздуха в системах вентиляции. В частности, для систем вентиляции с вертикальными сборными каналами:

- при выключении вентиляторов (система эксплуатируется как естественная, с гравитационным побуждением) требуемый воздухообмен не обеспечивается; основные причины – снижение располагаемого перепада давлений и достаточно большое аэродинамическое сопротивление приточных устройств;
- установка вентиляторов в вытяжных каналах увеличивает воздухообмен, однако не все индивидуальные вентиляторы позволяют добиться требуемого воздухообмена; необходим подбор вентиляторов и увязка их аэродинамических характеристик с потерями давления в вытяжных вентиляционных каналах и приточных устройствах;
- изменение проектного режима работы системы вентиляции, в частности выключение или изменение характеристик отдельных вентиляторов, может кардинально изменить режим работы системы вентиляции как непосредственно в отдельной квартире, так и других квартирах, подключенных через каналы-спутники к одному сборному каналу; например, выключение одного из вентиляторов, может привести к «опрокидыванию» направления движения воздуха в этом канале и поступлению в квартиру грязного воздуха из сборного канала;

а



б

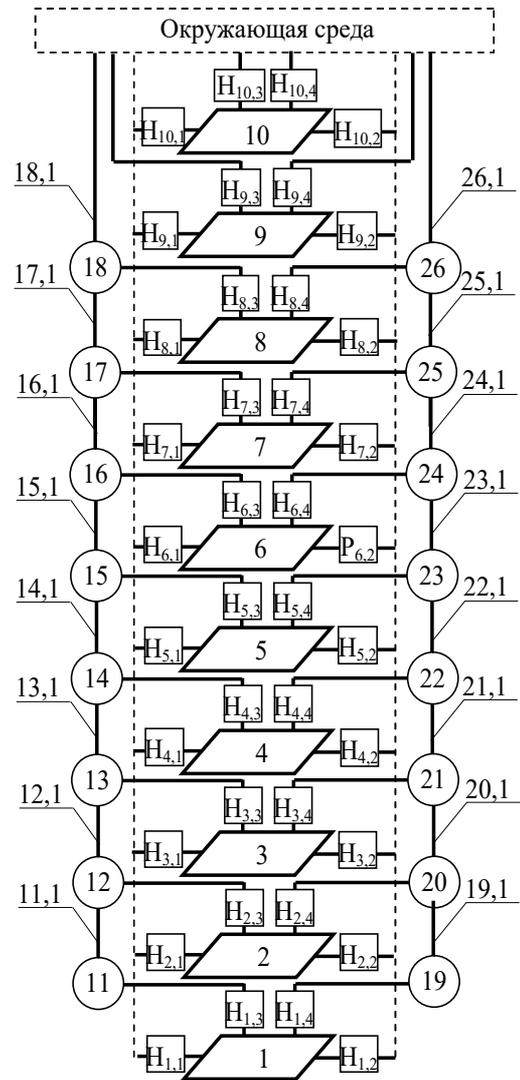


Рисунок 4 – Расчетная схема (а) и граф (б) системы вентиляции десятиэтажного жилого дома с децентрализованным механическим удалением воздуха

– при подключении к вытяжным каналам кухонных вытяжек, возможно перетекание воздуха в квартиры других этажей вследствие создания подпора в сборном канале; при этом другие вентиляционные каналы данной квартиры могут быть «опрокинуты» даже при работающих в них вентиляторах;

– открытие створки окна в подобных системах приводит к резкому (в разы) увеличению воздухообмена данной квартиры и снижению расхода удаляемого воздуха из других квартир;

– наихудшими условиями эксплуатации для данной системы является теплый период года при близости расчетных температур наружного и внутреннего воздуха; проектирование и подбор характеристик вентиляционных элементов следует проводить на условия теплого периода года.

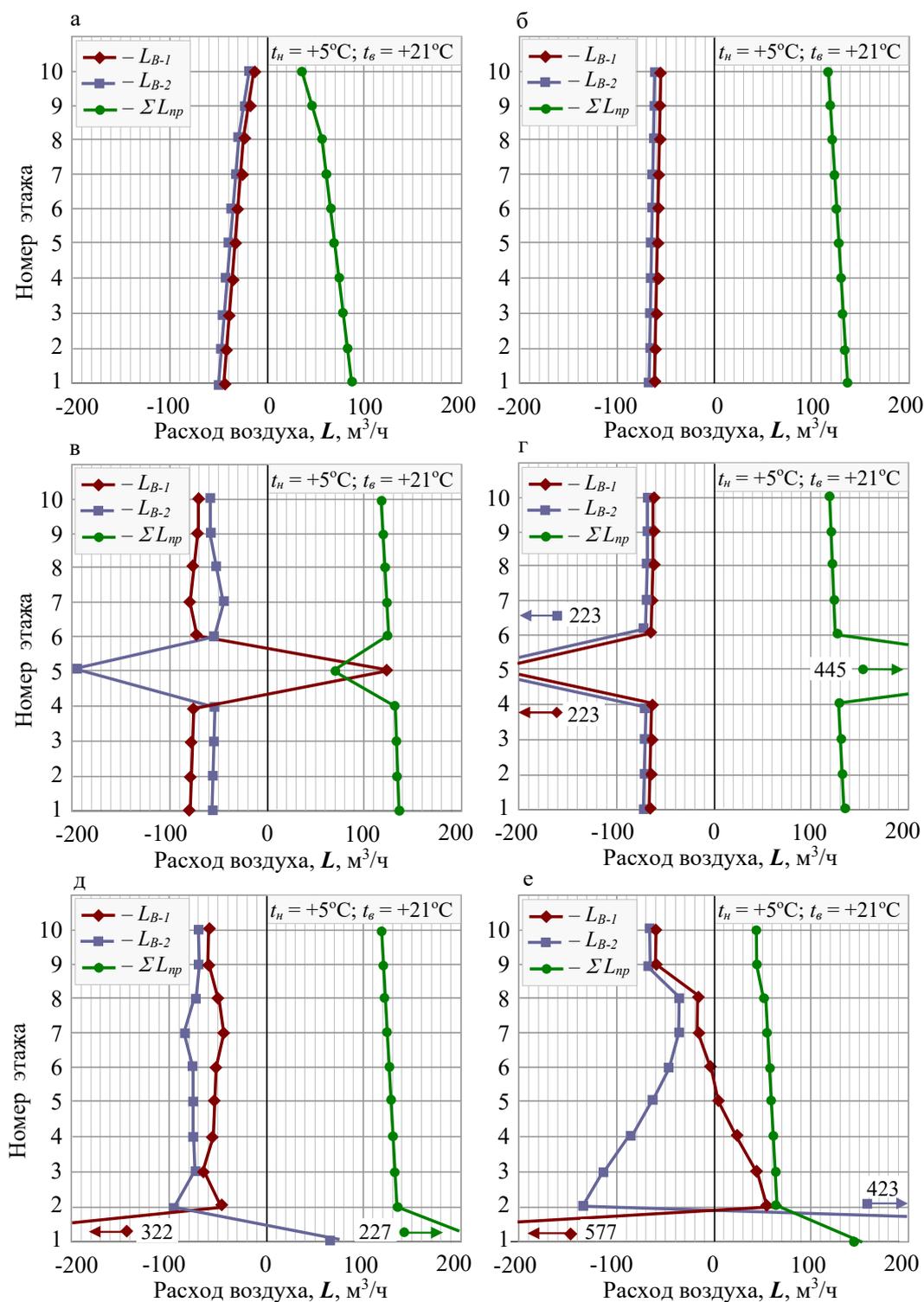


Рисунок 5 – Результаты расчета системы вентиляции жилого многоквартирного дома с вертикальными сборными каналами и каналами-спутниками: а – вентиляторы выключены, приточные клапаны открыты; б – вентиляторы включены, приточные клапаны открыты; в – на 5-м этаже выключен вентилятор В-1, все остальные вентиляторы включены, приточные клапаны открыты; г – вентиляторы на всех этажах включены, приточные клапаны открыты, на 5-м этаже открыто окно; д – вентиляторы на всех этажах включены, приточные клапаны открыты, на первом этаже к каналу В-1 подключена кухонная вытяжка; е – вентиляторы на всех этажах выключены, на первом этаже к каналу В-1 подключена кухонная вытяжка

В системах вентиляции с вертикальными отдельными каналами удаление воздуха из квартир разных этажей происходит по самостоятельным вытяжным каналам, не сообщающимся с каналами других этажей. Однако и при этом конструктивном решении возможно опрокидывание вентиляционных каналов при выключении одного из вентиляторов или подключении к каналу кухонной вытяжки.

Следует отметить, что при опрокидывании направления движения воздуха в системах вентиляции с отдельными вертикальными каналами в квартиру будет поступать наружный воздух. В холодный период года это может привести к нарушению температурного режима помещений и охлаждению строительных конструкций.

В системах вентиляции с горизонтальными сборными каналами на чердаке сбор воздуха из вытяжных вентиляционных каналов квартир разных этажей происходит в горизонтальном сборном канале с последующим удалением воздуха через вытяжную вентиляционную шахту. Включение вентилятора в любой из квартир создает избыточное давление в сборном канале и соответственно приводит к уменьшению расхода удаляемого воздуха из других квартир, либо опрокидыванию направления движения воздуха и его перетеканию из сборного канала в другие квартиры.

На основании полученных закономерностей, с целью обеспечения требуемого воздухообмена и исключения нарушения работы систем вентиляции квартир различных этажей, разработаны общие технические решения:

- установка в вытяжных каналах обратных клапанов, предотвращающих опрокидывание направления движения воздуха;
- установка клапанов постоянного расхода воздуха, ограничивающих расход воздуха в вытяжных каналах и выравнивающих влияние отдельных вентиляторов на воздухораспределение в сборных каналах;
- использование программируемых вентиляторов, оснащенных управляющими блоками и датчиками различного типа, обеспечивающих управление расходом воздуха за счет изменения режима работы вентилятора в зависимости от эксплуатационных потребностей.

Результаты расчетов при установке в вытяжных каналах обратных клапанов, клапанов постоянного расхода воздуха и регулировании скорости вращения вытяжных вентиляторов приведены на рисунке 6.

Анализ результатов расчетов показывает, что реализация данных решений в состоянии обеспечить аэродинамическую устойчивость систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами и требуемый воздухообмен в течение всего периода эксплуатации здания.

Моделирование распределения воздушных потоков в помещении выполнено при помощи программного пакета Ansys Fluent методом решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS), с применением $k - \epsilon$ модели турбулентности.

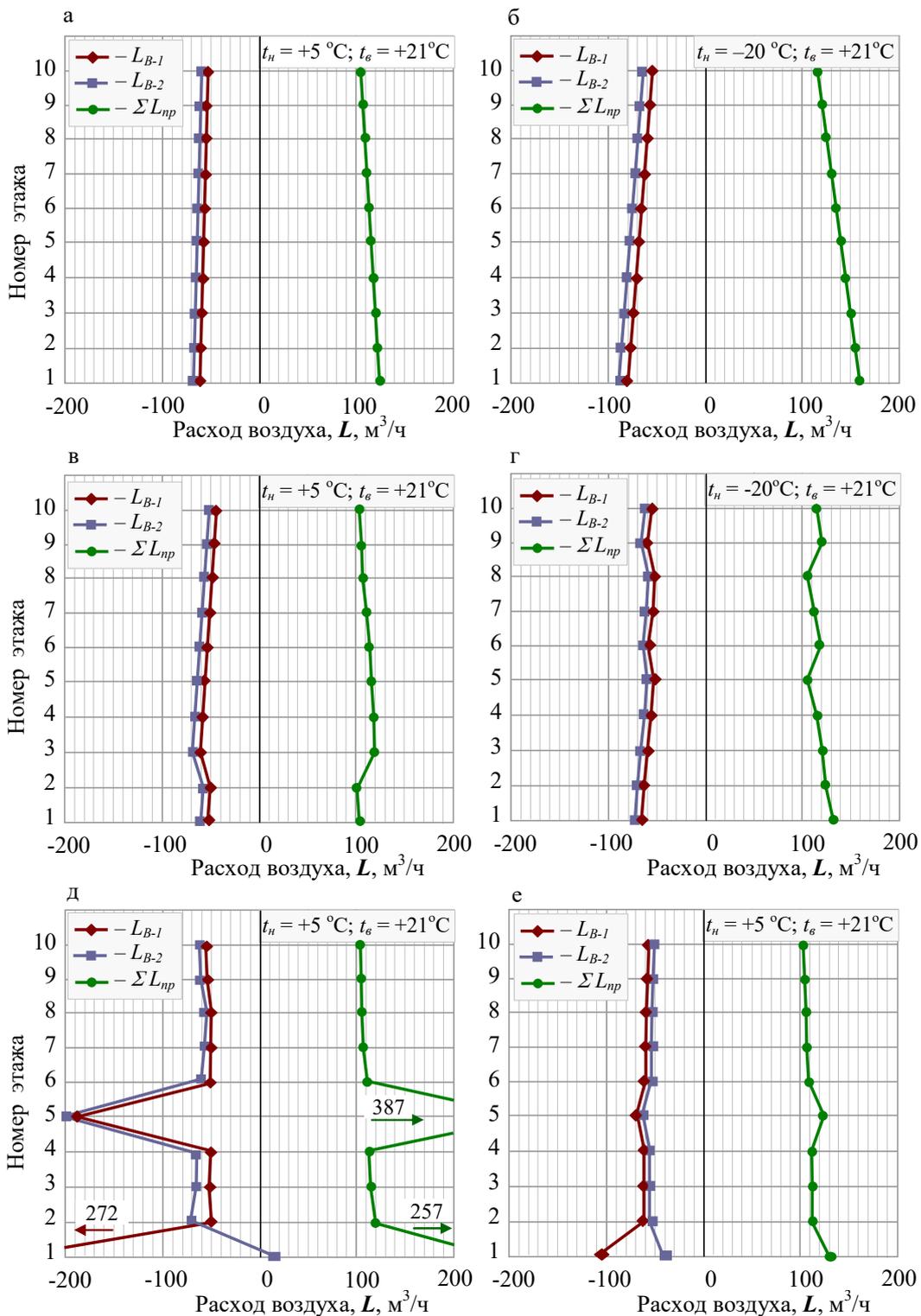


Рисунок 6 – Результаты расчета системы вентиляции с индивидуальными вытяжными вентиляторами: при установке в вытяжных каналах обратных клапанов и подключении вентиляторов через блоки управления: а, б – вентиляторы включены, приточные клапаны открыты, после каждого вентилятора установлен обратный клапан; в – то же, установленная скорость вращения вентиляторов 1–4 этажи – 70 %, 5 – 85 %, 6–10 – 100 %; г – то же, установленная скорость вращения вентиляторов 1–5 этажи – 50 %, 6–8 – 70 %, 9–10 – 85 %; д – вентиляторы включены (100 %), приточные клапаны открыты, на первом этаже включена кухонная вытяжка, на пятом этаже открыто окно; е – то же, в вытяжных каналах установлены клапаны постоянного расхода воздуха

Цель исследований – анализ распределения температур и скоростей воздушных потоков внутри жилого помещения в холодный период года при различных типах приточных клапанов, открытии окон или форточек, с учетом изменения расхода приточного воздуха, а также оценка влияния регулирования воздухообмена на температурный режим и величину теплопотерь помещения.

За основу модели помещения было принято жилое помещение трехкомнатной квартиры жилого многоквартирного дома. Площадь помещения – 13,5 м (размерами 3×4,5 м), высота помещения от потолка до пола – 2,8 м. В наружную стену шириной 3 м встроен оконный блок из ПВХ-профилей размерами 1,5×1,5 м.

При проведении расчетов варьировался тип приточного устройства, через которое воздух поступает в помещение. В рассматриваемых вариантах приток воздуха осуществлялся посредством:

- форточки;
- оконного приточного клапана, установленного в створке оконного блока;
- стенового приточного клапана, установленного рядом с оконным блоком;
- стенового приточного клапана, установленного над отопительным прибором.

Расчеты производились через 1 мин, 5 мин и при достижении стационарного режима после открытия приточного устройства.

Расходы воздуха, поступающего в помещение, предварительно определены на основе разработанной математической модели.

По результатам расчетов установлено, что на температурный режим помещений значительное влияние оказывает тип и место расположения приточных устройств, температура и расход приточного воздуха. Наибольшее снижение температуры наблюдается в зоне расположения приточных устройств.

Одним из эффективных решений является размещение приточных клапанов непосредственно над отопительными приборами. В этом случае обеспечивается смешение приточного холодного воздуха с конвективными потоками от отопительного прибора.

В качестве примера на рисунках 7–9 представлены результаты моделирования распределения воздушных потоков до и после регулирования скорости вращения вентиляторов до 50 % и установки клапанов постоянного расхода воздуха при достижении стационарного режима для приточного клапана, установленного над отопительным прибором.

Оценка влияния регулирования воздухообмена на температурный режим помещения и величину теплопотерь произведена на основании серии расчетов при варьировании температуры и расхода приточного воздуха. В качестве примера рассматривался случай с установкой приточного клапана в створке оконного блока.

Результаты изменения средней температуры внутреннего воздуха и изменения теплопотерь помещения представлены на рисунках 10, 11.

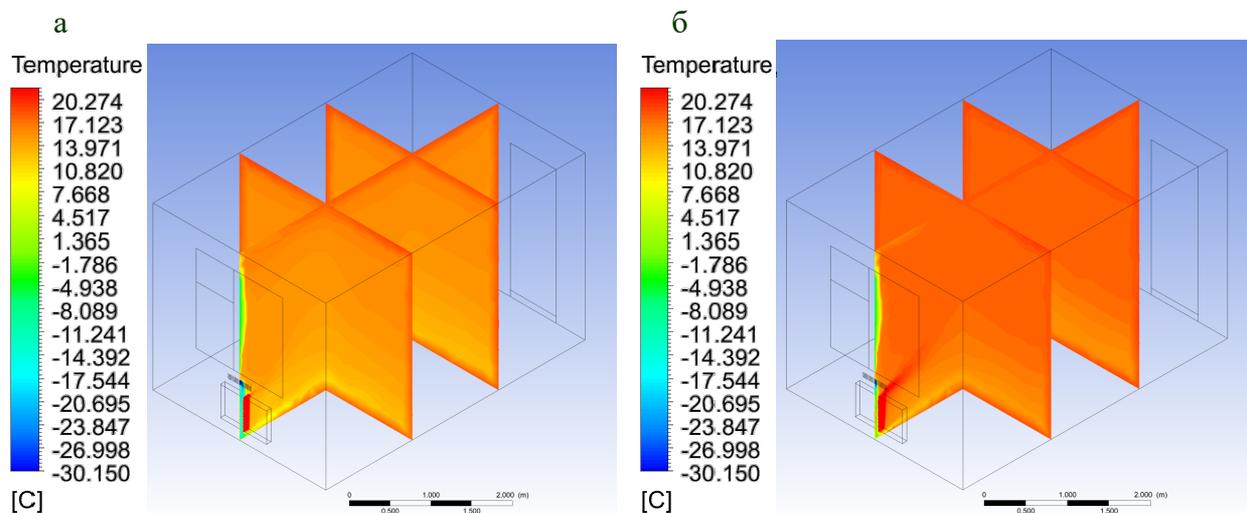


Рисунок 7 – Поля температур в помещении при достижении стационарного режима стенового приточного клапана, установленного над отопительным прибором до (а) и после (б) регулирования воздухообмена

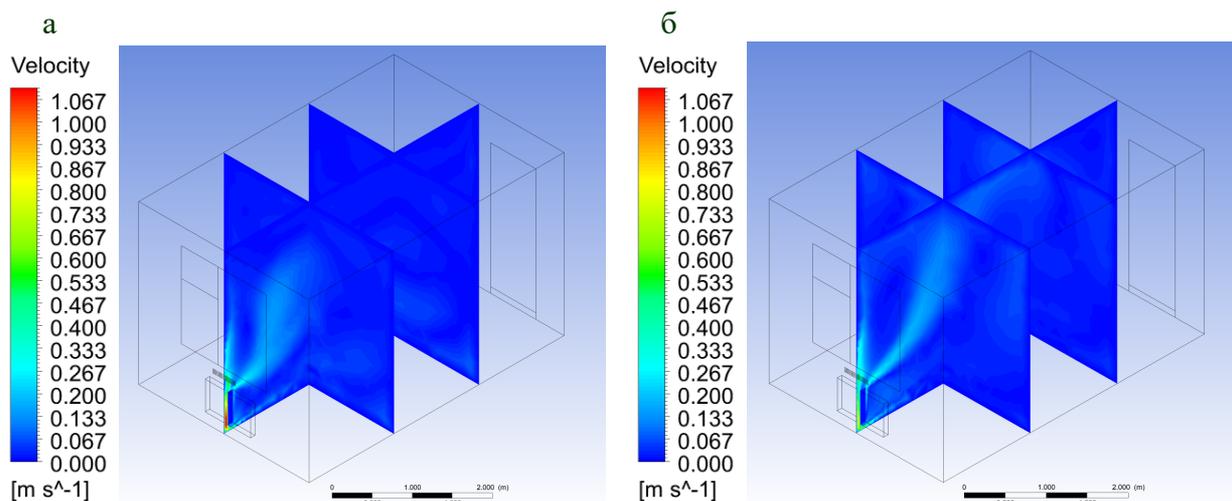


Рисунок 8 – Поля скоростей в помещении при достижении стационарного режима стенового приточного клапана, установленного над отопительным прибором до (а) и после (б) регулирования воздухообмена

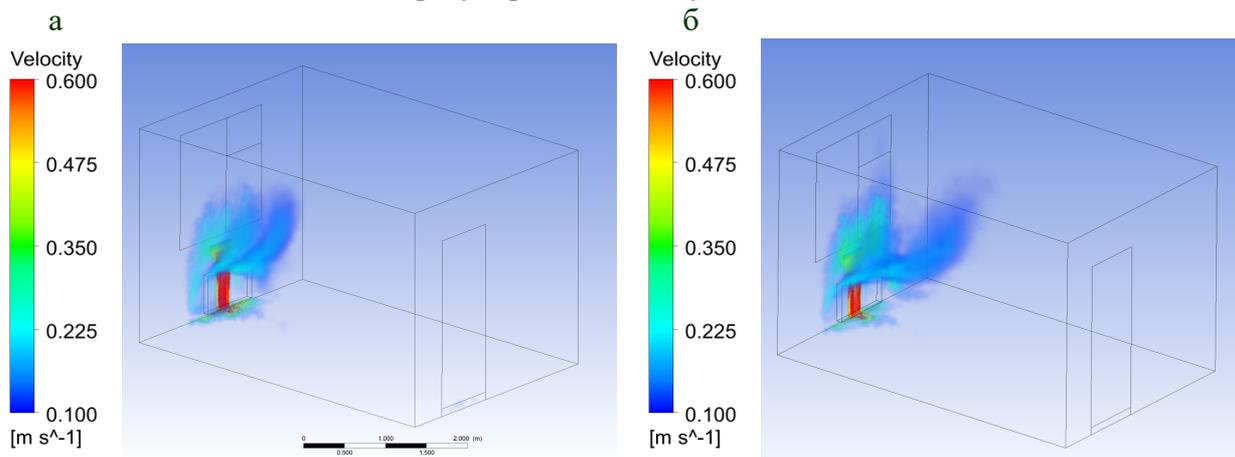


Рисунок 9 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, при достижении стационарного режима до (а) и после (б) регулирования воздухообмена

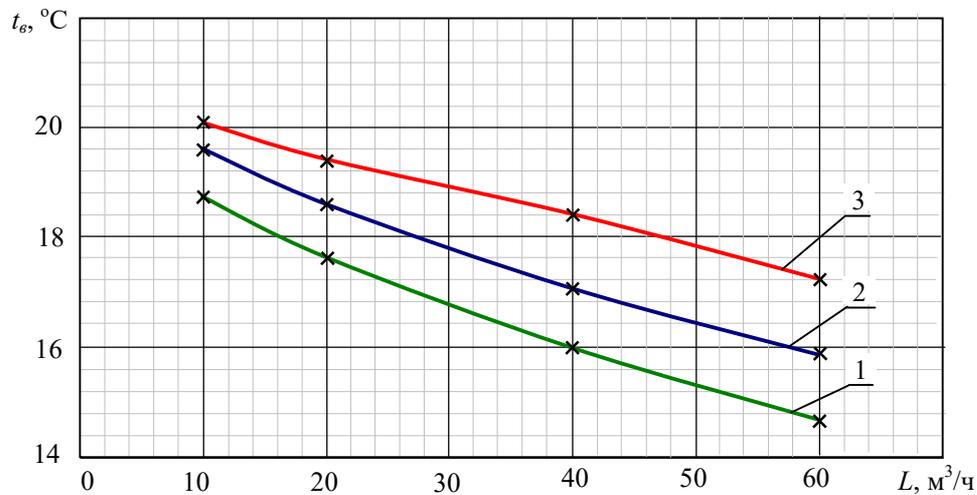


Рисунок 10 – Влияние регулирования воздухообмена на среднюю температуру внутреннего воздуха в помещении: 1 – температура наружного воздуха -30 °C; 2 – температура наружного воздуха -20 °C; 3 – температура наружного воздуха -10 °C

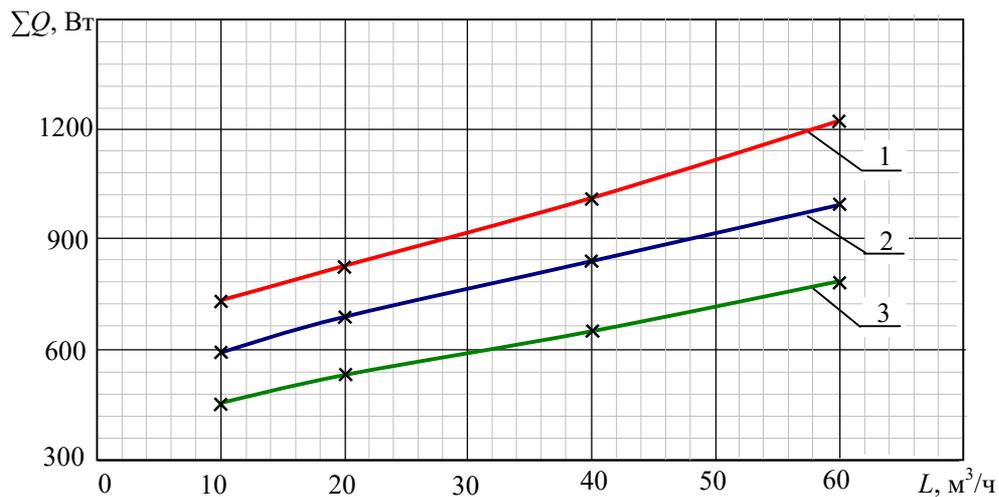


Рисунок 11 – Влияние регулирования воздухообмена на суммарные теплопотери помещения: 1 – температура наружного воздуха -30 °C; 2 – температура наружного воздуха -20 °C; 3 – температура наружного воздуха -10 °C

Анализ результатов моделирования распределения воздушных потоков в помещении показывает, что регулирование воздухообмена помещений за счет управления работой вентиляторов позволяет повысить среднюю температуру воздуха в помещении и снизить теплопотери за счет снижения затрат теплоты на подогрев приточного воздуха.

3. Результаты лабораторных и натурных исследований систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами

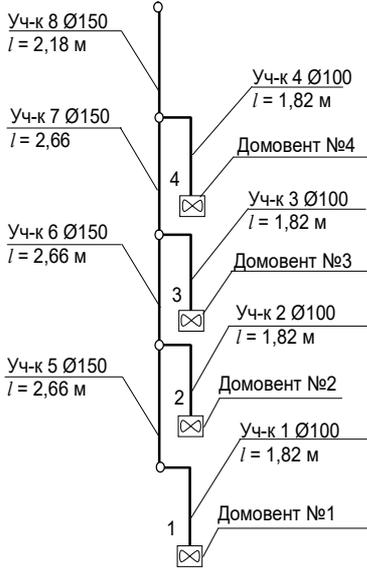
Оценка корректности разработанных методов расчета распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами выполнена посредством:

– сопоставления результатов расчетов контрольного примера вытяжного вентиляционного канала с вентиляторами, установленными на каналах-спутниках, выполненного графическим методом и расчетом по компьютерной программе на основе математического моделирования;

– сопоставления результатов теоретических расчетов с результатами лабораторных испытаний на стенде, моделирующем сборный вытяжной канал с каналами-спутниками, в которые встроены осевые вентиляторы.

Результаты испытаний в сопоставлении с результатами расчетов, выполненных при аппроксимации характеристик вентиляторов по формуле (2), приведены в таблице.

Сводная таблица результатов лабораторных испытаний вентиляционного канала с вентиляторами «Домовент 100», установленными в каналах-спутниках, в сопоставлении с результатами теоретических расчетов

Схема лабораторного стенда	Номер участка	Расход удаляемого воздуха, м ³ /ч			Невязка замеров и расчетов, %	
		по замерам	по расчету численным методом	по расчету графическим методом	численным методом	графическим методом
 <p>Уч-к 8 Ø150 l = 2,18 м</p> <p>Уч-к 7 Ø150 l = 2,66 м</p> <p>Уч-к 6 Ø150 l = 2,66 м</p> <p>Уч-к 5 Ø150 l = 2,66 м</p> <p>Уч-к 4 Ø100 l = 1,82 м</p> <p>Уч-к 3 Ø100 l = 1,82 м</p> <p>Уч-к 2 Ø100 l = 1,82 м</p> <p>Уч-к 1 Ø100 l = 1,82 м</p> <p>Домовент №4</p> <p>Домовент №3</p> <p>Домовент №2</p> <p>Домовент №1</p>	1	31,7	35,5	33,5	12,0	5,7
	2	37,8	37,2	41,8	1,6	10,6
	3	43,6	43,5	50,1	0,2	14,9
	4	61,3	60,2	66,7	1,8	8,8
	Всего	174,4	176,4	192,1	1,1	10,1
<p>Примечания:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Замеры расходов воздуха выполнены с помощью анемометра «testo 417-2». 2. Температура окружающего воздуха $t_b = 20 \pm 2$ °С. 3. Относительная влажность воздуха $\phi_b = 45 \pm 5$ %. 4. Проверочные расчеты проведены для вентиляционного канала аналогичных размеров, при аппроксимации зависимости «давление – расход воздуха» вентиляторов по формуле (2). 5. Суммарный расход воздуха по вентиляционному каналу определен сложением расходов воздуха (измеренных или рассчитанных) в каналах-спутниках. 						

Сопоставление результатов испытаний и расчетов показало достаточно хорошую сходимость результатов испытаний с теоретическими расчетами на основе математического моделирования для каналов второго, третьего и четвертого этажей – в пределах 1,8 %. Невязка для канала первого этажа – 12,0 % может быть обусловлена расхождениями в величине коэффициентов местных сопротивлений данного участка, принятых в расчете и фактических. При увеличении суммарных коэффициентов местных сопротивлений в первом канале-спутнике на 3, невязка на этом и других участках сети составляет не более 3 %.

Невязка результатов расчета на основе графического метода с результатами испытаний составляет $5,7 \div 14,9$ % – по отдельным участкам.

В целом, сопоставление результатов теоретических расчетов с результатами испытаний, позволяет сделать вывод о корректности разработанных теоретических методов и правомерности их применения для прогнозирования распределения воздуха в системах вентиляции многоквартирных зданий.

Натурные исследования проведены на двух объектах:

Объект № 1 – трехкомнатная квартира, расположенная на восьмом этаже шестнадцатизэтажного жилого дома (рисунок 12, а). Квартира состоит из кухни, трех жилых комнат, коридора, ванной, туалета и балкона. Приток воздуха предусмотрен с помощью стеновых вентиляционных клапанов СВК «В-75» и стеновых клапанов «КИВ 125», расположенных в жилых комнатах. Удаление воздуха предусмотрено через вытяжные вентиляционные каналы кухни, ванной и туалета. Система вытяжной вентиляции – с вертикальными сборными каналами.

Объект № 2 – двухкомнатная квартира, расположенная на девятом этаже девятиэтажного жилого дома (рисунок 12, б). Квартира состоит из кухни, двух жилых комнат, коридора, ванной, туалета и балкона. Приток воздуха предусмотрен с помощью подоконных стеновых вентиляционных клапанов СВК «В-75», расположенных в жилых комнатах. Удаление воздуха предусмотрено через отдельные вытяжные вентиляционные каналы кухни, ванной и туалета.

Внешний вид некоторых элементов систем вентиляции квартир приведен на рисунке 13.

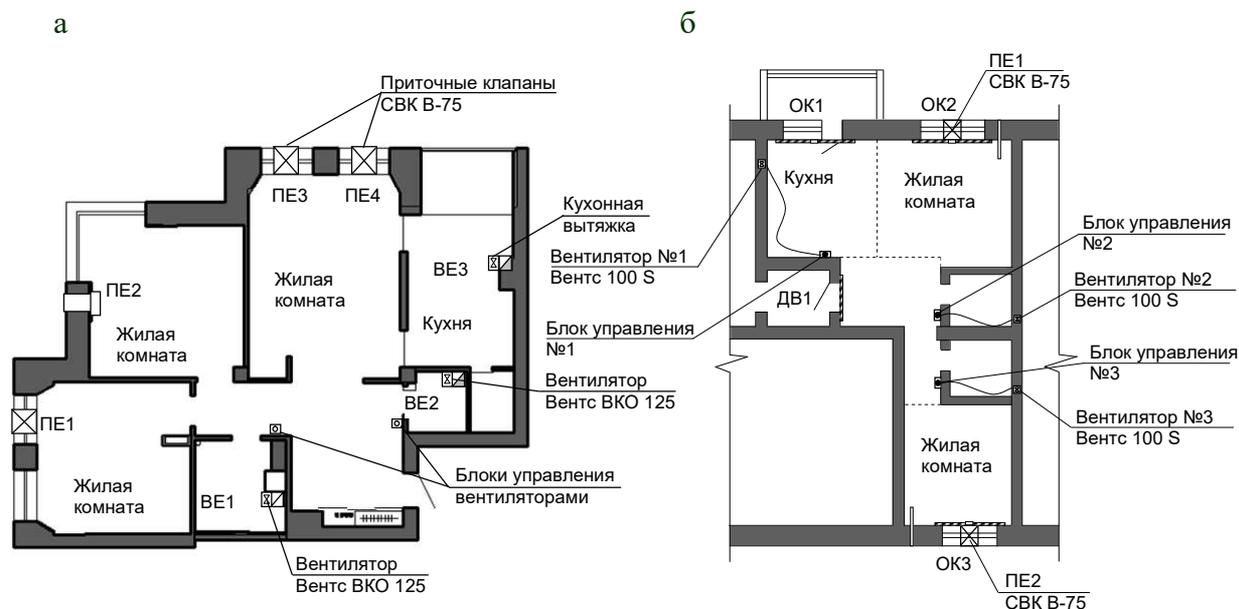


Рисунок 12 – Схематичные планы трехкомнатной (а) и двухкомнатной (б) квартир, в которых проведены натурные испытания систем вентиляции

Задачи натурных исследований:

- проверка режима работы систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами при различных режимах включения вытяжных вентиляторов и приточных устройств;
- оценка возможности опрокидывания направления движения воздуха в вытяжных каналах;

– оценка эффективности регулирования воздухообмена квартир за счет программируемого управления вытяжными вентиляторами.



Рисунок 13 – Внешний вид некоторых элементов систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами: а – приточный клапан; б – вытяжной вентилятор; в, г – программируемый блок управления

Результаты натурных исследований позволили сделать следующие выводы:

– производительность системы вентиляции квартиры может регулироваться на стадии эксплуатации за счет изменения режима работы вытяжных вентиляторов и изменения характеристик приточных вентиляционных устройств; регулирование вытяжных вентиляторов гораздо легче поддается автоматизации и позволяет регулировать воздухообмен в широких пределах без изменения характеристик (открытия – закрытия) приточных устройств;

– изменение проектных режимов работы вентиляторов (выключение отдельных вентиляторов, включение кухонной вытяжки и т. п.) может привести к разбалансировке системы и опрокидыванию направления движения воздуха в отдельных вентиляционных каналах квартиры;

– применение программируемых блоков управления вентиляторами позволяет изменять воздухообмен отдельных помещений и квартиры в целом с учетом эксплуатационных потребностей;

– установка на вытяжных каналах клапанов постоянного расхода воздуха в сочетании с обратными клапанами повышает устойчивость системы вентиляции с индивидуальными вытяжными вентиляторами и позволяет исключить опрокидывание вентиляционных каналов.

4. Технические решения, повышающие эффективность управления системами вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами

В качестве общих технических решений, повышающих эксплуатационную надежность и эффективность управления системами вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами принято применение:

- клапанов постоянного расхода воздуха, устанавливаемых в вентиляционных каналах для ограничения расхода удаляемого воздуха;
- обратных клапанов, предотвращающих опрокидывание направления движения воздуха;
- программируемых блоков управления, предназначенных для регулирования индивидуальных вытяжных вентиляторов с учетом режима эксплуатации помещений.

На основе анализа известных устройств, управляющих работой бытовых вентиляторов, питающихся от сети переменного тока, разработан блок управления, выполняющий следующие функции:

- плавное регулирование скорости вращения вентилятора (с целью изменения расхода воздуха и снижения шума вентилятора);
- программирование работы вентилятора на различных режимах по времени (позволяет изменять режим работы вентилятора в зависимости от требований потребителя на стадии эксплуатации);
- управление работой вентилятора по показаниям датчиков движения, углекислого газа, влажности и температуры;
- программирование работы вентилятора с помощью пульта дистанционного управления.

Изготовлена опытная серия образцов разработанного блока управления.

Общие выводы

1. Системы вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами в состоянии обеспечить требуемый воздухообмен жилых многоквартирных зданий, как в холодный, так и теплый периоды года.

Устойчивость и надежность работы данных систем в значительной мере зависят от ряда эксплуатационных факторов (открытие створок окон, включение-выключение вытяжных вентиляторов, изменение температуры наружного воздуха) и конструктивного решения (теплого или холодного чердака, взаимного расположения каналов, характеристик применяемых вентиляторов).

2. Разработанная математическая модель, основанная на известной теории гидравлических цепей, предусматривает численное описание воздушного режима зданий в виде системы нелинейных уравнений, представленных в виде полиномиальных зависимостей.

Предложенные формулы обеспечивают универсальность подхода к формированию нелинейных уравнений и аппроксимацию с заданной точностью аэродинамических характеристик всех элементов вентиляционной сети.

3. Решение систем нелинейных уравнений получено методом обобщенного приведенного градиента. Разработанный алгоритм и компьютерная программа на основе итерационных вычислений позволяет проводить расчеты различных систем вентиляции с учетом задаваемых характеристик сети и их изменения в процессе эксплуатации.

4. Оценка корректности разработанной математической модели и результатов ее реализации подтверждена лабораторными испытаниями на стенде и сопоставительными расчетами на основе графического метода.

5. Выявлены закономерности формирования воздушного режима зданий с различным конструктивным решением систем вентиляции.

Установлено, что для повышения эксплуатационной надежности и эффективности управления системами вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами целесообразно применение:

- клапанов постоянного расхода воздуха, устанавливаемых в вентиляционных каналах для ограничения расхода удаляемого воздуха;

- обратных клапанов, предотвращающих опрокидывание направления движения воздуха;

- программируемых блоков управления, предназначенных для регулирования скорости вращения индивидуальных вытяжных вентиляторов с учетом режима эксплуатации помещений.

6. По результатам моделирования распределения воздушных потоков в помещении установлено:

- тип и место расположения приточных устройств в значительной мере влияет на температурный режим помещений; наибольшее снижение температуры наблюдается в зоне расположения приточных устройств;

- одним из эффективных решений является размещение приточных клапанов непосредственно над отопительными приборами; в этом случае обеспечивается смешение приточного холодного воздуха с конвективными потоками от отопительного прибора;

- регулирование воздухообмена помещений с учетом режима эксплуатации позволяет повысить среднюю температуру воздуха в помещении и снизить теплотери за счет сокращения затрат теплоты на подогрев приточного воздуха.

8. Разработано специальное техническое устройство (блок управления), позволяющее программировать режим работы индивидуальных бытовых вентиляторов и регулировать скорость их вращения. Изготовлены опытные образцы программируемых блоков управления и проведена их апробация в условиях эксплуатируемых зданий.

9. Сопоставление результатов теоретических расчетов с результатами натурных исследований и лабораторных испытаний показало достаточно хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных и позволило сделать вывод о правомерности применения разработанных методов.

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кривошеин М.А. К вопросу о совместной работе вентиляторов в сети вытяжных каналов систем вентиляции жилых зданий / М. А. Кривошеин // Омский научный вестник. – 2014. – №2 (130). – С. 169–174 (0,75 п. л.).

2. Галдин В.Д., Кривошеин, М.А. Решение обратной задачи аэродинамического расчета систем вентиляции зданий через построение характеристики сети / В.Д. Галдин, М.А. Кривошеин // Вестник СибАДИ. – 2016. – №3 (49). – С. 57–63 (0,9 п. л.).

3. Кривошеин М.А. Прогнозирование работы систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с децентрализованным механическим удалением воздуха / М. А. Кривошеин // Вестник СибАДИ. – 2017. – №4–5(56–57). – С.116–126 (1,25 п. л.).

4. Кривошеин М.А. К вопросу о математическом моделировании распределения воздуха в системах вентиляции зданий / М. А. Кривошеин // Омский научный вестник. – 2017. – №5(155). – С.98–103 (0,75 п. л.).

Публикации в других изданиях:

5. Кривошеин М.А. Разработка контроллера для управления работой вентилятора / М.А. Кривошеин // Сборник докладов VI Региональной молодежной научно-технической конференции «Омский регион – месторождение возможностей». – Омск: ОГИС. – 2015. – С.143–146. (0,25 п. л.).

6. СТО СРО НП СПАС-05-2013. Энергосбережение в зданиях. Расчет и проектирование систем вентиляции жилых многоквартирных зданий. – Омск, 2014. – 76 с.

7. Галдин В.Д., Кривошеин М.А., Грушичев С.В. Вентиляторы и компрессоры. Электронный ресурс: учебное пособие. 2-е издание, derivative / В.Д. Галдин, М. А. Кривошеин, С.В. Грушичев // СибАДИ. – 2017.

Компьютерная верстка С. Н. Яблокова

Подписано к печати 27.03.2019. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 30.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

