

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
ГАЛДИН Владимир Дмитриевич

Санкт-Петербург – 2019 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. УСТРОЙСТВО И МЕТОДЫ РАСЧЕТА СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЗДАНИЙ.....	10
1.1. Системы вентиляции, применяемые в жилых многоквартирных зданиях	10
1.2. Нормативные документы в области вентиляции жилых многоквартирных зданий в России и западных странах	14
1.3. Системы вентиляции жилых многоквартирных зданий как средство повышения энергоэффективности	16
1.4. Методы расчета и прогнозирования работы систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.....	19
1.4.1. Общие положения.....	19
1.4.2. Графические методы расчета систем вентиляции зданий с вытяжными вентиляторами	20
1.4.3. Методы математического моделирования распределения потоков воздуха систем вентиляции зданий	22
1.5. Анализ некоторых результатов исследований распределения воздушных потоков в системах вентиляции многоквартирных зданий.....	24
Выводы по главе 1	27
2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЗДАНИЙ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ВЫТЯЖНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ	28
2.1. Физическая модель	28
2.2. Математическая модель	31
2.2.1. Основные положения	31
2.2.2. Усовершенствованная математическая модель	36
2.2.3 Решение задачи расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами на основе математического моделирования	40
2.3. Графический метод расчета совместной работы вентиляторов в сети воздуховодов ..	49
2.3.1. Общие положения.....	49
2.3.2. Решение обратной задачи аэродинамического расчета сети с одним вентилятором	49
2.3.3. Решение обратной задачи расчета совместной работы нескольких вентиляторов в аэродинамической сети.....	54
2.4. Оценка корректности разработанных методов	60

2.4.1. Общая постановка задачи	60
2.4.2. Сопоставление результатов теоретических расчетов с результатами лабораторных испытаний	62
Выводы по главе 2	64
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЗДАНИЙ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ВЫТЯЖНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ	65
3.1. Постановка задачи	65
3.2. Результаты расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с вертикальными сборными каналами и каналами-спутниками	66
3.3. Результаты расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с раздельными вертикальными каналами.....	68
3.4. Результаты расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с горизонтальными сборными каналами на чердаке	71
3.5. Результаты расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с теплыми чердаками.....	74
3.6. Оценка эффективности регулирования расхода воздуха в вытяжных каналах.....	77
Выводы по главе 3	81
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИТОКА ВОЗДУХА ...	83
4.1. Основные положения	83
4.2. Анализ методов расчета турбулентных течений, применяемых в CFD моделировании	84
4.2.1. Прямое численное моделирование (DNS).....	84
4.2.2. Метод моделирования крупных вихрей (LES)	85
4.2.3. Метод решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS)	85
4.3. Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении.....	87
4.3.1. Постановка задачи	87
4.3.2. Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении при открытии форточек	89
4.3.3. Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении при установке приточного клапана в створке оконного блока.....	92
4.3.4. Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении при установке стенового приточного клапана рядом с оконным блоком	97

4.3.5. Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении при установке стенового приточного клапана над отопительным прибором.....	103
4.3.6. Оценка влияния регулирования воздухообмена на температурный режим помещения и теплопотери помещения при различных температурах наружного воздуха.....	108
Выводы по главе 4	111
5. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЗДАНИЙ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ВЫТЯЖНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ И РЕГУЛИРУЕМЫМ ВОЗДУХООБМЕНОМ	112
5.1. Разработка устройства, управляющего работой индивидуального вытяжного вентилятора.....	112
5.2. Результаты натурных исследований систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.....	115
5.2.1. Цель и задачи натурных исследований	115
5.2.2. Результаты натурных исследований системы вентиляции трехкомнатной квартиры шестнадцатиэтажного жилого дома.....	116
5.2.2.1. Краткая характеристика объекта исследования.....	116
5.2.2.2. Краткая характеристика методики исследований	119
5.2.2.3. Результаты натурных исследований	120
5.2.3. Результаты натурных исследований системы вентиляции двухкомнатной квартиры девятиэтажного жилого дома.....	125
5.2.3.1. Общая характеристика объекта исследования.....	125
5.2.3.2. Краткая характеристика методики проведения исследований.....	126
5.2.3.3. Результаты натурных исследований	129
Выводы по главе 5	138
6. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	144
Приложение А. Результаты аэродинамических испытаний вентиляторов «Домовент 100».....	156
Приложение Б. Общая электрическая схема опытного образца блока управления вентилятором.....	157
Приложение В. Электрические схемы панели управления, блока питания и блока управления нагрузкой опытного образца блока управления вентилятором	158
Приложение Г. Внешний вид плат панели управления, блока питания и блока управления нагрузкой опытного образца блока управления вентилятором	159

Приложение Д. Основные характеристики опытного образца блока управления вентилятором	160
Приложение Е. Результаты аэродинамических испытаний вентиляторов при регулировании скорости их вращения с помощью опытного образца блока управления вентилятором	161
Приложение Ж. Справка об использовании результатов диссертационной работы	164

ВВЕДЕНИЕ

В структуре теплотерь современных зданий значительную долю занимают потери теплоты на подогрев приточного вентиляционного воздуха. В жилых многоквартирных зданиях доля затрат теплоты на вентиляцию может составлять до 60% от общих теплотерь [45, 55, 122–125, 140]. 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.

Нормативные и методические документы в области проектирования систем вентиляции жилых многоквартирных зданий указывают на целесообразность и необходимость применения систем вентиляции «...с устройствами, оптимизирующими работу вентиляционных систем на стадии их эксплуатации...» [94], а также применения механического побуждения движения воздуха [94, 110, 115].

Одним из технических решений, позволяющих реализовать регулируемый воздухообмен в зданиях, являются системы вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами (системы механической вытяжной вентиляции с индивидуальными вентиляторами в соответствии с [136]).

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, сочетания внешних климатических воздействий и др. В результате это приводит к несоответствию фактических расходов воздуха на отдельных участках вентиляционной сети проектным значениям, перетеканию воздуха между квартирами различных этажей, ухудшению работы системы вентиляции в целом.

Необходимость повышения надежности и эффективности управления систем механической вытяжной вентиляции с индивидуальными вентиляторами определяет актуальность данной работы.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической основой исследования послужили работы ряда отечественных и зарубежных ученых: П.Н. Каменева, В.Е. Константи-

новой, 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.М. Уляшевой, В.А. Пухкала, 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 потоков 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 натурный эксперимент.

Положения, выносимые на защиту:

– математическая модель, описывающая работу систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами;

– результаты теоретических исследований распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий;

– результаты лабораторных и натурных исследований систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами;

– технические решения, повышающие эффективность управления системами вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

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 математи-

ческого моделирования, графических и аналитических расчетов с результатами лабораторных и натуральных 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 «Теплогазоснабжения и вентиляции» 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 3,65 п.л., лично автором – 3,25 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.

1. УСТРОЙСТВО И МЕТОДЫ РАСЧЕТА СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЗДАНИЙ

1.1. Системы вентиляции, применяемые в жилых многоквартирных зданиях

Системы вентиляции, применяемые в жилых зданиях, можно условно подразделить по нескольким классификационным признакам:

- по способу побуждения движения воздуха (с естественным, с механическим побуждением и их комбинации);
- по организации воздухообмена (централизованные, децентрализованные, смешанные, с организованным или неорганизованным притоком воздуха);
- по конструктивным особенностям выполнения вытяжных вентиляционных каналов (с отдельными каналами, с вертикальными сборными каналами и каналами-спутниками, с горизонтальными сборными каналами);
- по наличию «теплого» или «холодного» чердака;
- по способу управления воздухообменом (с ручным или автоматическим регулированием, наличием датчиков параметров приточного или удаляемого воздуха, программирования изменения производительности с учетом режима эксплуатации помещений и т.п.);
- по наличию технических устройств утилизации теплоты удаляемого воздуха;
- по совмещению с системами отопления или кондиционирования воздуха и др.

Основные схемы систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с учетом возможных сочетаний их конструктивных элементов, способов побуждения движения воздуха, управления воздухообменом и пр., приведены в [94, 117].

Общая классификационная схема систем вентиляции жилых многоквартирных зданий представлена на рисунке 1.1. Аналогичные системы вентиляции жилых зданий применяются и в странах ЕС [133, 168].

Следует отметить, что при всем многообразии конструктивных решений систем вентиляции, подавляющее большинство жилых многоквартирных зданий в РФ «...в течение нескольких десятилетий проектировалось и строилось с естественным побуждением движения воздуха, при организованном удалении воздуха через вытяжные вентиляционные каналы и неорганизованным притоке через неплотности ограждающих конструкций, открывающиеся створки, форточки и фрамуги окон...» [54]. Такое решение в течение нескольких десятилетий предписывалось строительными нормами и правилами проектирования жилых зданий [103–107].

Системы вентиляции с механическим побуждением движения воздуха рассматривались либо как дополнительные – на верхних этажах зданий в виде индивидуальных вентиляторов,

встраиваемых в вентиляционные каналы верхних этажей, либо в виде экспериментальных объектов, и зачастую с отрицательным опытом эксплуатации [43].

Очевидные недостатки систем естественной вентиляции отмечались в большинстве исследований [43, 46, 54, 122, 123 и др.]. В качестве основных можно выделить:

- зависимость производительности от температуры наружного воздуха и скорости ветра;
- недостаточный воздухообмен, особенно на верхних этажах многоэтажных зданий;
- невозможность обеспечения требуемого воздухообмена в теплый период года без открытия окон;
- влияние воздухопроницаемости (негерметичности) стыков вентиляционных каналов, строительных конструкций;
- сложность регулирования воздухообмена;
- перетекание воздуха между квартирами.

Состояние дел в данной области начало меняться во второй половине 90-х годов. Этот период характеризуется началом внедрения в массовое жилищное строительство современных светопрозрачных конструкций – из ПВХ, клееной древесины, «теплого» или «холодного» алюминия с однокамерными или двухкамерными стеклопакетами, с двумя, а иногда и тремя контурами уплотнения притворов. Повышение герметичности светопрозрачных конструкций обусловило существенное сокращение воздухообмена помещений за счет инфильтрации, как следствие – повышение относительной влажности внутреннего воздуха, появление конденсата и плесени на ограждающих конструкциях, нарушение работы систем вентиляции в целом [20, 40, 55, 67, 122, 123].

Необходимо подчеркнуть, что возможность появления подобных проблем была описана еще в 1951 г. в работе И.Ф. Ливчака [67]: «... в зданиях... с вентиляцией при естественном побуждении герметизация окон с доведением их воздухопроницаемости до $6,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм вод.ст.})$ является вредной, ибо она исключает потребный вентиляционный воздухообмен в квартирах....».

Значимость и важность обеспечения требуемого воздухообмена в жилых зданиях, влияние параметров микроклимата на состояние человека отмечено в десятках научных и научно-популярных публикаций. В качестве примера можно привести цитату из статьи Ю.А. Табунщикова [123]: «...проблема энергосбережения при всей своей значимости не обладает тем угрожающим влиянием на качество жизни и здоровье людей, которое присуще проблеме качества микроклимата...».

Следует отметить, что проблемы с обеспечением воздухообмена в жилых зданиях характерны не только для РФ. В странах ЕС также имеют место аналогичные явления. Например, профессор М. Шмидт [91] пишет: «... только механическая вентиляция может решить проблему, но мы еще далеки от повсеместного применения таких систем в силу ряда проблем. Боюсь, мы получим ряд судебных дел в обозримом будущем. Люди отремонтировали свои дома и не имеют механической вентиляции. Затем они открывают свои окна для проветривания. В результате не достигаются установленные нормы по экономии энергии...» [91].

К недостаткам естественной вентиляции следует отнести еще и то, что она «...плохо согласуется с современными требованиями по энергосбережению...» [123]. При устройстве систем отопления с поквартирным вводом, установкой терморегуляторов на отопительных приборах, возможность экономии теплоты от системы отопления нивелируется необходимостью открывания створок и форточек окон для периодического проветривания.

Пути решения вышеперечисленных проблем известны:

- применение систем вентиляции с организованным (регулируемым) притоком воздуха;
- применение смешанных (гибридных) систем с механическим побуждением движения воздуха и естественным притоком через стеновые или оконные клапаны;
- применение систем с механическим притоком и удалением воздуха;
- применение систем вентиляции с утилизацией теплоты удаляемого воздуха.

В качестве одного из наиболее доступных конструктивных решений систем вентиляции современных жилых зданий можно выделить, так называемую, «гибридную» вентиляцию – с механической вытяжкой и децентрализованным естественным притоком воздуха через оконные или стеновые клапаны [14, 15, 53, 69, 74–78, 122, 123, 138 и др.]. В качестве примера можно привести «гигрорегулируемую» вентиляцию компании «Aereco» [14, 15].

Подобные системы предусматривают удаление воздуха посредством вытяжных вентиляторов, устанавливаемых на оголовках вентиляционных каналов, и приток воздуха через оконные клапаны [6, 14, 15, 138].

Другой вариант – системы вентиляции с индивидуальными вытяжными вентиляторами и естественным децентрализованным притоком через вентиляционные клапаны [94, 115].

Согласно обзорам различных исследователей, именно такие системы в настоящее время находят все большее применение и в странах ЕС. В частности, по данным [133, 168] на системы вентиляции со вспомогательными вентиляторами приходится более 50 % существующих систем вентиляции малоэтажных зданий. В Болгарии, Италии применение подобных систем вентиляции в жилых зданиях составляет практически 100%. В Финляндии ≈ 52 %, Франции $\approx 64,9$ %, Германии $\approx 81,2$ %, Греции ≈ 91 %.

Системы вентиляции жилых зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами имеют ряд достоинств по сравнению с другими системами, в частности:

- возможность индивидуального регулирования воздухообмена квартир за счет включения - выключения, или регулирования количества оборотов вентилятора;
- возможность обеспечения требуемого воздухообмена, как в теплый, так и в холодный периоды года;
- относительно низкая стоимость оборудования, монтажа и эксплуатации;
- возможность «встраивания» в системы вентиляции эксплуатируемых зданий с различными типами вентиляционных каналов.

К недостаткам систем можно отнести:

- дополнительные затраты электрической энергии;
- шум работающих вентиляторов;
- взаимное влияние вентиляторов, работающих на одну сеть;
- возможность опрокидывания системы вентиляции при выключении вытяжных вентиляторов и отсутствии обратных клапанов.

Следует отметить, что в большинстве жилых зданий, изначально запроектированных и построенных с естественным побуждением движения воздуха, на стадии эксплуатации в вентиляционные каналы устанавливаются осевые вентиляторы, подключаются кухонные вытяжки, и системы начинают работать как смешанные – частично с естественным, частично – с механическим побуждением. Как следствие – разрегулировка, перетекание воздуха между квартирами, опрокидывание направления движения воздуха в вентиляционных каналах в целом [20, 56]. Исследования распределения воздуха в подобных системах практически отсутствуют.

1.2. Нормативные документы в области вентиляции жилых многоквартирных зданий в России и западных странах

На сегодняшний день, последним утвержденным нормативным документом по отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха является [110].

Следует отметить, что согласно п. 7.1.3 [110] вентиляцию с механическим побуждением следует предусматривать «... если параметры микроклимата и качество воздуха не обеспечиваются вентиляцией с естественным побуждением в течение года...» [110]. И далее «...Механическую вентиляцию с частичным использованием систем естественной вентиляции для притока или удаления воздуха (далее – смешанную вентиляцию) следует предусматривать в периоды года, когда параметры микроклимата и качество воздуха не могут быть обеспечены естественной вентиляцией...» [110].

Отдельные требования к вентиляции жилых многоквартирных зданий приведены в СП [109]. К сожалению, при актуализации СНиП [108], в СП [109] были исключены вполне разумные требования по разделению воздухообмена на рабочий и нерабочий режимы. В частности, в таблице 9.1 [108] были представлены значения кратности или величины воздухообмена в нерабочем режиме и в режиме обслуживания. Предполагалось, что нет необходимости в обеспечении максимально требуемого воздухообмена при отсутствии в помещении людей. Таким образом, СНиП [108] создавал возможности для применения систем вентиляции с обеспечением воздухообмена по потребности и оптимизации работы систем вентиляции. В действующем СП [109] данные возможности не оговариваются.

Согласно СП [109] допускается применение в жилых зданиях как естественной, так и механической вентиляции, а также комбинированной (с естественным притоком и удалением воздуха и частичным использованием механического побуждения), что является допуском к применению систем механической вентиляции с индивидуальными вентиляторами.

Отдельным блоком следует выделить стандарты и технические рекомендации АВОК [94, 115, 116, 135, 136], в которых наряду с общими требованиями, оговаривается ряд технических решений, методик расчета, не прописанных в СНиП или СП, но актуальных при проектировании систем вентиляции жилых многоквартирных зданий. Многие требования, принятые ранее в стандартах АВОК, впоследствии включены в своды правил.

В США в 1925 году в американском обществе инженеров по отоплению и вентиляции ASHVE (на данный момент ASHRAE) был опубликован кодекс «Минимальных требований к отоплению и вентиляции зданий», который обновлялся по мере поступления новых данных. Последующие исследования в итоге привели к созданию стандарта ASHRAE Standard 55 для теплового комфорта и Стандарта 62 для вентиляции. Первый Стандарт ANSI/ASHRAE Standard 62-1973 включал требования «...по минимальному и рекомендуемому воздухообмену и стал основой большинства кодексов штатов США. Последняя редакция данного стандарта датируется 2016 годом...» [149].

Основной целью стандарта является определение минимальных величин требуемого расхода воздуха, обеспечивающих приемлемое качество воздуха в помещениях. На сегодняшний день, стандарт придерживается трех альтернативных подходов: «...методике определения кратности воздухообмена (VRP), качества воздуха в помещении (IAQP) и естественной вентиляции (NVP)...» [51].

Последняя редакция стандарта ASHRAE 55 по тепловому комфорту выпущена в 2013 г. [147]. «...Основными параметрами микроклимата в соответствии со стандартом являются: температура, тепловое излучение, влажность и скорость воздуха...» [51].

Разработкой стандартов в области вентиляции в ЕС занимается «...специальный технический комитет по стандартизации CEN/TC 156, который разработал нормативный документ CR 1752 [154] и стандарт EN 13779 [157], в котором регламентируются требования к системам кондиционирования и вентиляции...» [51]. В другом европейском стандарте EN 15251 [158] основными положениями являются показатели микроклимата помещений [51]. Характеристики систем вентиляции жилых зданий рассматриваются в стандарте CEN/TR 14788.

В стандартах ASHRAE и EN требуемый расход приточного воздуха определяется исходя из количества находящихся в помещении людей и площади пола. «...Отличие в подходах европейских и американских стандартов заключается в определении минимально требуемого расхода воздуха для адаптированных (ASHRAE) или для неадаптированных людей (EN)...» [51]. Под адаптированными людьми понимается то, что люди привыкают к качеству воздуха на протяжении, как минимум 15 минут [51, 169]. Поэтому требования ASHRAE, как правило, оказываются значительно ниже EN.

1.3. Системы вентиляции жилых многоквартирных зданий как средство повышения энергоэффективности

На сегодняшний день, требования, предъявляемые к вентиляции, неразрывно связаны с энергосбережением зданий. В европейских странах необходимость энергосбережения была вызвана энергетическим кризисом 1970-х годов. В результате во многих странах были разработаны нормативные документы, направленные на снижение энергопотребления зданий [19]. Поэтому основные тенденции развития систем вентиляции связаны с потребностью в экономии тепловой энергии. Все большее применение получают тепловые насосы, системы вентиляции с утилизацией теплоты, адаптивные системы с переменным расходом воздуха, индикацией по датчикам присутствия или концентрации углекислого газа (CO₂) и др.

Основные тенденции на рынке систем «...ОВК Европейского союза тесно связаны с требованиями Директивы по энергетической эффективности 2012 г. и Директивы по увеличению доли использования возобновляемых источников энергии 2009 г. Основная цель этих документов – подвигнуть рынок к строительству зданий с нулевым потреблением невозобновляемой энергии...» [81].

В России различным аспектам энергосбережения в жилых зданиях посвящено большое количество исследований, среди которых можно выделить работы Ю.А. Табунщикова, И.Ф. Ливчака, В.И. Ливчака, А. Л. Наумова, Ю.А. Матросова, В.Г. Гагарина, А.С. Горшкова и многих других ученых [66, 82–84, 119–128].

Интерес к системам вентиляции как средству повышения энергоэффективности зданий обусловлен значительной долей в структуре их теплоснабжения затрат 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% [45, 55, 122–125, 140].

Как отмечается в статье Ю.А. Табунщикова по этому поводу [122]: «...современные здания обладают высокими показателями теплозащиты, и в дальнейшем эти показатели планируются еще более увеличить. В балансе теплотерь доля затрат тепловой энергии на подогрев вентиляционного воздуха (теплотери за счет воздухообмена) будет еще более увеличиваться по сравнению с теплотерями через оболочку здания... Напрашивается заключение о том, что поиски путей снижения расхода энергии, затрачиваемой на отопление здания, должны вестись в направлении уменьшения расхода тепловой энергии на подогрев вентиляционного воздуха...».

В качестве таких решений называются [122]:

«...устранение сверхнормативных расходов вентиляционного воздуха (избыточного проветривания); регулирование вентиляции «по потребности»; утилизация теплоты удаляемого воздуха; предварительный подогрев приточного воздуха в остекленных лоджиях или солнечных коллекторах; применение «персональной» вентиляции (в общественных зданиях); применение гибридной вентиляции...».

Следует отметить, что еще в ТР АВОК-4-2004 отмечалось [135]: «...Устройство регулируемой вентиляции с естественным притоком через специальные приточные устройства-клапаны, обеспечивающей нормативный воздухообмен и снижающей проникающий шум в квартирах до уровня нормативных требований, и с механической вытяжной или механической приточно-вытяжной вентиляцией, в том числе с утилизацией теплоты вытяжного воздуха, позволяет нормализовать воздушно-тепловой режим квартир, обеспечить требуемый воздухообмен, снизить затраты тепла на 10–15%, а в случае использования утилизации – на 20–25% ...».

Анализ изменения требуемого воздухообмена квартиры с учетом режима ее эксплуатации, приведенный в работе [55], показывает, что регулирование воздухообмена с учетом «потребности» может существенно снизить среднюю кратность, причем без ухудшения качества воздуха и нарушения требований санитарных норм. Необходимы лишь технические решения, обеспечивающие соответствующую глубину регулирования и точность управления работой приточной и вытяжной систем.

Согласно [69] «...возможность индивидуального регулирования воздухообмена в зависимости от режима эксплуатации квартиры может давать экономию порядка 20–30% тепловой энергии на вентиляцию...».

Бесспорно, что для реализации принципа регулирования воздухообмена «по потребности» необходимо применение соответствующих систем вентиляции с механическим побуждением и автоматическим регулированием.

В работе [45] по этому поводу указано «...В настоящее время уже многие проектировщики предусматривают в проектах вентиляторы для «перехвата» вытяжки хотя бы на теплый период года (так называемая гибридная вентиляция). Процесс внедрения систем вентиляции с механическим побуждением сдвинулся с мертвой точки и одной из предпосылок к этому стало принятие Постановления № 900-ПП от 05.10.2010 г. Согласно Городской программе «Энергосберегающее домостроение в городе Москве на 2010–2014 гг. и на перспективу до 2020 года», ожидаемая энергетическая эффективность автоматического регулирования вентиляции для обеспечения нормативного воздухообмена в здании составляет 10%, регулирования вытяжной вентиляции в зависимости от гравитационной составляющей – 10–15% ...» [45].

Ряд нормативных и методических документов прямо указывает на необходимость реализации систем вентиляции с устройствами, оптимизирующими работу вентиляционных систем на стадии их эксплуатации [94, 110, 115], применение механического побуждения движения воздуха.

В качестве технических решений, обеспечивающих возможность индивидуального регулирования величины воздухообмена, рекомендуется [94] «...применять регулируемые приточные и вытяжные устройства, работающие в том числе по контролю влажности воздуха в помещении. Допускается предусматривать возможность интенсификации воздухообмена в периоды использования помещений санитарных узлов и кухонь, устанавливая бытовые вытяжные вентиляторы в данных помещениях. Вентиляторы централизованных систем механической вентиляции должны иметь регулируемый привод и обеспечивать возможность изменения воздухообмена по потребности, создавая расчетный перепад давлений на самом удаленном регулируемом устройстве. Минимальный воздухообмен в квартире должен быть не менее 25 % от расчетного и не менее санитарной нормы вытяжки из санитарных узлов и кухонь...».

Таким образом, и нормативные и методические документы в области проектирования систем вентиляции указывают на целесообразность и необходимость применения систем вентиляции с регулируемым воздухообменом и механическим побуждением движения воздуха.

В соответствии с [94] «...энергетическая эффективность систем вентиляции обеспечивается сокращением величины воздухообмена в зависимости от интенсивности эксплуатации отдельных помещений и квартиры в целом, использованием теплоты удаляемого воздуха для подогрева приточного (в системах механической приточно-вытяжной вентиляции)...».

Системы вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами могут позволить реализовать эти подходы, как в новом строительстве, так и при

реконструкции, капитальном ремонте зданий без серьезного вмешательства в их конструктивное решение.

1.4. Методы расчета и прогнозирования работы систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами

1.4.1. Общие положения

Основной задачей аэродинамического расчета систем вентиляции зданий при их проектировании является подбор сечений воздуховодов (вентканалов) и устанавливаемых вентиляторов, обеспечивающих требуемые воздухообмены помещений при расчетных параметрах наружного и внутреннего воздуха. Такую задачу принято называть «прямой». Исходными данными для аэродинамического расчета «прямых» задач являются величины расхода, удаляемого либо приточного воздуха для каждого помещения и схема системы вентиляции. По требуемым расходам производится подбор сечений воздуховодов, определяются суммарные потери давления в сети, проводится подбор вентиляторов с известными характеристиками. Порядок и примеры расчета подобных задач широко известны и детально рассмотрены в ряде работ [7, 111–113, 134].

Задачи, в которых исходными данными являются сечения воздуховодов и характеристики вентиляторов, а неизвестными являются величины расходов воздуха на отдельных участках сети, называют «обратными» задачами аэродинамического расчета или задачами о потокораспределении.

Решение этих задач применяется для целей прогнозирования эксплуатационного состояния работы системы вентиляции при условиях, отличающихся от проектных. В частности, при регулировании (изменении) сечений воздуховодов, изменении параметров наружного или внутреннего воздуха, изменении характеристик вентиляторов и др.

Решение «обратных» задач, анализ полученных результатов применительно к жилым многоквартирным зданиям и являются, по сути, предметом исследований данной диссертационной работы.

Существует несколько известных методов решения «обратных» задач:

- способ эквивалентных отверстий (или сопел) Блесса, который заключается в условной замене участков системы эквивалентными по потере давления отверстиями [7, 13, 48];
- способ перемещения единицы объема, предложенный П.Н. Каменевым [7, 13, 48];
- способ характеристик, предложенный С.Е. Бутаковым [13], который впоследствии был развит Н.Н. Разумовым и сведен к графоаналитическому расчету [95];

- графические методы;
- решение методами математического моделирования.

Несмотря на многообразие представленных методов, большинство из них уже не используется на практике. На сегодняшний день, основными методами являются методы математического моделирования, однако в некоторых случаях применяются графические методы.

1.4.2. Графические методы расчета систем вентиляции зданий с вытяжными вентиляторами

Графические методы аэродинамического расчета воздухопроводов с учетом совместной работы вентиляторов известны и представлены в ряде работ [7, 13, 17, 38, 41, 46, 48, 89, 95].

Общий принцип решения задач данным методом заключается в построении характеристики сети и суммарной (или результирующей) характеристики вентиляторов. Решение задачи находится в виде точки пересечения данных характеристик.

В системах вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами, как правило, на одну сеть работает несколько вентиляторов. Такую работу принято считать параллельной работой вентиляторов.

При параллельной работе суммарная характеристика получается путем сложения расходов воздуха при одинаковой величине давлений вентиляторов. На рисунке 1.2 представлено определение режимов работы трех вентиляторов при параллельной работе согласно [89].

При совместной работе вентиляторов на сеть, рабочая точка находится в результате пересечения характеристики сети с суммарной характеристикой вентиляторов (рисунок 1.2, точка А). Характеристикой сети в этом случае является характеристика последнего участка. Режим работы каждого вентилятора определяется проведением через рабочую точку линий постоянных давлений. Для более точных расчетов, необходимо учитывать потери давления на участках, индивидуально преодолеваемых вентиляторами [17, 18].

Проблемой при решении задач с использованием данных методов является то, что для определения коэффициентов местных сопротивлений в точках смешения и разделения потоков с достаточно высокой точностью, необходимо задаваться расходами воздуха на них. В свою очередь, расходы воздуха на ответвлениях являются искомыми величинами. Численные примеры решения данных задач в большинстве работ либо отсутствуют [41, 89, 139], либо суммарные потери давления на участках изначально заданы [17, 18], что значительно упрощает задачу расчета.

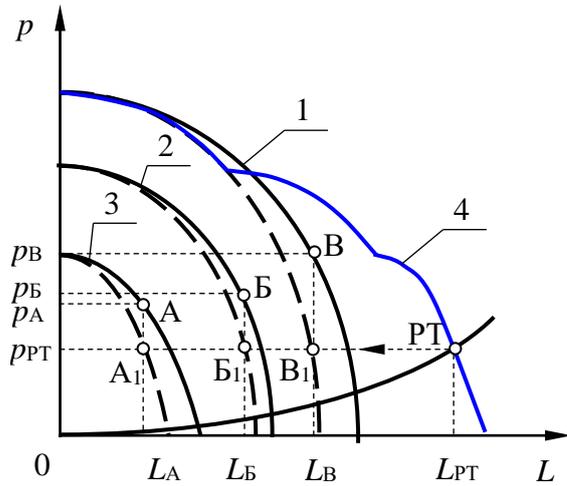


Рисунок 1.2 – Определение режимов работы трех параллельно подключенных вентиляторов: 1, 2, 3 – аэродинамические характеристики вентиляторов; 4 – суммарная характеристика вентиляторов; А, Б, В – режим работы каждого вентилятора; РТ – рабочая точка

Возможны ситуации совместной работы вентиляторов, при которых один вентилятор «опрокидывает» движение воздуха в другом вентиляторе (рисунок 1.3). В результате воздух во втором вентиляторе начинает двигаться в противоположном направлении. Это происходит в том случае, когда потери давления совместно преодолеваемого участка будут выше максимально создаваемого давления «опрокинутого» вентилятора. В результате воздух, удаляемый из помещения вторым, более мощным вентилятором, начнет поступать в помещение, где расположен первый, менее мощный («опрокинутый») вентилятор.

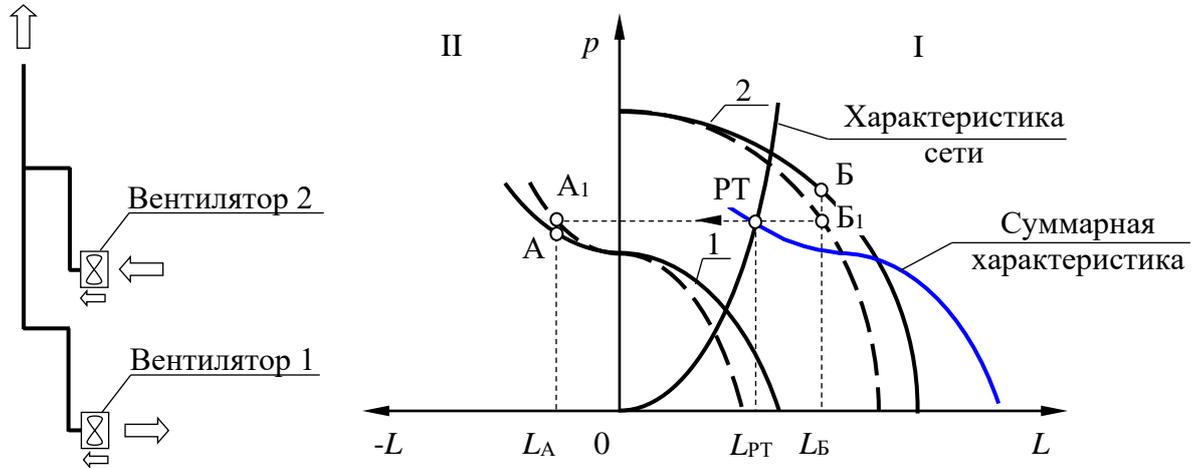


Рисунок 1.3 – Случай «опрокидывания» движения воздуха в одном из вентиляторов: 1, 2 – аэродинамические характеристики вентиляторов; А, Б – режим работы каждого вентилятора; РТ – рабочая точка

Следует отметить, что в известных работах [17, 18, 41, 89, 139] аэродинамическая сеть, на которую работает вентилятор, представляет собой, как правило, линейный участок сети, не имеющий ответвлений, что значительно упрощает задачу. Реальные системы вентиляции характеризуются разветвленной системой каналов (воздуховодов), к которым может быть подключено несколько вентиляторов с различными характеристиками. При расчете данных систем

необходимо учитывать ряд факторов: тепловые и ветровые перепады давлений, сопротивление на притоке, выключение промежуточных вентиляторов, взаимное влияние нескольких вытяжных каналов в пределах одной квартиры и др. Учесть данные факторы при графическом решении достаточно сложно, а в ряде случаев практически невозможно, что является недостатком графических методов расчета и требует решения методами математического моделирования.

1.4.3. Методы математического моделирования распределения потоков воздуха систем вентиляции зданий

Начало применения методов математического моделирования для расчетов воздухообмена многоэтажных зданий в нашей стране можно отнести концу 1950-х – началу 1960-х годов [46, 48].

В 1959 г. в НИИ санитарной техники был собран стенд гидравлической аналогии [48], с помощью которого проводились исследования распределения воздушных потоков методом гидравлической аналогии. Далее появилась установка ЭМВС-6, производящая расчеты методом электрической аналогии [46].

В 1961 г. в Сибирском энергетическом институте (на данный момент ИСЭМ СО РАН) А.П. Меренковым и В.Е. Хасилевым была разработана теория гидравлических цепей, формулирующая общие принципы математического моделирования трубопроводных и других гидравлических систем с применением электронно-вычислительных машин [80]. Теория объединяет гидравлический и аэродинамический расчеты инженерных систем, в связи с топологической схожестью расчетных схем и общим законам течения и сохранения массы, и энергии. В 1965 г. выполнен расчет воздухообмена многоэтажных зданий на электронно-вычислительной машине БЭСМ-2М [46]. Методика расчета отопительно-вентиляционных систем по данному методу с примерами приведена в работе Э.Я. Гинзбурга [23].

Таким образом, расчеты воздухообмена в многоэтажных зданиях методами гидро- и электроанalogии проводились в НИИ санитарной техники В.Е. Константиновой [46–49], а расчеты с использованием ЭВМ – в Сибирском энергетическом институте [98, 99]. В 1967 г. Была выполнена совместная работа [50] по исследованию воздухообмена в 26-ти этажном жилом здании, в которой расчеты произведены как с помощью электромоделирующего устройства ЭМВС-6, так и электронной вычислительной машины БЭСМ-2М.

Ряд положений по расчету воздушного режима жилых и общественных зданий повышенной этажности изложен в работе М.А. Латышенкова [65]. Методика расчета воздушного режима с учетом фактических показателей воздухопроницаемости ограждающих конструкций рас-

смотрена в работе М.М. Грудзинского, написанной совместно с В.И. Ливчаком и М.Я. Позом [24].

По мере развития электронно-вычислительной техники, открываются новые возможности прогнозирования распределения воздуха в системах вентиляции зданий, уточняются и детализируются положения теории математического моделирования.

Совершенствуется методика расчета на ЭВМ, в том числе с учетом «отрицательных» потерь давления в ответвлениях тройников – в ряде работ Е.Х. Китайцевой [42, 44], проводятся исследования воздушного режима систем вентиляции жилых многоквартирных зданий Е.Г. Малявиной, совместно с Е.Х. Китайцевой [43], С.В. Бирюковым и С.Н. Диановым [37, 76-79]. Уточняется и детализируется ряд вопросов компьютерного моделирования воздушного режима зданий [4, 5].

С использованием различных программных продуктов, основанных на методах математического моделирования, проводятся исследования ряда аспектов воздухораспределения в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий в работах О.Д. Самарина [97], А.Д. Кривошеина [53, 56], И.В. Андреева [1, 53], Г.Я. Волова [20], М.В. Бодрова [8-11], В.Ю. Кузина [8-11, 61, 62], Е.И. Тертичника, К.М. Агахановой [130, 131] и др.

Среди зарубежных исследователей, использующих данные методы, можно выделить работы D. Etheridge [159, 160], M. Cook [164], G.R. Hunt [143–145], M. Economidou [155], O. Connick [152], A. Acred [143–146], S. J. Emmerich, S. W. Dols [156] и др.

С целью моделирования процессов вентиляции в зданиях применяются программные комплексы (Ansys, Star CD, Phoenix и др.), основанные на методах вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics). Методика и некоторые результаты исследований систем вентиляции, выполненных методами CFD моделирования, представлены в работах J.H. Ferziger, M. Peric [161], R. W. Fox [162], D. Etheridge [160], M. Cook [153, 165], G.R. Hunt [165] и др.

Среди отечественных исследований вентиляционных процессов с использованием методов вычислительной гидродинамики можно выделить работы Т.А. Дацюк, В.Р. Таурита, В.Ф. Васильева, В.А. Пухкала, Г.М. Позина, В.М. Уляшевой и др. [28-33, 52, 88, 137].

Расчет систем вентиляции многоэтажных зданий методами CFD включает разработку 3-D модели, разбиение расчетной сетки, выбор модели турбулентности и др. Сложностью моделирования воздухораспределения в здании является необходимость ввода в расчет целого здания для правильного учета тепловых и ветровых перепадов давлений, что значительно увеличивает количество элементов при разбиении сетки [160]. Для систем вентиляции с индивидуальными вытяжными вентиляторами задача значительно усложняется необходимостью включения в расчет вытяжных вентиляторов. На сегодняшний день, расчет систем механической вытяжной вен-

тиляции с индивидуальными вентиляторами методами CFD моделирования для многоэтажных зданий потребует большого количества элементов при разбиении сетки, может превысить допустимую память компьютера или приведет к недопустимо длительному времени обработки. В связи с этим использование программных комплексов CFD моделирования более предпочтительно для моделирования процессов вентиляции в небольших малоэтажных зданиях либо в отдельных помещениях.

Для моделирования распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий представляется более предпочтительным использование компьютерных программ, основанных на теории гидравлических цепей.

1.5. Анализ некоторых результатов исследований распределения воздушных потоков в системах вентиляции многоквартирных зданий

Известно достаточно большое количество исследований распределения воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий [43, 44, 46–50, 53, 56, 76–79, 99].

К одним из первых следует отнести работы Е.В. Константиновой [46, 49], К.С. Светлова [50, 99]. Ряд выводов, сделанных более 50 лет тому назад, применительно к системам вентиляции многоэтажных зданий, остается актуальным и в настоящее время. В частности, рекомендации по устройству лестничных клеток в зданиях различной этажности, необходимость установки дросселирующих устройств (решеток переменного сечения) в вытяжных отверстиях нижних этажей (для выравнивания расходов удаляемого воздуха из квартир разных этажей), общий принцип проектирования систем вентиляции со сборными каналами (максимально возможное уменьшение сопротивлений магистрального канала и сборных шахт, при максимально возможном увеличении сопротивления ответвлений), опасность перетекания воздуха из квартир нижних этажей в квартиры верхних этажей в системах с механическим удалением воздуха при выключении вентилятора (своего рода прототип современных гибридных систем) и др. [46, 99].

Некоторые из отмеченных закономерностей забыты, но в последние годы вновь становятся востребованными. В качестве примера можно привести рекомендации по выполнению сборных вертикальных каналов [46]: «...Для равномерной и устойчивой работы вытяжных систем ... сопротивления тройников как на проход, так и на ответвления должны нарастать сверху вниз, то есть сопротивления тройников в вытяжных каналах верхних этажей должны быть значительно меньше сопротивлений тройников в вытяжных каналах нижних этажей...».

Для децентрализованных систем вытяжной вентиляции: «...При объединении каналов в общую систему одновременное включение нескольких вентиляторов может создать условия для опрокидывания тяги в других вытяжных отверстиях, в связи с чем при таком выполнении

систем допустимое количество работающих вентиляторов следует определять специальным расчетом...» [46].

В более поздних работах Э.Я. Гинзбурга [23], Е.Х. Китайцевой [43, 44] рассмотрены различные аспекты распределения воздуха в системах вентиляции жилых зданий при оптимизации их конструктивного решения, влияния герметизации стыков, исполнения и различных характеристиках вентиляционного оборудования, обобщенные критериальные показатели факторов, определяющих воздушный режим здания и др. [44].

В работе [43] на примере одиннадцатизэтажного здания рассмотрены закономерности распределения воздушных потоков в системах естественной вентиляции при нормативном сопротивлении светопрозрачных конструкций и открытых форточках. Показано, что при закрытых окнах нормы воздухообмена не выполняются даже при температуре наружного воздуха -26°C и лобовом ветре 4 м/с на один из фасадов. При открытии форточек воздухообмен существенно превышает требуемые значения. Причем на заветренной стороне (боковой фасад) возможна работа форточек на вытяжку. Вывод – современные нормы воздухопроницания окон заставляют задуматься о специальных мероприятиях по обеспечению притока наружного воздуха в квартиры [43].

Закономерности распределения воздуха в системах вентиляции высотных зданий с организованным притоком воздуха рассмотрены в ряде работ Е.Г. Малявиной, С.В. Бирюкова, С.Н. Дианова [76–78]. На основе анализа результатов расчетов конкретного здания отмечены некоторые закономерности и сделан ряд выводов:

«...системы естественного притока и вытяжки не обеспечивают расчетного воздухообмена квартир в расчетном вентиляционном режиме]; вытяжные устройства всех рассмотренных систем должны иметь ограничители расхода как на случай повышения естественного давления вследствие понижения температуры наружного воздуха или увеличения скорости ветра, так и на случай увеличения разрежения за вентиляционной решеткой при закрытии вентиляционных решеток в других квартирах на том же стояке вентиляции; системы механического притока также должны быть регулируемы и иметь ограничители расхода; общие вытяжные вентиляторы на стволах вытяжных систем должны иметь возможность регулирования; механические системы вытяжной вентиляции с притоком через клапаны могут применяться в случае обеспечения в расчетном вентиляционном режиме достаточной пропускной способности клапанов, например, за счет установки двух клапанов на комнату; в любом случае приточные клапаны должны быть оснащены ограничителями расхода для контроля за расходом воздуха при понижении температуры наружного воздуха или увеличении скорости ветра...» [76, 77].

Результаты исследований процессов распределения воздуха в гибридных системах вентиляции жилых зданий представлены в работе [53]. На основании математического моделирова-

ния нескольких вариантов систем вентиляции с централизованным механическим удалением воздуха сделаны следующие выводы:

– при отсутствии регулирования распределение перепадов давлений (и соответственно расходов воздуха) происходит пропорционально аэродинамическим сопротивлениям участков сети; для выравнивания расходов по высоте здания необходима пуско-наладочная регулировка каналов-спутников, например, посредством регулируемых вытяжных решеток;

– открытие створок окна на стадии эксплуатации может приводить к изменению распределения давлений и расходов воздуха по всей сети; устранение разбалансировки возможно за счет частотного регулирования вытяжного вентилятора;

– при выполнении системы с двумя и более вытяжными вентиляторами возможна разбалансировка систем при изменении производительности одного из вентиляторов, вплоть до опрокидывания одной из систем и перетекания воздуха между отдельными квартирами;

– в гибридных системах с теплыми чердаками значительное влияние на производительность системы оказывает герметичность теплого чердака [53].

Из работ последних лет в данной области можно отметить исследования М.В. Бодрова, В.Ю. Кузина [8-11, 61, 62], Е.И. Тертичника, К.М. Агахановой [130, 131], Г.Я. Волова [20], G.R. Hunt [143–145], O. Connick [152], A. Acred [143–146].

Рассматривая нарушение работы систем вентиляции с механическим побуждением движения воздуха, Г.Я. Волов, делает вывод о возможности нескольких устойчивых состояний систем вентиляции зданий [20]: «...при одних и тех же граничных условиях (габариты здания, степень открытости окон и дверей, наружных температурах и ветре и т.д.) система может иметь не только одно, но и два устойчивых состояния с «нормальной» (т.е. не «опрокинутой») или опрокинутой циркуляцией...».

Подводя итог краткому обзору, можно констатировать, что при всей актуальности и широкому применению в эксплуатируемых зданиях систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами, детальных исследований закономерностей распределения потоков воздуха в подобных системах, анализа условий обеспечения их устойчивой работы, за исключением работы Г.Я. Волова [20] не проводились.

Выводы по главе 1

1. Анализ результатов исследований и технических решений систем вентиляции жилых зданий показывает, что обеспечение требуемого воздухообмена в подавляющем большинстве современных жилых многоквартирных зданий требует применения систем с механическим побуждением движения воздуха. Подобные системы находят все более широкое применение, как в отечественной, так и зарубежной практике.

Ряд нормативных и методических документов указывает на необходимость применения механического побуждения движения воздуха и реализации систем вентиляции с устройствами, позволяющими регулировать воздухообмен помещений на стадии их эксплуатации.

2. Системы вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами (по терминологии АВОК - системы механической вытяжной вентиляции с индивидуальными вентиляторами) являются одним из вариантов подобных систем, позволяют регулировать воздухообмен различных квартир с учетом режима их эксплуатации и могут быть реализованы, как при новом строительстве, так и в эксплуатируемых зданиях с различными типами вытяжных вентиляционных каналов.

3. Управление и регулирование воздухообменом зданий с учетом их потребностей в сочетании с регулируемыми системами отопления открывает значительные резервы для экономии тепловой энергии.

Однако эффективность работы подобных систем в значительной мере зависит от характеристик применяемого оборудования, взаимной увязки отдельных вентиляционных элементов между собой, обеспечения возможности регулирования их работы в широких пределах и др.

4. Для обеспечения устойчивой и надежной работы систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами необходимо исследование закономерностей распределения воздуха в сети вытяжных вентиляционных каналов с учетом особенностей конструктивного решения, их взаимного влияния, внешних климатических воздействий и др.

5. Обзор существующих методов расчета и прогнозирования показывает, что исследование воздухообмена в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий наиболее эффективно методами математического моделирования, основанными на теории гидравлических цепей.

Моделирование вентиляционных процессов в отдельных помещениях может быть реализовано с помощью программных комплексов, основанных на методах вычислительной гидродинамики CFD (Computational Fluid Dynamics).

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЗДАНИЙ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ВЫТЯЖНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ

2.1. Физическая модель

Система вентиляции жилого многоквартирного здания с индивидуальными вытяжными вентиляторами включает сеть вытяжных вентиляционных каналов, в которые встроены индивидуальные вентиляторы с известными характеристиками, приточные вентиляционные устройства, предназначенные для регулируемого притока воздуха, ограждающие конструкции (окна, двери, наружные и внутренние стены) с определенной воздухопроницаемостью.

Воздухообмен помещений (квартир) осуществляется в результате притока воздуха через приточные клапаны и неплотности ограждающих конструкций, удаление воздуха – через вытяжные вентиляционные каналы.

Принципиальная схема системы вентиляции, характеризующая общую постановку задачи, представлена на рисунке 2.1.

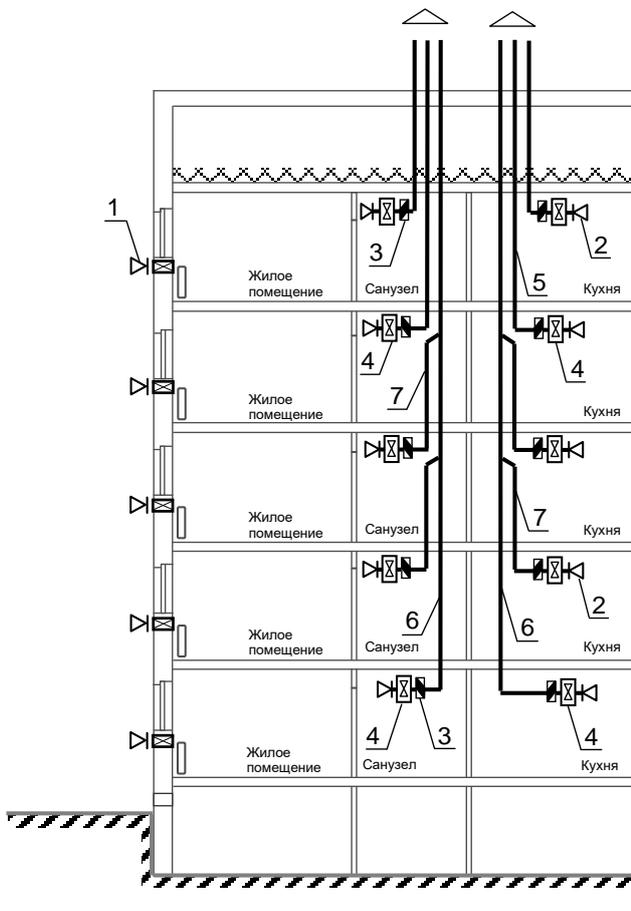


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема системы вентиляции жилого многоквартирного здания с индивидуальными вытяжными вентиляторами: 1 – приточное вентиляционное устройство (оконный или стеновой вентиляционный клапан с регулируемым открыванием); 2 – вытяжная вентиляционная решетка; 3 – обратный клапан; 4 – вытяжной вентилятор; 5 – вертикальный вентиляционный канал; 6 – сборный вентиляционный канал; 7 – канал-спутник

В зависимости от взаимного расположения вентиляционных каналов, их объединения и сообщения с окружающей средой, системы вентиляции могут выполняться:

- с отдельными вентиляционными каналами;
- с вертикальным сборным каналом и каналами-спутниками, присоединяемыми к сборному каналу через этаж (как правило) или через два и более этажей;
- с горизонтальными сборными каналами;
- с холодным чердаком;
- с теплым чердаком.

В зданиях повышенной этажности вытяжные вентиляционные каналы могут разбиваться по зонам, с объединением вентканалов по ряду этажей.

Принципиальные схемы основных вариантов систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами приведены на рисунке 2.2.

Следует отметить, что в жилых многоквартирных зданиях в пределах квартиры, как правило, располагаются два или три вытяжных канала (кухня, санузел, кладовая или гостевой санузел).

Основной особенностью данных систем вентиляции является установка на входе в вытяжные вентиляционные каналы индивидуальных вентиляторов.

Перемещение воздуха в здании через ограждающие конструкции и вентиляционные элементы происходит вследствие тепловых (гравитационных), ветровых перепадов давлений, и давлений, создаваемых вытяжными вентиляторами.

В процессе эксплуатации на здание и его систему вентиляции оказывают воздействие ряд внешних и внутренних факторов. В частности:

- температура наружного воздуха и скорость ветра (внешние факторы);
- включение или выключение отдельных вытяжных вентиляторов, регулирование (открытие – закрытие) приточных клапанов, открытие створок оконных блоков, входных дверей и т.п. (внутренние факторы).

К внутренним факторам можно отнести изменение характеристик вытяжных вентиляторов при их замене в процессе эксплуатации здания, например, подключении к вытяжным каналам кухонных вытяжек.

Наихудшими условиями для работы системы вентиляции является сочетание внешних воздействий при отсутствии ветра и равенстве температур наружного и внутреннего воздуха. Воздухообмен помещений в данном случае осуществляется лишь вследствие перепадов давлений, создаваемых вытяжными вентиляторами.

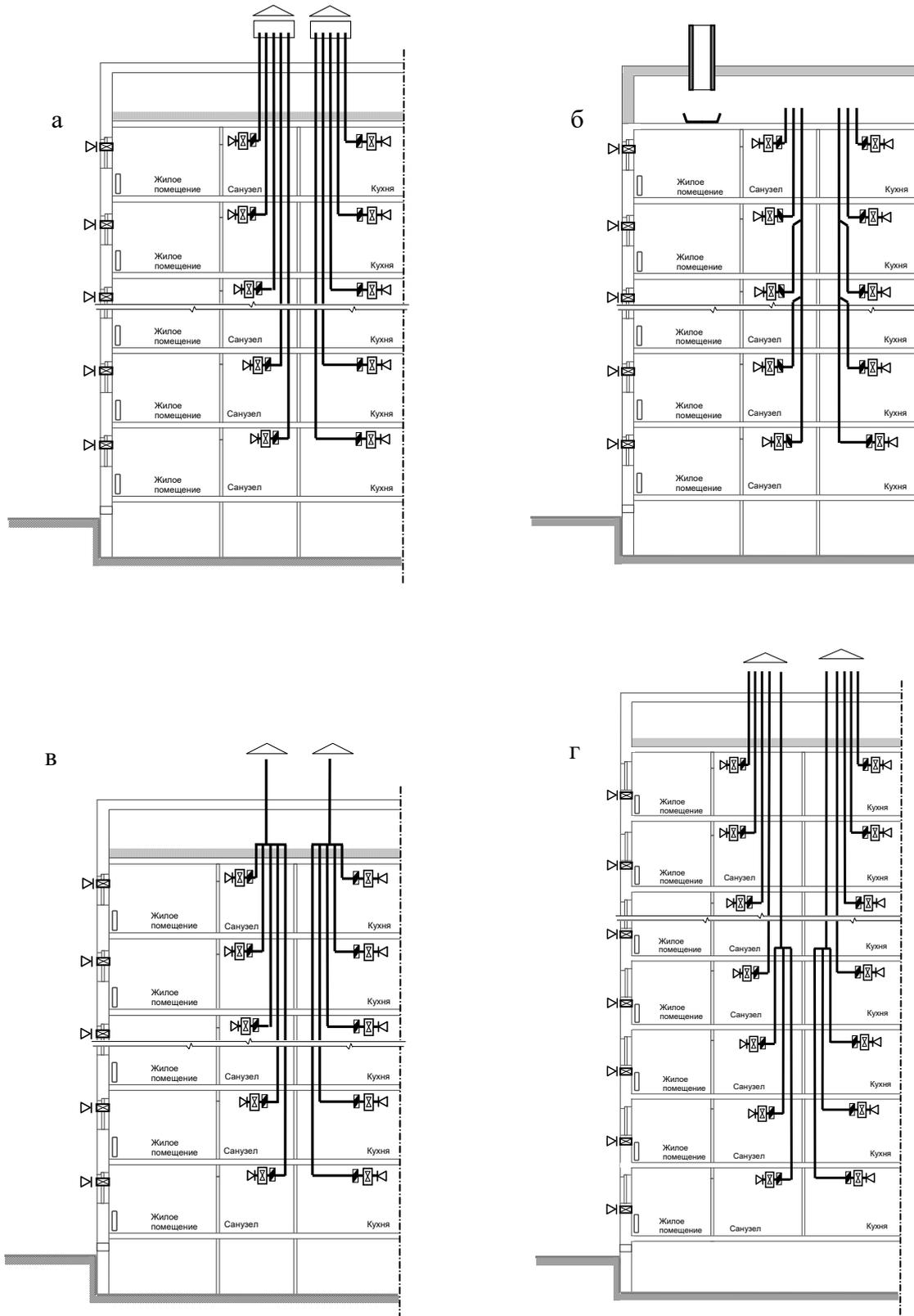


Рисунок 2.2 – Схемы систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами: а – с отдельными каналами; б - с теплым чердаком; в - с горизонтальными сборными каналами на чердаке; г – зданий повышенной этажности

Сложность прогнозирования эксплуатационного состояния систем вентиляции зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами обусловлена необходимостью учета возможного изменения отдельных параметров в процессе эксплуатации, как внешних, так и внутренних.

Возможны следующие частные задачи:

– прогнозирование совместной работы вентиляторов в сети воздуховодов (например, вертикальный сборный канал с каналами-спутниками, подключенными через этаж или несколько этажей, при установке в каналах-спутниках индивидуальных вентиляторов);

– прогнозирование совместной работы нескольких вытяжных каналов в пределах одной квартиры с учетом взаимного влияния и возможного перетекания воздуха между каналами;

– прогнозирование совместной работы нескольких вытяжных каналов с учетом аэродинамического сопротивления приточных устройств (клапанов), воздухопроницаемости ограждающих конструкций, влияния тепловых и ветровых перепадов давлений, взаимного влияния и возможного перетекания воздуха между каналами.

Решение вышеперечисленных задач выполнено на основе разработанной математической модели, базирующейся на теории гидравлических цепей с помощью разработанной компьютерной программы на базе Microsoft Office Excel за счет решения систем нелинейных алгебраических уравнений, связывающих расход и давление (потери давления) воздуха. Оценка разработанной математической модели была выполнена с помощью усовершенствованных графических методов и экспериментально на лабораторном стенде, моделирующем четыре канала-спутника и сборный канал системы вентиляции.

2.2. Математическая модель

2.2.1. Основные положения

В общем случае систему вентиляции жилого многоквартирного здания можно представить в виде аэродинамической сети определенной конфигурации, составленной с учетом реальной топологии системы и геометрических размеров ее элементов.

Отдельные помещения рассматриваются в виде узлов (блоков), соединенных между собой связями, характеризующими сопротивление ограждающих конструкций, вентиляционных каналов, приточных или вытяжных решеток, клапанов и др. элементов системы вентиляции [23, 48, 56, 80, 146, 160]. В узлах, под воздействием перепада давлений, подходит и уходит определенное количество воздуха. При этом воздушный баланс каждого из узлов остается нулевым (количество поступившего воздуха равно ушедшему).

Узлами сети в данном случае являются отдельные квартиры, а также точки слияния и деления потоков воздушной среды. Окружающая среда принимается в качестве мнимого узла.

Движение воздуха по участкам аэродинамической сети в ряде работ [4, 44, 53, 56] принято описывать нелинейными уравнениями, отражающими взаимосвязь между перепадом давлений и расходом воздуха

$$P_k - P_m = s_i \cdot G_i^\beta, \quad (2.1)$$

где P_k, P_m – давление в отдельных помещениях (узлах), Па; G_i – расход воздуха по i -му участку сети между узлами k и m , кг/ч; s_i – характеристика сопротивления i -ого участка сети, Па·(ч/кг) $^\beta$; β – показатель фильтрации.

Если конструкция непосредственно граничит с наружным воздухом, то в уравнении (2.1) согласно [4, 44, 53, 56] фигурирует давление наружного воздуха на уровне данной конструкции $P_{ext,i}$ и давление в рассчитываемом помещении $P_{m,i}$

$$P_{ext,i} - P_m = s_i \cdot G_i^\beta. \quad (2.2)$$

Для участков сети, включающих вентилятор [23, 46, 80]

$$P_k - P_m + P_{вент} = s_i \cdot G_i^\beta, \quad (2.3)$$

где $P_{вент}$ – давление, создаваемое вентилятором, Па, определяемое по результатам испытаний.

Число уравнений типа (2.1) – (2.3) определяется по расчетной схеме системы вентиляции здания и равно количеству независимых контуров в системе [23, 46, 80].

Следующая группа уравнений – уравнения узловых расходов и контурных давлений, в соответствии с которыми сумма расходов для каждого узла сети равна нулю

$$\sum G_i = 0, \quad (2.4)$$

и сумма потерь давления равна сумме располагаемых давлений в каждом контуре сети

$$\sum (P_k - P_m) = \sum P_{расп}. \quad (2.5)$$

где $\sum P_{расп}$ – сумма располагаемых давлений (тепловых, ветровых перепадов и давлений вентиляторов) в контуре сети, Па

Движение воздуха по отдельным участкам аэродинамической сети принято описывать нелинейными уравнениями, отражающими взаимосвязь между перепадом давлений и расходом воздуха. Например, для вентиляционных каналов в большинстве работ применялась зависимость [4, 23, 24, 44, 80]

$$\Delta P_i = s_i \cdot G_i^2, \quad (2.6)$$

где ΔP_i – общая потеря давления на участке, Па;

G_i – массовый расход воздуха на участке, кг/ч;

s_i – характеристика аэродинамического сопротивления участка, Па·ч²/кг².

Для описания взаимосвязи движения воздуха через оконные блоки, открытые отверстия в ряде работ [44, 53–56] использовалось выражение типа (2.1) или в соответствии с [46–48, 144–146, 160] уравнения типа

$$\Delta P_i = s_1 \cdot G_i + s_2 \cdot G_i^2, \quad (2.7)$$

Задача моделирования воздухораспределения в системах вентиляции зданий сводится к составлению системы нелинейных уравнений типа (2.3) - (2.5) или их аналогов – по расчетной схеме системы вентиляции, и последующему решению системы уравнений с использованием различных математических методов [4, 23, 24, 44, 46, 80].

Сложность реализации изложенного подхода обусловлена тем, что перемещение воздуха через отдельные элементы рассматриваемой аэродинамической сети характеризуется разным режимом течения. Соответственно, для корректного описания зависимости между перепадом давления и расходом воздуха необходимо в каждом конкретном воздухопроницаемом элементе задавать математическую зависимость «давление – расход воздуха», определять величины характеристик сопротивлений s_i и показателей степени. Именно этим обусловлено применение различных формул, в той или иной мере уточняющих аппроксимацию зависимости «давление – расход воздуха».

При включении в аэродинамическую сеть вытяжных (или приточных) вентиляторов, появляется необходимость учета дополнительного давления $P_{\text{вент}}$, создаваемого вентиляторами на отдельных участках сети.

Например, уравнение (2.7) для i -го участка с вентилятором приобретает вид [46]

$$\Delta P_i = s_1 \cdot G_i + s_2 \cdot G_i^2 - P_{\text{вент}}, \quad (2.8)$$

Вентилятор в данном случае рассматривается как источник давления, а не новый узел сети.

В работе [46] уравнение, описывающее работу вентилятора, предлагалось записывать в виде

$$P_{\text{вент}} = P_0 - s_1 \cdot (G_i / \rho) - s_2 \cdot (G_i / \rho)^2 \quad (2.9)$$

где P_0 – давление вентилятора при нулевом расходе, Па;

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

G_i – массовый расход воздуха, кг/ч;

(G_i / ρ) – объемный расход воздуха, м³/ч.

Соответственно, с целью последующего включения в систему нелинейных уравнений вентиляторов, появляется задача определения и аппроксимации их аэродинамических характеристик $P_{\text{вент}} = f(G)$.

На рисунке 2.3 (а) в качестве примера приведены характеристики некоторых вытяжных вентиляторов (по данным заводов-изготовителей). Следует отметить, что зависимости «давление – расход воздуха» для разных типов вентиляторов могут существенно отличаться и иметь различную форму (например, «седловидную»).

В современных системах вентиляции с применением приточных и вытяжных клапанов, изменяющих свои характеристики в зависимости от степени открытия регулирующей заслонки или положения ветрозащитной планки, задача моделирования воздушного режима зданий осложняется еще и необходимостью составления уравнений «давление – расход воздуха» для этих устройств, что в ряде случаев требует задания характеристик с переломными точками.

На рисунке 2.3 (б) приведены результаты испытаний некоторых оконных и стеновых клапанов с ветрозащитной планкой.

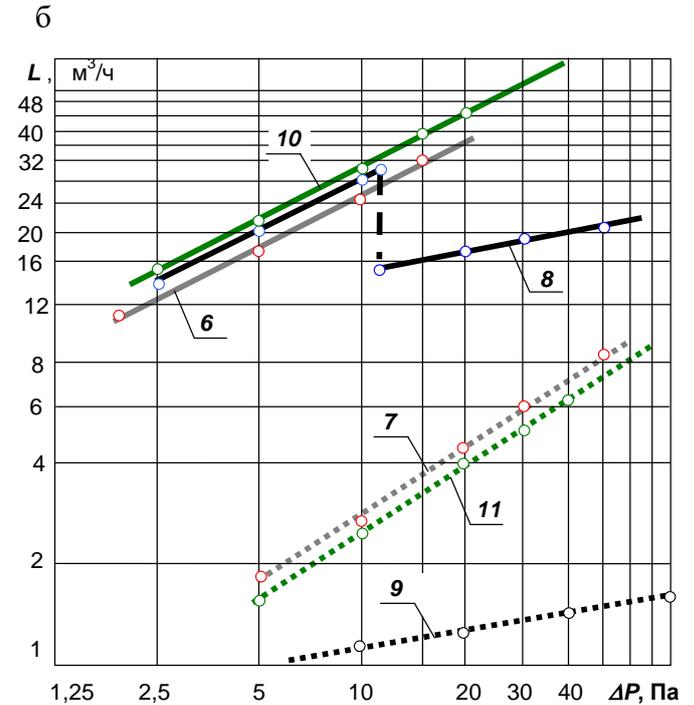
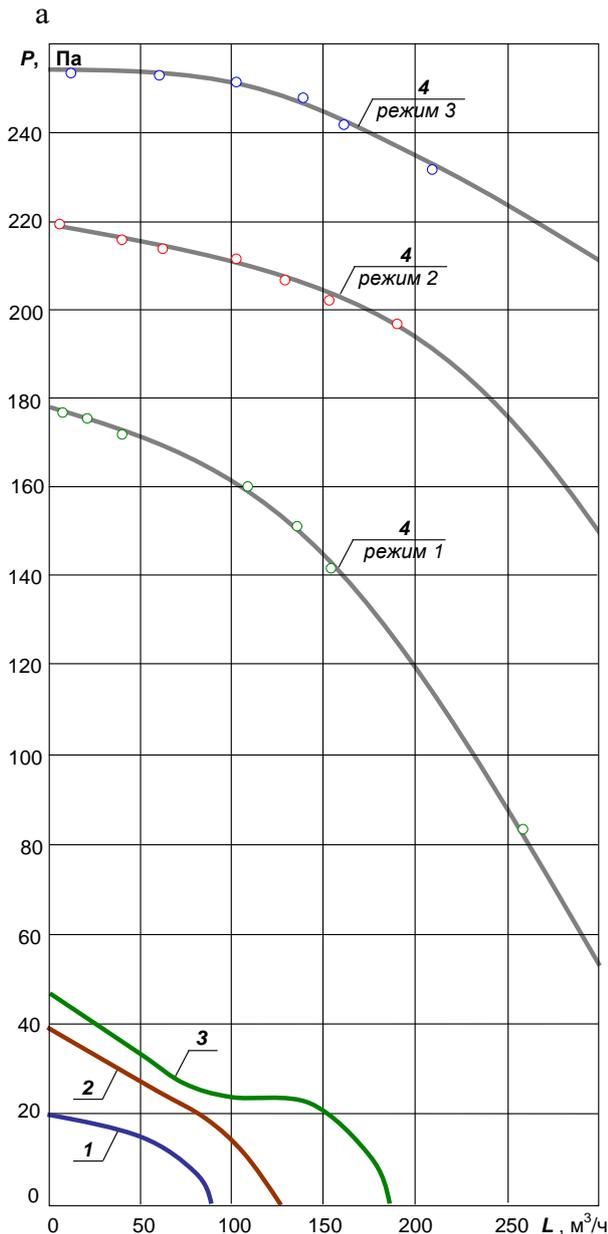


Рисунок 2.3 – Аэродинамические характеристики некоторых вытяжных вентиляторов (а) и приточных устройств (б):

1 – вентилятор BF 100 (Systemair); 2 – вентилятор ВЕНТС 100 Турбо (ВЕНТС); 3 – вентилятор MF 120/5'' (Vortice); 4 – вентилятор MF 150/6'' (Vortice); 5 – кухонная вытяжка «Shindo domestic» при различных режимах работы вытяжного вентилятора; 6 – оконный клапан ЕММ 3-30 «Aereco»; 7 – то же в закрытом состоянии; 8 – стеновой клапан СВК В-75; 9 – то же в закрытом состоянии; 10 – стеновой клапан КИВ-125; 11 – то же в за-

Следует отметить, что при расчете систем вентиляции с использованием ЭВМ в формулах (2.1) – (2.7) требовалось введение абсолютной величины G_i (по модулю). В результате вышеописанные формулы приобретали следующий вид [4, 44]:

$$\Delta P_i = s_i \cdot |G_i| \cdot G_i; \quad (2.10)$$

$$\Delta P_i = s_1 \cdot G_i + s_2 \cdot |G_i| \cdot G_i; \quad (2.11)$$

или

$$\Delta P_i = s_i \cdot |G_i^{\beta-1}| \cdot G_i. \quad (2.12)$$

Введение модуля G_i необходимо для случаев, когда фактическое направление движения воздуха противоположно заданному. Отсутствие модуля в данных формулах исключает возможность изменения направления движения, так как возведение отрицательного расхода в четную степень приводит к положительному значению данной величины. Также введение модуля указывало на то, что при отрицательных значениях расхода воздуха (случаи, когда направление движения противоположно заданному) движение воздуха будет определяться аналогичной зависимостью. В некоторых элементах аэродинамической сети (например, движение воздуха по вентиляционным каналам) данное условие справедливо, однако в ряде случаев, при изменении направления движения воздуха зависимость может изменяться. Простейший пример – обратный клапан, который при движении воздуха в обратном направлении закрывается и при любых перепадах давлений расход воздуха близок к нулю. Таким образом, для полного описания работы элемента сети необходимо вводить в расчет несколько формул (одну в области отрицательных расходов, другую – в области положительных).

Математическая модель воздушного режима здания, в конечном счете, сводится к системе нелинейных уравнений, составленных по пространственной расчетной схеме системы вентиляции.

Принимаемые допущения:

- температура воздуха в помещении не изменяется по высоте и одинакова во всех помещениях квартиры;
- температура наружного воздуха и скорость ветра (в том случае, когда она учитывается) неизменны во времени (порывы ветра и колебания температуры наружного воздуха не учитываются);
- аэродинамическое сопротивление ограждающих конструкций внутри квартиры (межкомнатные перегородки, двери) равно нулю;
- вытяжные каналы и воздухопроводы герметичны и температура воздуха в них постоянна;
- все здание рассматривается как единая гидравлическая система с сосредоточенными параметрами.

Как в России, так и в зарубежных странах данную математическую модель называют по-разному: теория гидравлических цепей [23, 80], моделирование воздушного режима здания [24,

44, 76–79], расчет воздухообмена зданий методом математического моделирования [46, 48], модели с постоянной воздушной оболочкой (Steady Envelope Flow Models) [160], упрощенный математический подход для моделирования вентиляции зданий [144–146] и др. Однако основные положения и подходы к моделированию во всех методах совпадают.

2.2.2. Усовершенствованная математическая модель

Расширение возможностей современных компьютеров и совершенствование стандартных программных продуктов позволяет упростить подход к формированию систем нелинейных уравнений, обеспечить более точное и универсальное описание зависимостей «расход воздуха – потери давления».

Для этого предлагается использовать известную зависимость в виде алгебраического многочлена [80]

$$f_i(x_i) = s_{i,1} \cdot x_i + s_{i,2} \cdot x_i^2 + s_{i,3} \cdot x_i^3 \dots, \quad (2.13)$$

Применительно к рассматриваемой задаче для i -го элемента вентиляционной сети можно записать

$$\Delta P_i = s_{i,1} \cdot G_i + s_{i,2} \cdot G_i^2 + s_{i,3} \cdot G_i^3 \dots + s_{i,k} \cdot G_i^k, \quad (2.14)$$

или в общем виде

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^k (s_{i,j} \cdot G_i^j) \quad . \quad (2.15)$$

В данном случае нет необходимости во введении модуля или нескольких формул для одного элемента сети, так как аппроксимирующая функция позволяет описать значения расходов, находящиеся как в положительной, так и в отрицательной областях. Исключением являются вентиляционные каналы и воздуховоды, для которых следует пользоваться формулой (2.10). Коэффициенты $s_{i,1}$, $s_{i,2}$, $s_{i,3}$... $s_{i,k}$ определяются путем аппроксимации характеристик устройств, полученных по результатам испытаний. Количество коэффициентов зависит от степени полученной полиномиальной зависимости, наиболее близко описывающей работу устройства. При этом необходимо указывать диапазоны расходов воздуха, при которых допускается использование зависимостей с полученными коэффициентами. Это связано с тем, что неизвестно как поведет себя полученная функция за пределами диапазона (меньше минимальных или больше максимальных значений).

Аналогичным образом предлагается описывать зависимость давления вентилятора от расхода, только в этом случае будет добавлен коэффициент s_0 , который соответствует максимальному давлению вентилятора (давлению при нулевом расходе):

$$P_{\text{вент}} = s_0 + s_1 \cdot G + s_2 \cdot G^2 + s_3 \cdot G^3 + \dots + s_k \cdot G^k \quad (2.16)$$

или в общем виде

$$P_{\text{вент}} = s_0 + \sum_{j=1}^k (s_j \cdot G_i^j), \quad (2.17)$$

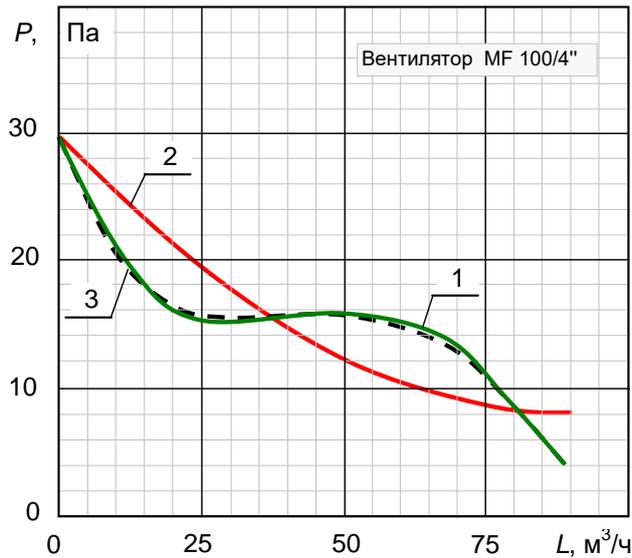
где s_0 – нулевой коэффициент, соответствующий давлению вентилятора при нулевом расходе.

Применение формулы (2.17) позволяет более точно описать характеристику вентиляторов и вводить характеристику как в области отрицательных расходов (II квадрант), так и в области отрицательных давлений (IV квадрант). При подсоединении к вентилятору обратного клапана, достаточно вычесть из коэффициентов s_i вентилятора соответствующих коэффициентов обратного клапана, в результате чего будет получена суммарная характеристика двух последовательно работающих устройств. Таким образом, введение в расчет таких суммарных характеристик позволяет уменьшить количество членов в составленной системе нелинейных уравнений.

Необходимо отметить, что во всех вышеперечисленных формулах используется массовый расход воздуха G , измеряемый в кг/ч. Однако в ряде задач более удобным является использование объемного расхода воздуха L , измеряемого в м³/ч. Соответственно в этом случае величина коэффициентов s_i будет иной.

Результаты аппроксимации зависимостей «расход воздуха – перепад давлений» по формулам (2.15) и (2.17) для некоторых вентиляционных элементов приведены на рисунках 2.4, 2.5. В частности, описание характеристики приточных клапанов, полученное по формуле (2.15) ближе к фактической (см. рисунок 2.5) по сравнению с кривыми, полученными по формулам (2.1, 2.7). Аналогичным образом могут отличаться и кривые, описывающие характеристики вентиляторов. В качестве примера на рисунке 2.4 представлена характеристика вентилятора MF 100/4” фирмы «Vortice» и результаты ее аппроксимации по различным формулам.

Таким образом, для моделирования процессов распределения воздуха в системах механической вытяжной вентиляции с индивидуальными вентиляторами предлагается использовать уравнения (2.15) – (2.17) с различным показателем полинома, наиболее близко позволяющим аппроксимировать экспериментальные зависимости.

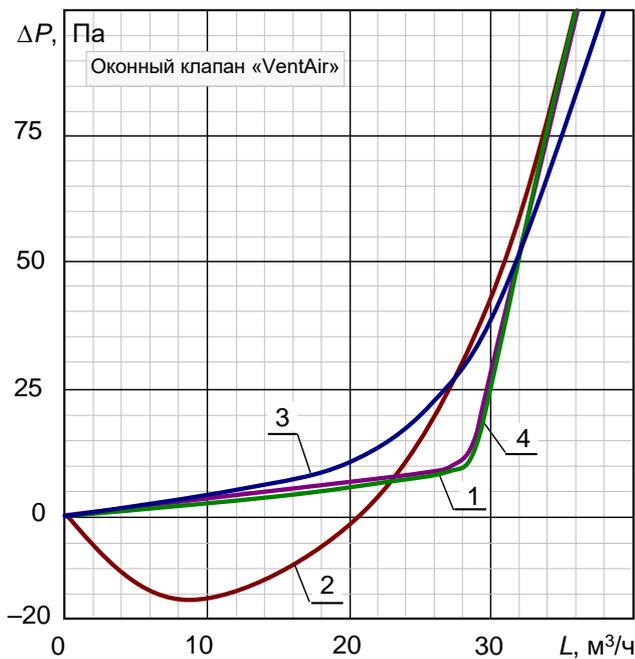


Значения расходов воздуха и потерь давления, полученных по результатам испытаний $P_{исп}$ и аппроксимацией по различным формулам

$L_{исп},$ м³/ч	$P_{исп},$ Па	$P_{расч.(1)},$ Па	$P_{расч.(2)},$ Па
0	30	30,00	30,00
10	21	27,09	25,27
15	18	25,64	23,12
20	16	24,18	21,12
30	15	21,27	17,56
50	16	15,46	12,18
60	15	12,55	10,37
70	13	9,64	9,14
80	8	6,73	8,50
90	4	3,82	8,44

Примечание: $P_{расч.(1)}$ – аппроксимация для кривой 2 по формуле (2.9); $P_{расч.(2)}$ – аппроксимация для кривой 3 по формуле (2.17)

Рисунок 2.4 – Результаты испытаний и аппроксимация зависимости «давление – расход воздуха» по различным формулам вентилятора MF 100/4” фирмы «Vortice»: 1 - результаты испытаний; 2 – аппроксимация по формуле (2.9); 3 - аппроксимация по предлагаемой формуле (2.17) при степени аппроксимации $k = 6$



Значения расходов воздуха и потерь давления, полученных по результатам испытаний $P_{исп}$ и аппроксимацией по различным формулам

$L_{исп},$ м³/ч	$P_{исп},$ Па	$P_{расч.(1)},$ Па	$P_{расч.(2)},$ Па	$P_{расч.(3)},$ Па
0	0	0,00	0,00	0,00
10	3	-26,59	1,13	4,11
15	5	-24,29	4,39	4,22
25	10	11,47	24,15	10,62
27	12	23,61	31,21	17,40
29	25	37,42	39,6	27,09
32	50	61,25	54,99	47,64
35	75	88,81	74,13	75,61
37	100	109,27	89,22	98,20

Примечание: $P_{исп}$ – по результатам испытаний; $P_{расч.(1)}$ – аппроксимация по формуле (2.7); $P_{расч.(2)}$ – аппроксимация по формуле (2.2); $P_{расч.(3)}$ – аппроксимация по формуле (2.15).

Рисунок 2.5 – Результаты испытаний и аппроксимация зависимости «давление – расход воздуха» по различным формулам для оконного клапана «VentAir», полученные: 1 – по результатам испытаний; 2 – аппроксимацией по формуле (2.7); 3 – аппроксимацией по формуле (2.2); 4 – аппроксимацией по формуле (2.15) при степени аппроксимации $k = 6$

В таблицах 2.1, 2.2 представлены коэффициенты s_i , полученные в результате аппроксимации известных характеристик ряда вентиляционных элементов. Для каждого элемента представлен диапазон расходов воздуха, при котором допускается использование полученных коэффициентов. В большинстве вентиляционных устройств напорно-расходные характеристики в области II – IV квадранта отсутствуют. В ряде расчетов (случаи опрокидывания движения воздуха при включенных вентиляторах; превышение значений максимальных расходов, проходящих через устройства и др.) отсутствие характеристик устройств в области II – IV квадрантов может привести как к ошибкам в результатах расчетов, так и к отсутствию решений в принципе. В связи с необходимостью данных значений при расчетах, для некоторых вентиляционных устройств были получены коэффициенты для предполагаемых характеристик в соответствующих квадрантах. Также для некоторых вентиляционных устройств более целесообразным является вводить в расчет несколько формул описывающих их работу на определенных отрезках (например, клапаны фирмы Aldes). Следует отметить, что при расширении диапазонов расходов воздуха вентиляционных устройств, представленных в таблицах 2.1, 2.2, с целью исключения ошибок в расчетах, необходимо заново выполнить аппроксимацию их характеристик, что приведет к изменению коэффициентов s_i .

Таблица 2.1

Коэффициенты s_i , полученные в результате аппроксимации
аэродинамических характеристик ряда вентиляторов

№ п/п	Наименование вентилятора	Диапазон расхода воздуха, м ³ /ч		Полученные коэффициенты						
		L _{min}	L _{max}	s ₀	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅	s ₆
1	Вентс ВКО 100	-200	300	37	$-3,26 \cdot 10^{-1}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$	$-1,86 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-9}$	$2,20 \cdot 10^{-10}$	$-3,65 \cdot 10^{-13}$
2	Вентс 125 М	0	190	55	$-1,45 \cdot 10^{-1}$	$-1,19 \cdot 10^{-2}$	$3,14 \cdot 10^{-4}$	$-3,13 \cdot 10^{-6}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$-2,53 \cdot 10^{-11}$
3	Вентс ВКО 125 турбо	-250	320	65	$-9,17 \cdot 10^{-1}$	$1,88 \cdot 10^{-2}$	$-1,87 \cdot 10^{-4}$	$9,23 \cdot 10^{-7}$	$-2,34 \cdot 10^{-9}$	$2,37 \cdot 10^{-12}$
4	Домовент ВКО 100	0	75	34,5	$2,78 \cdot 10^{-1}$	$-1,27 \cdot 10^{-1}$	$5,25 \cdot 10^{-3}$	$-9,00 \cdot 10^{-5}$	$7,02 \cdot 10^{-7}$	$-2,07 \cdot 10^{-9}$
5	Vortice MF 100/4	0	105	30	$-9,95 \cdot 10^{-1}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$-2,90 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-7}$	$-8,54 \cdot 10^{-10}$
6	Era Slim 4C	0	88	30	$-2,30 \cdot 10^{-1}$	$-9,15 \cdot 10^{-2}$	$5,51 \cdot 10^{-3}$	$-1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$-4,06 \cdot 10^{-9}$
7	X-Mart Cata 10 S	0	100	28	$-1,71 \cdot 10^{-1}$	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$-5,47 \cdot 10^{-4}$	$7,76 \cdot 10^{-6}$	$-3,41 \cdot 10^{-8}$	–
8	Кухонная вытяжка Shindo Columba скорость – 1	0	400	173,6	$7,50 \cdot 10^{-2}$	$-2,08 \cdot 10^{-3}$	$2,01 \cdot 10^{-6}$	–	–	–
9	Кухонная вытяжка Shindo Columba скорость – 2	0	650	216,2	$9,14 \cdot 10^{-2}$	$-1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	–	–	–
10	Кухонная вытяжка Shindo Columba скорость – 3	0	800	255,1	$9,79 \cdot 10^{-3}$	$-4,98 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-7}$	–	–	–

Примечания:

- 1) Коэффициенты для вентиляторов Вентс ВКО 100 и Вентс ВКО 125 турбо определены для известных характеристик вентиляторов при положительных значениях расходов и давлений (область I квадранта), а также предполагаемых характеристик в области отрицательных расходов и положительных давлений (II квадрант) и области положительных расходов и отрицательных давлений (IV квадрант);
- 2) Коэффициенты для различных скоростей кухонной вытяжки Shindo Columba определены в результате аппроксимации характеристик, полученных по результатам проведенных испытаний.

Таблица 2.2

Коэффициенты s_i , полученные в результате аппроксимации аэродинамических характеристик ряда приточных и вытяжных устройств

№ п/п	Описание вентиляционного элемента	Диапазон расхода воздуха, м ³ /ч		Полученные коэффициенты						
		L _{min}	L _{max}	s ₀	s ₁	s ₂	s ₃	s ₄	s ₅	s ₆
1	ЕММ 3-30 «Аегесо» в открытом режиме	0	100	–	8,07·10 ⁻²	1,07·10 ⁻²	6,56·10 ⁻⁵	–	–	–
2	ЕММ 3-30 «Аегесо» в закрытом режиме	0	30	–	1,18	9,15·10 ⁻¹	–5,19·10 ⁻²	1,10·10 ⁻³	–	–
3	КИВ-125 открыт	0	150	–	2,41·10 ⁻¹	6,57·10 ⁻³	–4,97·10 ⁻⁶	1,24·10 ⁻⁷	–	–
4	КИВ-125 закрыт	0	30	–	5,43	–1,59·10 ⁻²	1,25·10 ⁻²	–	–	–
5	СВК-В75 открыт	–20	150	–	2,43	–1,67·10 ⁻¹	4,98·10 ⁻³	–6,32·10 ⁻⁵	3,68·10 ⁻⁷	–7,90·10 ⁻¹⁰
6	Ventair II	0	50	–	1,16	–1,19·10 ⁻²	–9,46·10 ⁻³	4,72·10 ⁻⁴	–4,82·10 ⁻⁶	–
7	Airfix 125	0	50	–	1,00	–	–	–	–	–
		50	100	–5 019	3,14·10 ²	–7,23	7,26·10 ⁻²	–2,61·10 ⁻⁴	–	–
8	Обратный клапан Вентс КО 125	–30	0	–	6,29	–1,38·10 ⁻¹	–2,34·10 ⁻³	–	–	–
		0	600	–	1,50·10 ⁻⁴	1,94·10 ⁻⁴	–2,52·10 ⁻¹⁰	–	–	–
9	Окно из ПВХ-профилей (глухарь) 1x1,5 м	0	3	–	1,92·10 ¹	4,98·10 ¹	–2,19·10 ¹	7,73	–7,98·10 ⁻¹	–
10	Открыта створка окна (прямоугольное отверстие 1x1,5 м)	0	800	–	2,72·10 ⁻²	–7,69·10 ⁻⁶	6,17·10 ⁻⁹	–	–	–

Примечания:

- 1) Коэффициенты определены в результате аппроксимации характеристик, представленных заводами-изготовителями, а также характеристик, полученных по результатам проведенных испытаний.
- 2) Отрицательные значения указывают на то, что воздух движется в противоположно заданном направлении и перепады давлений в этих случаях также будут отрицательными.

2.2.3 Решение задачи расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий

с индивидуальными вытяжными вентиляторами на основе математического моделирования

Решение задачи расчета распределения воздуха в системах вентиляции жилых зданий рассмотрено на основе теории гидравлических цепей [23, 44, 80], широко применяемой для решения подобного рода задач.

Составление системы уравнений осуществляется на основе графа системы вентиляции с указанием ветвей, узлов, расположения источников давления (вентиляторов) и предварительным заданием направления движения воздуха.

После создания графа геометрические свойства схемы соединений графа выражаются в виде системы уравнений, связывающих матрицы: инцидентий (A), циклов (B), расходов (G), сопротивлений (S), источников давления (P) [23]:

$$\left. \begin{aligned} A \cdot G &= 0; \\ B \cdot s &= B \cdot P. \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

Матрица инцидентий A представляет собой связь ребер (участков) и вершин (узлов) графа:

Вершины j	Ребра i			
	1	2	...	p
1	A			
2				
...				
$g-1$				

Матрица циклов B представляет собой связь ребер (участков) и циклов графа:

Циклы c	Ребра i			
	1	2	...	p
1	B			
2				
...				
$k = p - g + 1$				

Матрицы расходов G и действующих давлений P имеют одностолбцовый вид:

$$G = \begin{matrix} G_1 \\ G_1 \\ \dots \\ G_n \end{matrix} \quad P = \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{matrix}$$

Матрица сопротивлений s имеет диагональный вид и выглядит следующим образом:

$$s = \begin{matrix} \sum(s_{1,i} \cdot G_{1,i}^i) & & & \\ & \sum(s_{2,i} \cdot G_{2,i}^i) & & \\ & & \dots & \\ & & & \sum(s_{n,i} \cdot G_{n,i}^i) \end{matrix}$$

В качестве примера на рисунке 2.6 приведена схема простейшей системы вентиляции квартиры, расположенной на верхнем этаже многоэтажного здания и её расчетный граф. Приток воздуха осуществляется через два приточных клапана, расположенных в противоположных стенах квартиры, удаление воздуха через два вытяжных канала, расположенных в кухне и санузле, оснащенных индивидуальными вентиляторами.

Система уравнений на основе графа, приведенного на рисунке 2.6, будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} G_1 + G_2 - G_3 - G_4 &= 0 \\ \sum(s_{1,i} \cdot G_{1,i}^i) + \sum(s_{3,i} \cdot G_{3,i}^i) &= P_3; \\ \sum(s_{2,i} \cdot G_{2,i}^i) + \sum(s_{4,i} \cdot G_{4,i}^i) &= P_4; \\ \sum(s_{1,i} \cdot G_{1,i}^i) + \sum(s_{4,i} \cdot G_{4,i}^i) &= P_4; \\ \sum(s_{2,i} \cdot G_{2,i}^i) + \sum(s_{3,i} \cdot G_{3,i}^i) &= P_3; \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

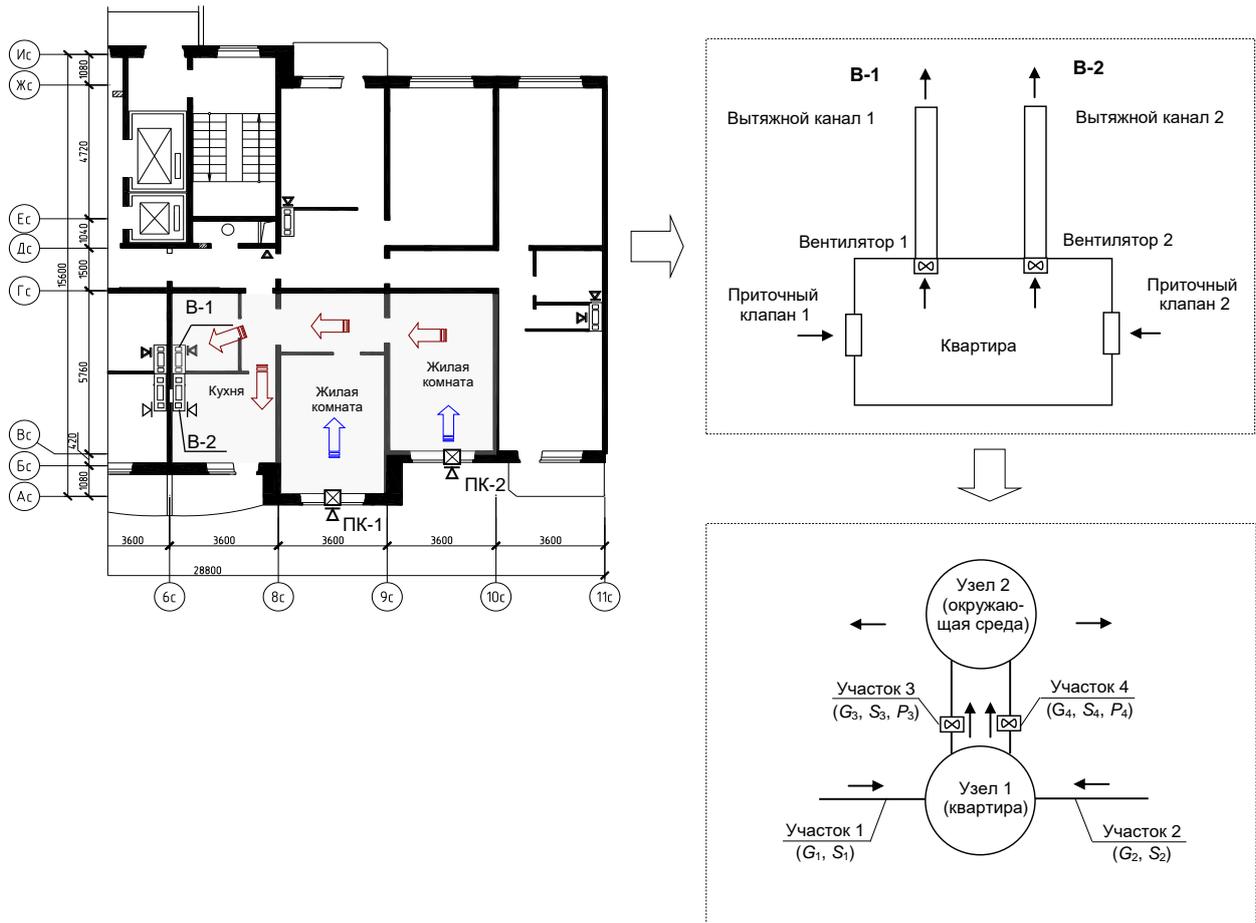


Рисунок 2.6 – Пример составления графа системы вентиляции двухкомнатной квартиры верхнего этажа многоквартирного жилого дома

Известны различные математические методы решения систем нелинейных уравнений – Ньютона, Зейделя, обобщенного приведенного градиента и др. [4, 23, 80]. В данной работе решение системы уравнений получено методом обобщенного приведенного градиента с использованием программы Microsoft office Excel. При решении систем нелинейных уравнений выполняются условия узловых увязки расходов и поконтурной увязки давлений. Критериями сходимости являются расходы воздуха, подходящие и уходящие от узлов (допустимая невязка – $0,01 \text{ м}^3/\text{ч}$) и давления, создаваемые и теряемые в каждом независимом контуре графа (допустимая невязка – $0,01 \text{ Па}$).

Алгоритм расчета систем вентиляции представлен на рисунке 2.7.

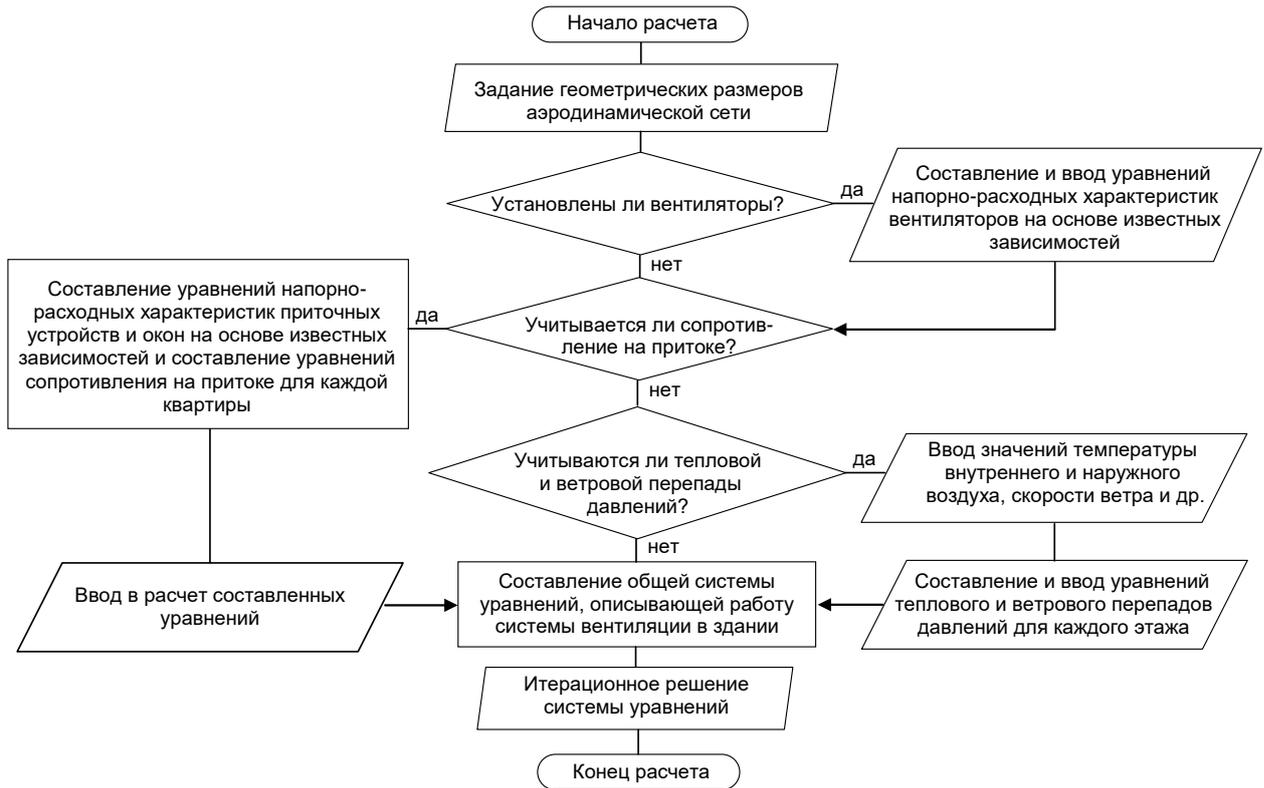


Рисунок 2.7 – Алгоритм расчета системы вентиляции

В качестве примера на рисунке 2.8 приведены расчетная схема и граф системы вентиляции 10-тиэтажного жилого дома – для квартир с двумя вытяжными каналами и приточными клапанами. В соответствии с данным графом составлена система из 70 уравнений, представленная на рисунке 2.9.

Скриншоты отдельных этапов расчета системы вентиляции приведены на рисунках 2.10 – 2.12.

Следует отметить особенности введения в программу расчета коэффициентов местных сопротивлений тройников. Проблема заключается в том, что при изменении направления движения воздуха в тройнике (от первоначально заданного) расчет коэффициентов местного сопротивления требуется проводить по другой формуле. Например, при опрокидывании системы вентиляции и изменении направления движения воздуха тройник необходимо рассматривать как приточный, а не как вытяжной. В результате расчетная формула изменяется. С целью учета данного фактора в программу были введены 12 формул для различных вариантов движения воздуха в тройнике – 3 приточных, 3 вытяжных и 6 вариантов, при которых расход воздуха на одном из ответвлений равен нулю. Скриншот программы на этапе расчета коэффициентов местных сопротивлений приведен на рисунке 2.11.

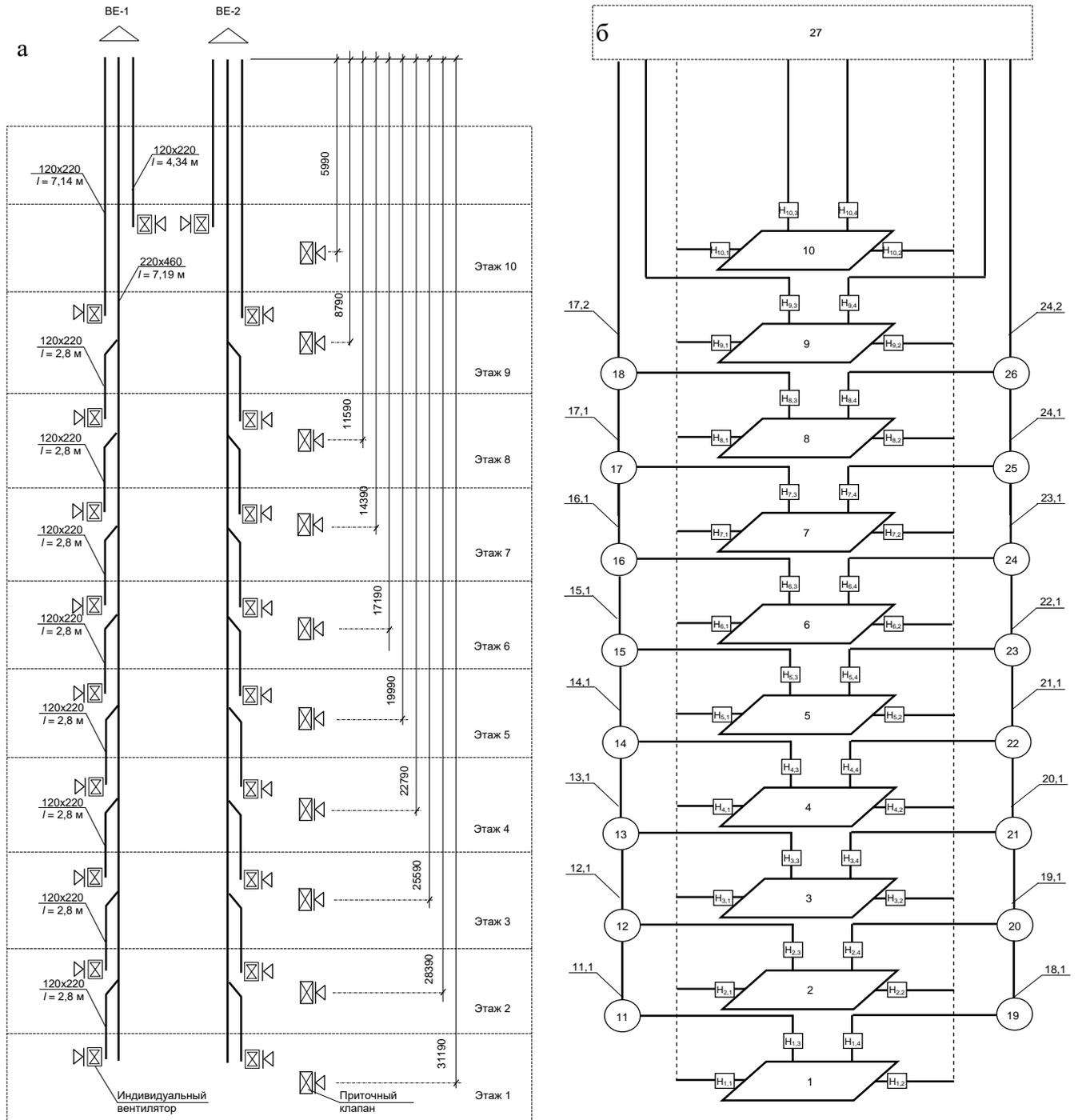


Рисунок 2.8 – Расчетная схема (а) и граф (б) вентиляции с индивидуальными вытяжными вентиляторами 10-ти этажного многоквартирного жилого дома

а

№ уч.	Наименование	Размеры					Дополнительные данные		Примечание
		уч. м	a	b	с м	длж	Широкость труба д. м	Дополнит. КМС (С _{мат})	
1.3	Вентканал 1 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	4,23	вент решетка, поворот.
1.4	Вентканал 1 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	4,23	вент решетка, поворот.
2.3	Вентканал 2 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
2.4	Вентканал 2 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
3.3	Вентканал 3 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
3.4	Вентканал 3 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
4.3	Вентканал 4 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
4.4	Вентканал 4 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
5.3	Вентканал 5 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
5.4	Вентканал 5 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
6.3	Вентканал 6 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
6.4	Вентканал 6 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
7.3	Вентканал 7 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
7.4	Вентканал 7 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
8.3	Вентканал 8 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
8.4	Вентканал 8 этажа	2,8	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	3,03	вент решетка, поворот.
9.3	Вентканал 9 этажа	7,14	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	5,23	вент решетка, поворот.
9.4	Вентканал 9 этажа	7,14	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	5,23	вент решетка, поворот.
10.3	Вентканал 10 этажа	4,34	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	5,23	вент решетка, поворот.
10.4	Вентканал 10 этажа	4,34	0,12	0,22	0,0264	0,1552941	0,0001	5,23	вент решетка, поворот.
11.1	участок сети м/у 1 и 2 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
12.1	участок сети м/у 2 и 3 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
13.1	участок сети м/у 3 и 4 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
14.1	участок сети м/у 4 и 5 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
15.1	участок сети м/у 5 и 6 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
16.1	участок сети м/у 6 и 7 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
17.1	участок сети м/у 7 и 8 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
17.2	участок сети м/у 8 этажом и выходя из сети	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	1	выход из сети
18.1	участок сети м/у 1 и 2 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
19.1	участок сети м/у 2 и 3 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
20.1	участок сети м/у 3 и 4 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
21.1	участок сети м/у 4 и 5 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
22.1	участок сети м/у 5 и 6 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
23.1	участок сети м/у 6 и 7 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
24.1	участок сети м/у 7 и 8 этажом	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	0	
24.2	участок сети м/у 8 этажом и выходя из сети	2,8	0,46	0,22	0,1012	0,2976471	0,0001	1	выход из сети

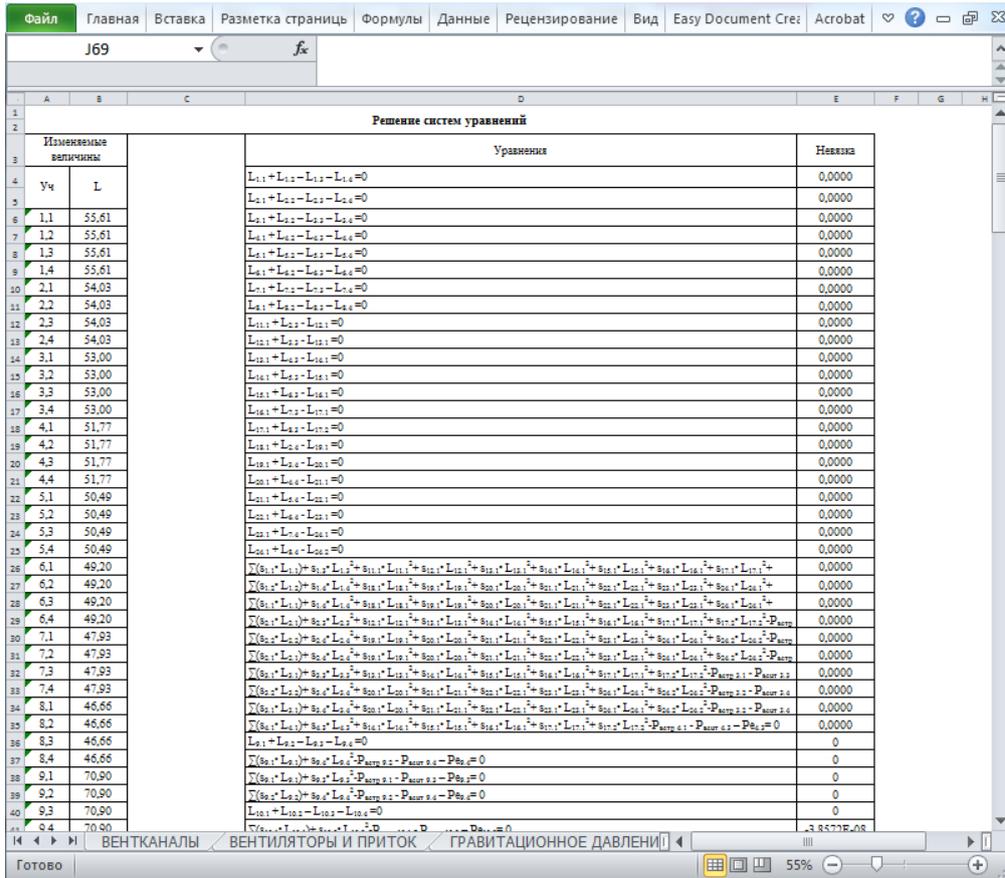
б

Этаж	Уч.	Вентилятор	Характеристика вентилятора						
			q ₀	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅	
1	1.3	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
1	1.4	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
2	2.3	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
2	2.4	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
3	3.3	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
3	3.4	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
4	4.3	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
4	4.4	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
5	5.3	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
5	5.4	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
6	6.3	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
6	6.4	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
7	7.3	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
7	7.4	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
8	8.3	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
8	8.4	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
9	9.3	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
9	9.4	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
10	10.3	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237
10	10.4	Венте ВК0 125 турбо	65	-0,91706681	0,018757711	-0,0001865	0,0000009231	-0,00000000237	0,0000000000237

Этаж	Уч.	Воздухопроницаемые элементы	Потери давления на притоке					
			q ₀	q ₁	q ₂	q ₃	q ₄	q ₅
1	1.1	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
1	1.2	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
2	2.1	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
2	2.2	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
3	3.1	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
3	3.2	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
4	4.1	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
4	4.2	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
5	5.1	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
5	5.2	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
6	6.1	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
6	6.2	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
7	7.1	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
7	7.2	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
8	8.1	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
8	8.2	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
9	9.1	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
9	9.2	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
10	10.1	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		
10	10.2	Приточный клапан КЛВ	0	0,032615	0,0089745	6,9161E-06		

Рисунок 2.10 – Скриншоты программы расчета на этапе ввода исходных данных: а – ввод исходных данных по вентканалам системы вентиляции; б – ввод исходных данных по вентиляторам и сопротивлению на притоке

а



б

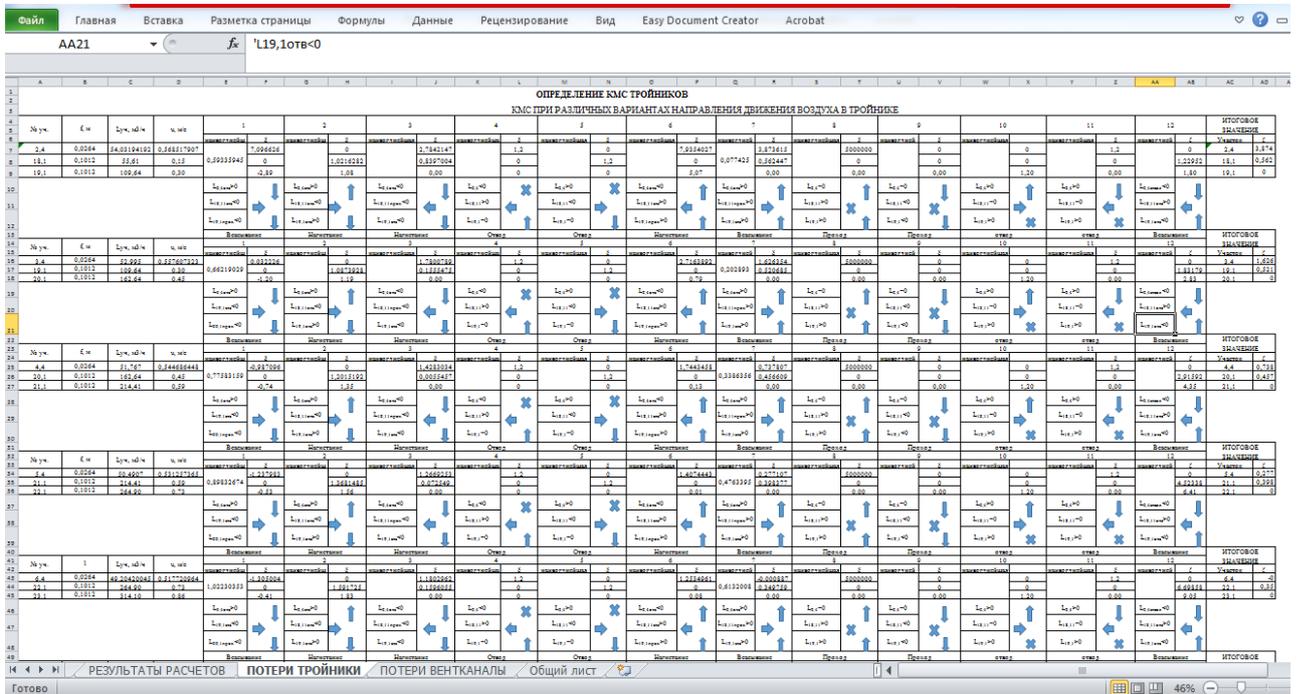


Рисунок 2.11 – Скриншоты программы на этапе формирования системы уравнений (а) и определения коэффициентов местных сопротивлений тройников (б)

Файл Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид Easy Document Creator Acrobat

N16

Потери давления в вентканалах

№ уч	Наименование	Луч, м ³ /ч	υ, м/с	Re	λ _с	R	R*1, Па	ζ	Z, Па	R*1+Z, Па	η _{2,уч}	Примечание
1												13
1.3	Вентканал 1 этажа	55,61	0,585154	6033,9253	0,03634151	0,04810444	0,134692433	4,23	0,87554095	1,01023338	0,00032469170	
1.4	Вентканал 1 этажа	55,61	0,585154	6033,9253	0,03634151	0,04810444	0,134692433	4,23	0,87554095	1,01023338	0,00032469170	
2.3	Вентканал 2 этажа	54,03	0,568518	5862,38292	0,03659043	0,04571915	0,128013618	5,873614878	1,14759876	1,27561238	0,00043423071	
2.4	Вентканал 2 этажа	54,03	0,568518	5862,38292	0,03659043	0,04571915	0,128013618	5,873614878	1,14759876	1,27561238	0,00043423071	
3.3	Вентканал 3 этажа	53,00	0,557607	5749,87631	0,03675884	0,0441836	0,123714067	3,626353984	0,68159036	0,80590443	0,00028507125	
3.4	Вентканал 3 этажа	53,00	0,557607	5749,87631	0,03675884	0,0441836	0,123714067	3,626353984	0,68159036	0,80590443	0,00028507125	
4.3	Вентканал 4 этажа	51,77	0,544686	5616,64019	0,03696385	0,04239481	0,118705481	2,737806524	0,4910121	0,60971759	0,00022626078	
4.4	Вентканал 4 этажа	51,77	0,544686	5616,64019	0,03696385	0,04239481	0,118705481	2,737806524	0,4910121	0,60971759	0,00022626078	
5.3	Вентканал 5 этажа	50,49	0,531257	5478,1636	0,03718368	0,04056997	0,113595909	2,277106675	0,38849874	0,50209464	0,00019590440	
5.4	Вентканал 5 этажа	50,49	0,531257	5478,1636	0,03718368	0,04056997	0,113595909	2,277106675	0,38849874	0,50209464	0,00019590440	
6.3	Вентканал 6 этажа	49,20	0,517721	5338,58037	0,03741262	0,03876609	0,108545056	1,999113067	0,3239106	0,43245566	0,00017770227	
6.4	Вентканал 6 этажа	49,20	0,517721	5338,58037	0,03741262	0,03876609	0,108545056	1,999113067	0,3239106	0,43245566	0,00017770227	
7.3	Вентканал 7 этажа	47,93	0,504261	5199,78908	0,03764803	0,03700803	0,103622491	1,814473389	0,27890628	0,38252877	0,00016571253	
7.4	Вентканал 7 этажа	47,93	0,504261	5199,78908	0,03764803	0,03700803	0,103622491	1,814473389	0,27890628	0,38252877	0,00016571253	
8.3	Вентканал 8 этажа	46,66	0,490941	5062,43005	0,03788909	0,03530324	0,098849081	1,683434295	0,24527342	0,3441225	0,00015729208	
8.4	Вентканал 8 этажа	46,66	0,490941	5062,43005	0,03788909	0,03530324	0,098849081	1,683434295	0,24527342	0,3441225	0,00015729208	
9.3	Вентканал 9 этажа	70,90	0,746054	7693,07905	0,03432652	0,07386053	0,527364193	4,23	1,42323625	1,95060044	0,00038603710	
9.4	Вентканал 9 этажа	70,90	0,746054	7693,07905	0,03432652	0,07386053	0,527364193	4,23	1,42323625	1,95060044	0,00038603710	
10.3	Вентканал 10 этажа	69,81	0,734496	7573,89446	0,0344517	0,07185078	0,311832388	4,23	1,37947903	1,69131142	0,00034513408	
10.4	Вентканал 10 этажа	69,81	0,734496	7573,89446	0,0344517	0,07185078	0,311832388	4,23	1,37947903	1,69131142	0,00034513408	
11.1	участок сети м/у 1 и 2 этажом	55,61	0,152649	3016,96265	0,04277932	0,00201056	0,005629558	0,562447265	0,00792255	0,0135521	0,00000436419	
12.1	участок сети м/у 2 и 3 этажом	109,64	0,300958	5948,15411	0,03623007	0,00661875	0,018532506	0,520684503	0,02850901	0,04704152	0,00000389663	
13.1	участок сети м/у 3 и 4 этажом	162,64	0,446421	8823,09227	0,03294181	0,01324133	0,037075724	0,456608909	0,05500841	0,09208413	0,00000346690	
14.1	участок сети м/у 4 и 5 этажом	214,41	0,588513	11631,4124	0,03084456	0,02154696	0,060331487	0,398377	0,08340695	0,14373843	0,00000311428	
15.1	участок сети м/у 5 и 6 этажом	264,90	0,727102	14370,4942	0,02934941	0,03129575	0,087628096	0,349759107	0,11177778	0,19940588	0,00000283076	
16.1	участок сети м/у 6 и 7 этажом	314,10	0,862159	17039,7843	0,02821176	0,04229615	0,118429218	0,309727347	0,13917166	0,25760087	0,00000260129	
17.1	участок сети м/у 7 и 8 этажом	362,03	0,993706	19639,8789	0,02730809	0,05438794	0,152286243	0,276598412	0,16510549	0,31739173	0,00000241300	
17.2	участок сети м/у 8 этажом и выходям из сети	408,69	1,121777	22170,8939	0,02656806	0,06743243	0,188810798	0	0	0,1888108	0,00000113044	
18.1	участок сети м/у 1 и 2 этажом	55,61	0,152649	3016,96265	0,04277932	0,00201056	0,005629558	0,562447265	0,00792255	0,0135521	0,00000436419	
19.1	участок сети м/у 2 и 3 этажом	109,64	0,300958	5948,15411	0,03623007	0,00661875	0,018532506	0,520684503	0,02850901	0,04704152	0,00000389663	
20.1	участок сети м/у 3 и 4 этажом	162,64	0,446421	8823,09227	0,03294181	0,01324133	0,037075724	0,456608909	0,05500841	0,09208413	0,00000346690	
21.1	участок сети м/у 4 и 5 этажом	214,41	0,588513	11631,4124	0,03084456	0,02154696	0,060331487	0,398377	0,08340695	0,14373843	0,00000311428	
22.1	участок сети м/у 5 и 6 этажом	264,90	0,727102	14370,4942	0,02934941	0,03129575	0,087628096	0,349759107	0,11177778	0,19940588	0,00000283076	
23.1	участок сети м/у 6 и 7 этажом	314,10	0,862159	17039,7843	0,02821176	0,04229615	0,118429218	0,309727347	0,13917166	0,25760087	0,00000260129	
24.1	участок сети м/у 7 и 8 этажом	362,03	0,993706	19639,8789	0,02730809	0,05438794	0,152286243	0,276598412	0,16510549	0,31739173	0,00000241300	
24.2	участок сети м/у 8 этажом и выходям из сети	408,69	1,121777	22170,8939	0,02656806	0,06743243	0,188810798	0	0	0,1888108	0,00000113044	

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОТЕРИ ТРОЙНИКИ ПОТЕРИ ВЕНТКАНАЛЫ

Файл Гла Вст Раз Фои Даг Рел Виц

Q42

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Этаж	Уч	Расход воздуха L, м ³ /ч	Температурная разность Δt, Па	Ветровое давление P _в , Па	Потери давления в вентканалах Σ(R*λ) _{вент} , Па	Давление вентилатора Σ(R*λ) _{вент} , Па	Потери давления на притоке Σ(R*λ) _{приток} , Па
1	1.1	55,61	-	0	-	-	30,75990255
1	1.2	55,61	-	0	-	-	30,75990255
1	1.3	55,61	21,14389996	0	1,004208353	11,875946	-
1	1.4	55,61	21,14389996	0	1,004208353	11,875946	-
2	2.1	54,03	-	0	-	-	29,05285458
2	2.2	54,03	-	0	-	-	29,05285458
2	2.3	54,03	19,24584402	0	1,267715182	12,31892322	-
2	2.4	54,03	19,24584402	0	1,267715182	12,31892322	-
3	3.1	53,00	-	0	-	-	27,96252034
3	3.2	53,00	-	0	-	-	27,96252034
3	3.3	53,00	17,54769808	0	0,800614064	12,61048868	-
3	3.4	53,00	17,54769808	0	0,800614064	12,61048868	-
4	4.1	51,77	-	0	-	-	26,69800317
4	4.2	51,77	-	0	-	-	26,69800317
4	4.3	51,77	15,44955214	0	0,606338688	12,95920359	-
4	4.4	51,77	15,44955214	0	0,606338688	12,95920359	-
5	5.1	50,49	-	0	-	-	25,41586661
5	5.2	50,49	-	0	-	-	25,41586661
5	5.3	50,49	13,5514062	0	0,499421192	13,32436112	-
5	5.4	50,49	13,5514062	0	0,499421192	13,32436112	-
6	6.1	49,20	-	0	-	-	24,158527
6	6.2	49,20	-	0	-	-	24,158527
6	6.3	49,20	11,6326026	0	0,430226671	13,69249968	-
6	6.4	49,20	11,6326026	0	0,430226671	13,69249968	-
7	7.1	47,93	-	0	-	-	22,93713804
7	7.2	47,93	-	0	-	-	22,93713804

Рисунок 2.12 – Скриншоты программы на этапе представления результатов расчета: а – потери давления на участках; б – расходы воздуха

2.3. Графический метод расчета совместной работы вентиляторов в сети воздуховодов

2.3.1. Общие положения

С целью расчета распределения потоков воздуха в простых аэродинамических сетях на практике в ряде случаев до сих пор применяются графические и графо-аналитические методы [7, 13, 17, 38, 41, 46, 48, 89, 95], не требующие решения систем нелинейных уравнений.

Одной из таких простых задач для систем вентиляции зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами является прогнозирование работы вентиляторов в сети воздуховодов в пределах одного сборного вентиляционного канала, включающего каналы-спутники.

В диссертационной работе графический подход к решению подобных задач был усовершенствован и использован для оценки корректности применения разработанной математической модели.

Традиционный подход к расчету и проектированию систем вентиляции заключается в подборе вентиляторов, обеспечивающих требуемые расходы воздуха на отдельных участках сети [7, 111–113, 134].

Однако на практике возникает необходимость решения задач прогнозирования совместной работы вентиляторов в сети воздуховодов не только при проектировании системы вентиляции, но и при оценке эксплуатационного состояния системы при включении или выключении вентилятора на одном из участков. Такого рода задачи принято называть «обратными» задачами.

2.3.2. Решение обратной задачи аэродинамического расчета сети с одним вентилятором

Рассмотрим задачу прогнозирования (расчета) распределения потоков воздуха в сети вентиляционных каналов, оснащенных одним вентилятором. В качестве наиболее простого примера можно привести вытяжную систему вентиляции, удаляющую воздух из двух помещений (рисунок 2.13). На выходе из сети установлен вентилятор с известной характеристикой. Известны длины, диаметры и абсолютная шероховатость (материал) воздуховодов. Необходимо определить расходы удаляемого воздуха для каждого помещения.

Обратную задачу аэродинамического расчета предлагается решать с помощью построения характеристики сети. Решение задачи по данному методу основано на положениях «прямой» задачи аэродинамического расчета, представленных в работах [7, 111–113].

Согласно «прямой» задаче расходы воздуха на участках сети будут равны требуемым в случае, если потери давления от вентилятора до каждой точки выхода (входа) воздуха из сети будут одинаковыми.

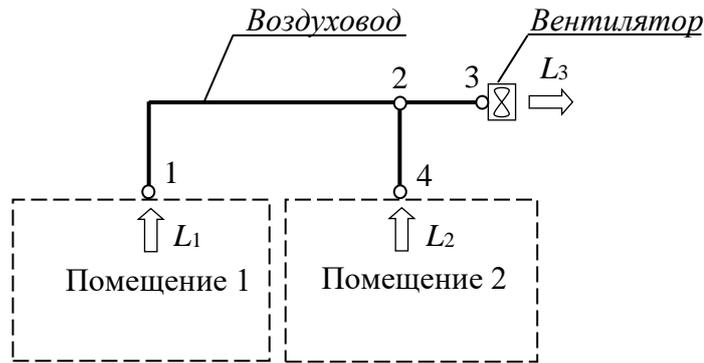


Рисунок 2.13 – Расчетная схема системы вентиляции двух помещений с одним вентилятором

Основываясь на данном условии, принято, что оно будет справедливо и при обратной задаче, так как при установившемся режиме работы вентилятора эти потери давления должны быть равны, из чего следует, что характеристика сети для каждого случая равна (одна и та же кривая на графике). Таким образом, последовательно (с определенным шагом) задаваясь расходом воздуха, создаваемого вентилятором, можно определить суммарные потери давления в сети.

В соответствии с [17, 18, 38, 40, 41, 89, 139] режим работы вентилятора определяется точкой пересечения характеристики сети и характеристики вентилятора, однако в данных работах аэродинамическая сеть, на которую работает вентилятор, как правило, представляет собой линейный участок сети, не имеющий ответвлений, что значительно упрощает задачу. Решение подобных задач для разветвленных сетей в известных работах отсутствуют. Неоднозначность решения задачи для разветвленных сетей заключается в том, что при наличии ответвлений, необходимо задаваться расходами воздуха на них. То есть для получения решения (определения суммарных потерь давления) необходимо определить потери давления в точках смешения потоков (потери давления на тройниках). В свою очередь, для определения данных потерь, необходимо чтобы были известны расходы воздуха на ответвлениях тройника. Проблема заключается в том, что расходы воздуха на ответвлениях являются искомыми величинами.

Данную проблему предлагается решать методом последовательных приближений. Начиная с наиболее удаленного от вентилятора тройника (крестовины), задаются различными величинами суммарного расхода воздуха после ответвлений. Для каждого суммарного расхода определяется соотношение расходов воздуха на ответвлениях, при которых суммарные потери давления на ответвлениях будут равны. Далее, зная соотношения расходов в наиболее удаленном тройнике (крестовине), производят аналогичный расчет следующего, в направлении вентилятора, тройника (крестовины). В результате, после расчета последнего тройника (крестовины), задаваясь различными значениями суммарного расхода воздуха, подаваемого (удаляемого) вен-

тилятором, определяются расходы воздуха на всех ответвлениях и суммарные потери давления в сети, после чего строится характеристика сети.

Особенность предлагаемого метода заключается в построении характеристики сети без использования сложных номограмм и решения систем нелинейных уравнений. На полученную характеристику накладывается характеристика вентилятора, и определяются расходы воздуха через все участки аэродинамической сети.

Последовательность расчета имеет следующий вид:

- последовательное определение суммарных потерь давления на каждом ответвлении тройников (крестовин) при различных суммарных расходах воздуха;

- определение суммарных потерь давления от вентилятора до каждой точки выхода (входа) воздуха из сети при задании различных расходов воздуха, подаваемого (удаляемого) вентилятором;

- определение расходов воздуха на ответвлениях, при которых соблюдается условие равенства суммарных потерь давления от вентилятора до каждой точки выхода воздуха из сети (таким образом, определяется распределение потоков воздуха в сети при различных расходах;

- построение характеристики сети по полученным расходам воздуха и потерям давления;

- наложение характеристики вентилятора на полученную характеристику сети;

- установление режима работы данного вентилятора (точка пересечения характеристики сети и характеристики вентилятора), то есть определение расхода воздуха, подаваемого (удаляемого) вентилятором;

- определение расходов воздуха во всех точках сети для полученного значения суммарного расхода воздуха.

На рисунке 2.14 представлена последовательность решения обратной задачи через построение характеристики сети на простейшем примере.

Достоинством предлагаемого метода является то, что после построения характеристики сети можно быстро определить режим работы любого другого вентилятора, устанавливаемого в данную точку сети (например, при замене первоначально выбранного (расчетного) вентилятора на вентилятор с другой характеристикой). В итоге не требуется заново производить расчеты, а достаточно наложить новую характеристику вентилятора на характеристику сети.

Более сложным является решение обратных задач для систем вентиляции трех и более помещений. В подобных задачах увеличивается количество участков, на которых необходимо увязывать потери давления, и соответственно увеличивается количество производимых итераций.

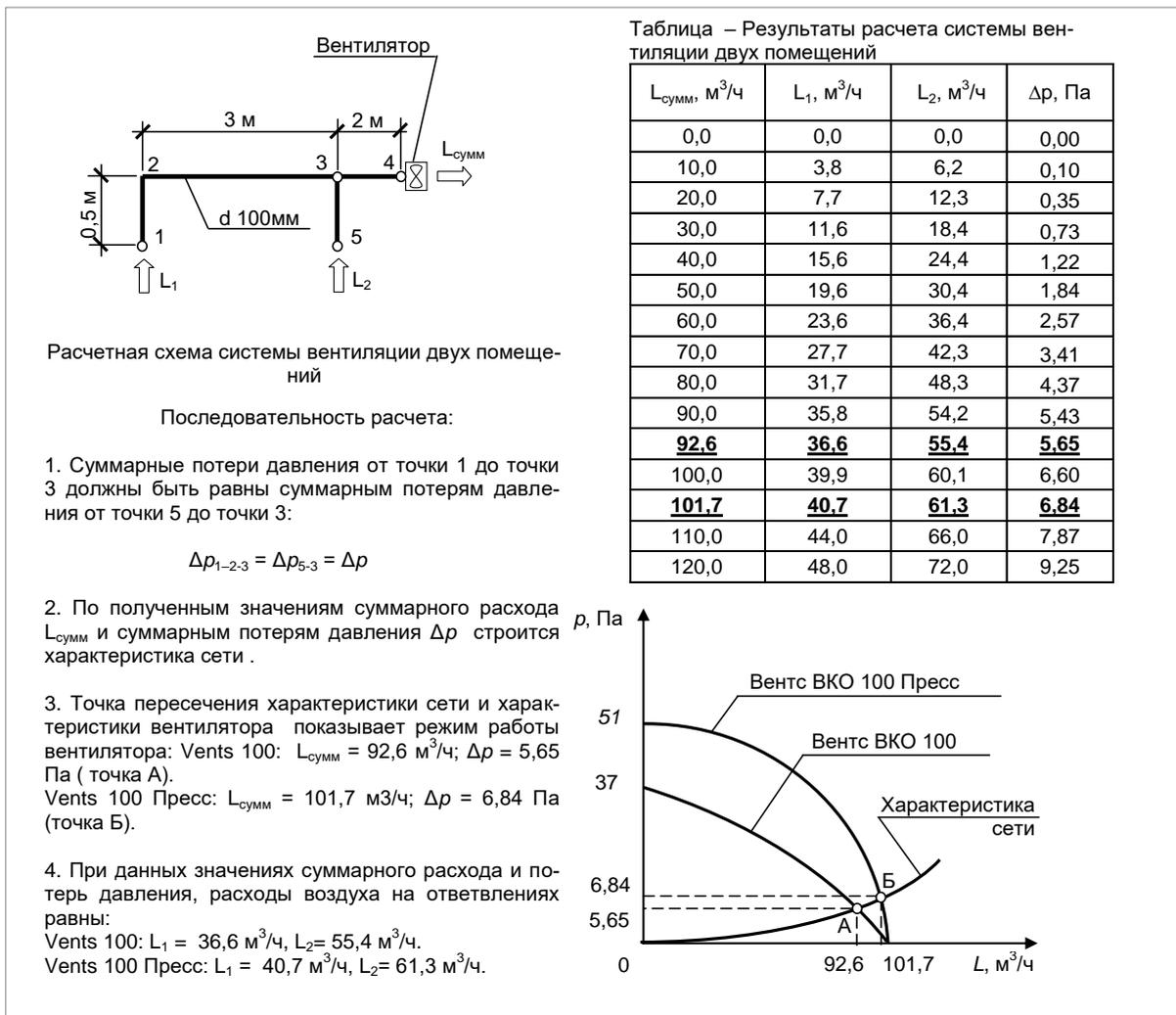


Рисунок 2.14 – Пример расчета системы вентиляции двух помещений с одним вентилятором

Рассмотрим решение подобной задачи через построение характеристики сети на примере аэродинамической сети, в которой воздух удаляется из четырех помещений (рисунок 2.15). Для побуждения воздуха в точке 5 установлен вентилятор с известной характеристикой.

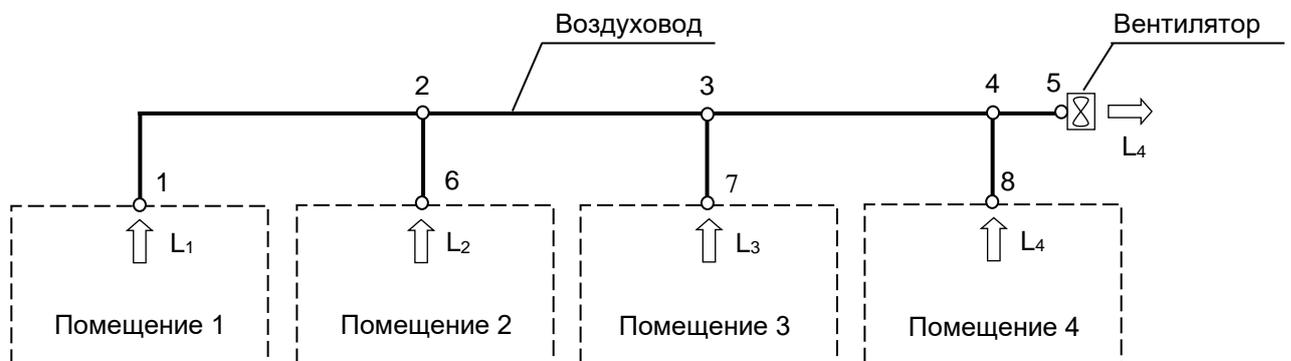


Рисунок 2.15 – Расчетная схема системы вентиляции четырех помещений

Решение подобных задач предлагается начинать с увязки наиболее удаленных от вентилятора участков. В данном примере в первую очередь увязываются потери давления на участках 1–2 и 6–2, после чего увязываются потери на участках 1–2–3, 6–2–3 и 7–3. Заканчивается увязка равенством потерь давлений участков 1–2–3–4–5, 6–2–3–4–5, 7–3–4–5 и 8–4–5.

Пример расчета обратной задачи для системы вентиляции четырех помещений по данному методу приведен на рисунке 2.16.

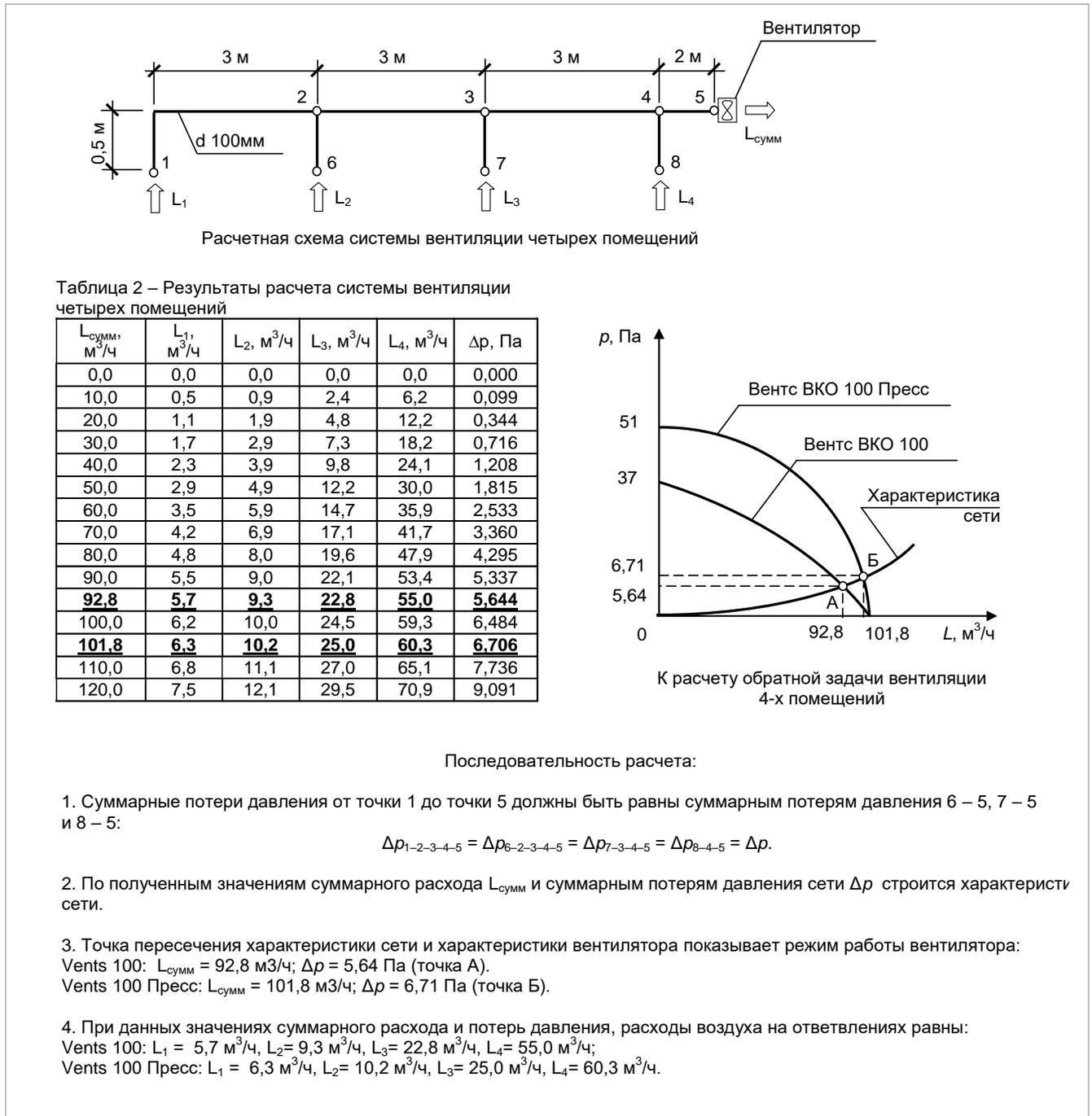


Рисунок 2.16 – Пример расчета системы вентиляции четырех помещений с одним вентилятором

Расчет обратной задачи по данному методу при большем количестве помещений выполняется аналогично.

Преимуществом предлагаемого метода решения обратной задачи является возможность определения режима работы вентилятора с седлообразной характеристикой (рисунок 2.17).

Вентилятор с седлообразной характеристикой при одном и том же давлении может подавать различное количество воздуха (L_1 , L_2 , L_3). Построение характеристики сети позволяет определить, в каком именно режиме будет работать данный вентилятор (рисунок 2.17, точка А).

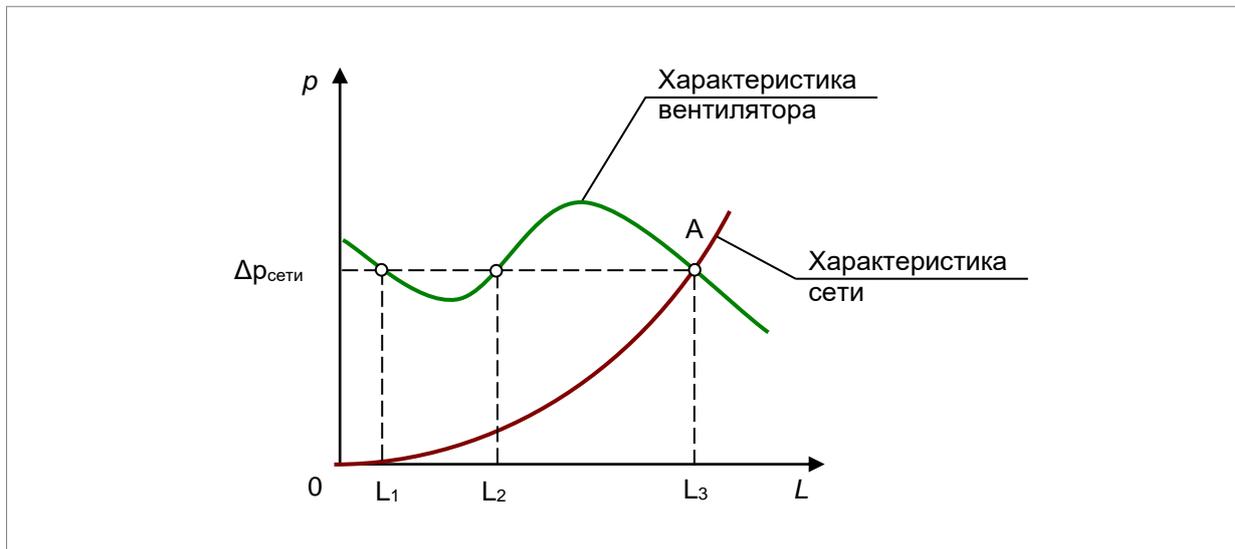


Рисунок 2.17 – Пример определения режима работы вентилятора с седлообразной характеристикой

2.3.3. Решение обратной задачи расчета совместной работы нескольких вентиляторов в аэродинамической сети

При подключении к сети нескольких вентиляторов расчет усложняется. В общем случае постановка задачи может быть сформулирована следующим образом: к каналам (воздуховодам) вытяжной системы вентиляции подключены вентиляторы с заданными характеристиками «давление – расход воздуха». Вентиляторы могут работать как одновременно, так и разновременно. Необходимо определить расход воздуха на отдельных участках сети при различных режимах работы вентиляторов.

Принципиальная схема вытяжных каналов, характеризующая общую постановку задачи, представлена на рисунке 2.18.

Известен ряд работ [17, 18, 41, 89, 139], описывающих решение задачи учета совместной работы вытяжных вентиляторов в сети воздуховодов.

Последовательность расчета совместной работы вентиляторов при известных характеристиках вентиляторов и геометрических размерах элементов (участков) аэродинамической сети согласно работам [17, 18, 41, 89, 139] может быть представлена следующим образом:

- определяются суммарные потери давления воздуха на каждом участке сети;

- из характеристик каждого вентилятора вычитаются суммарные потери давления до точки смешения;
- полученные характеристики складываются (суммируется расход при одинаковой величине давления);
- суммарные потери давления на последнем участке принимаются за характеристику сети;
- точка пересечения характеристики сети и суммарной характеристики вентиляторов является рабочей точкой сети, показывающей расход и давление воздуха на выходе из сборного канала;
- режим работы каждого вентилятора в точке смешения определяется линией постоянных давлений, проведенной через рабочую точку до пересечения с характеристиками вентиляторов в точке смешения.

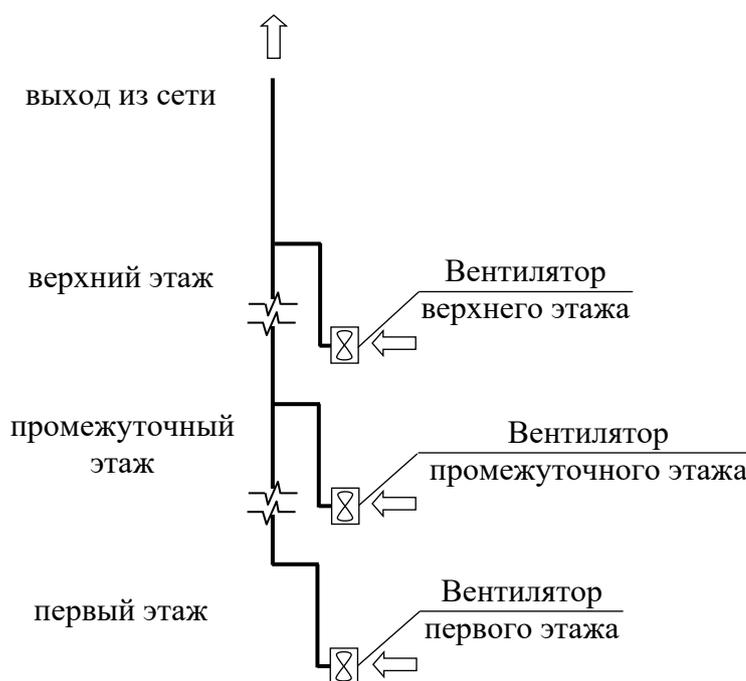


Рисунок 2.18 – Принципиальная схема вытяжных каналов при совместной работе нескольких вентиляторов в сети

Однако, при решении подобных задач, проблема возникает уже на первом этапе – определении суммарных потерь давления воздуха на участках аэродинамической сети (потерь давления в местных сопротивлениях при смешении потоков).

В работе [17] суммарные потери давления (линейные и местные) заданы определенной величиной, а в работах [41, 89, 139] примеры расчета вообще отсутствуют.

Если на участке имеется смешение потоков (тройник или крестовина), то для определения местных потерь давления должны быть известны расходы воздуха на всех его ответвлениях. В этом и заключается основная проблема при решении подобных задач, так как при задании рас-

хода одного из вентиляторов, работающем на ответвление, неизвестны расходы воздуха на других ответвлениях.

Данную проблему предлагается решать исходя из того, что, при совместной работе в сети, вентиляторам необходимо преодолеть одинаковое сопротивление, так как, при установившемся режиме, суммарные потери давления после точки смешения должны быть равны. В этом случае при различных перепадах давлений, расходы воздуха на ответвлениях будут определяться точками пересечений линий постоянных давлений и характеристик вентиляторов.

Рассмотрим определение коэффициентов местных сопротивлений (КМС) тройников на конкретном примере (рисунок 2.19). В точке 1 работает вентилятор 1 с характеристикой $p_1 = f(L_1)$ (рисунок 2.19 б, кривая 1). В точке 2 работает вентилятор 2 с характеристикой $p_2 = f(L_2)$ (рис. 2.19 б, кривая 2). В точке 3 происходит смешение потоков воздуха, после чего воздух поступает на участок 3.

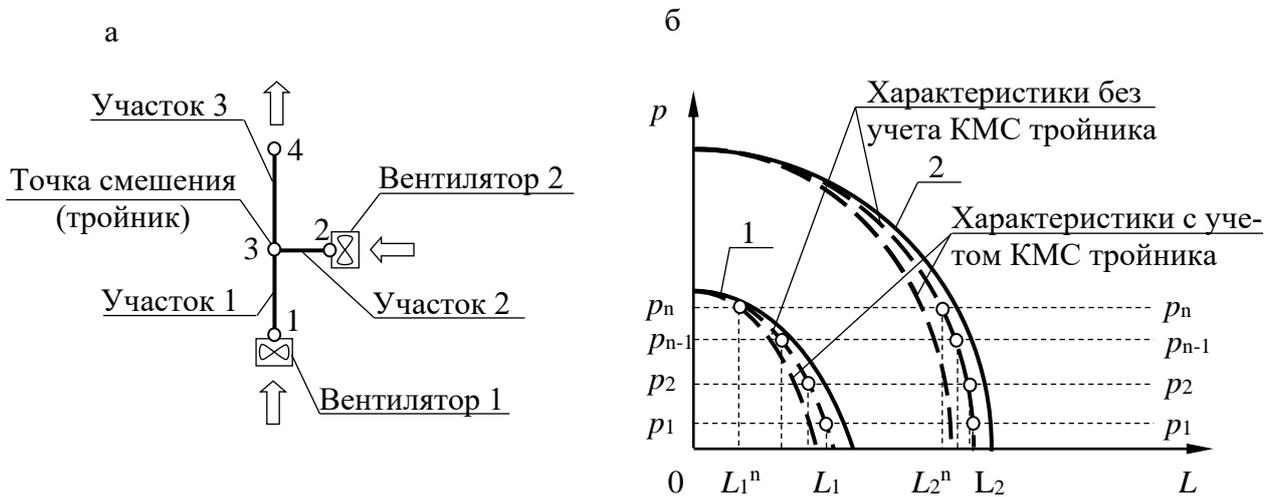


Рисунок 2.19 – Определение коэффициента местного сопротивления тройника при совместной работе вентиляторов: а - расчетная схема; б – графическая интерпретация решения задачи

Если суммарные потери давления после точки смешения (сопротивление последнего участка) будут равны p_1 , то расход вентилятора 1 будет равен L_1 , а вентилятора 2 – L_2 . Расход воздуха после точки смешения будет равен $L_3 = L_1 + L_2$. Зная диаметры, по формулам [36, 38] или таблицам [111, 112, 117] можно определить КМС тройника при потерях давления на последнем участке p_1 . Аналогичным образом могут быть определены КМС тройника при потерях давления на последнем участке $p_2 - p_n$ (расходы L_1^n и L_2^n).

Следует отметить, что для того, чтобы задаваться расходами воздуха более точно, необходимо определить и вычесть из характеристик вентиляторов суммарные потери давления на индивидуально преодолеваемых вентиляторами участках до точки смешения без учета КМС тройника (крестовины).

На основании вышеизложенного, был разработан алгоритм решения задачи совместной работы двух и более вентиляторов в сети воздуховодов (рисунок 2.20).

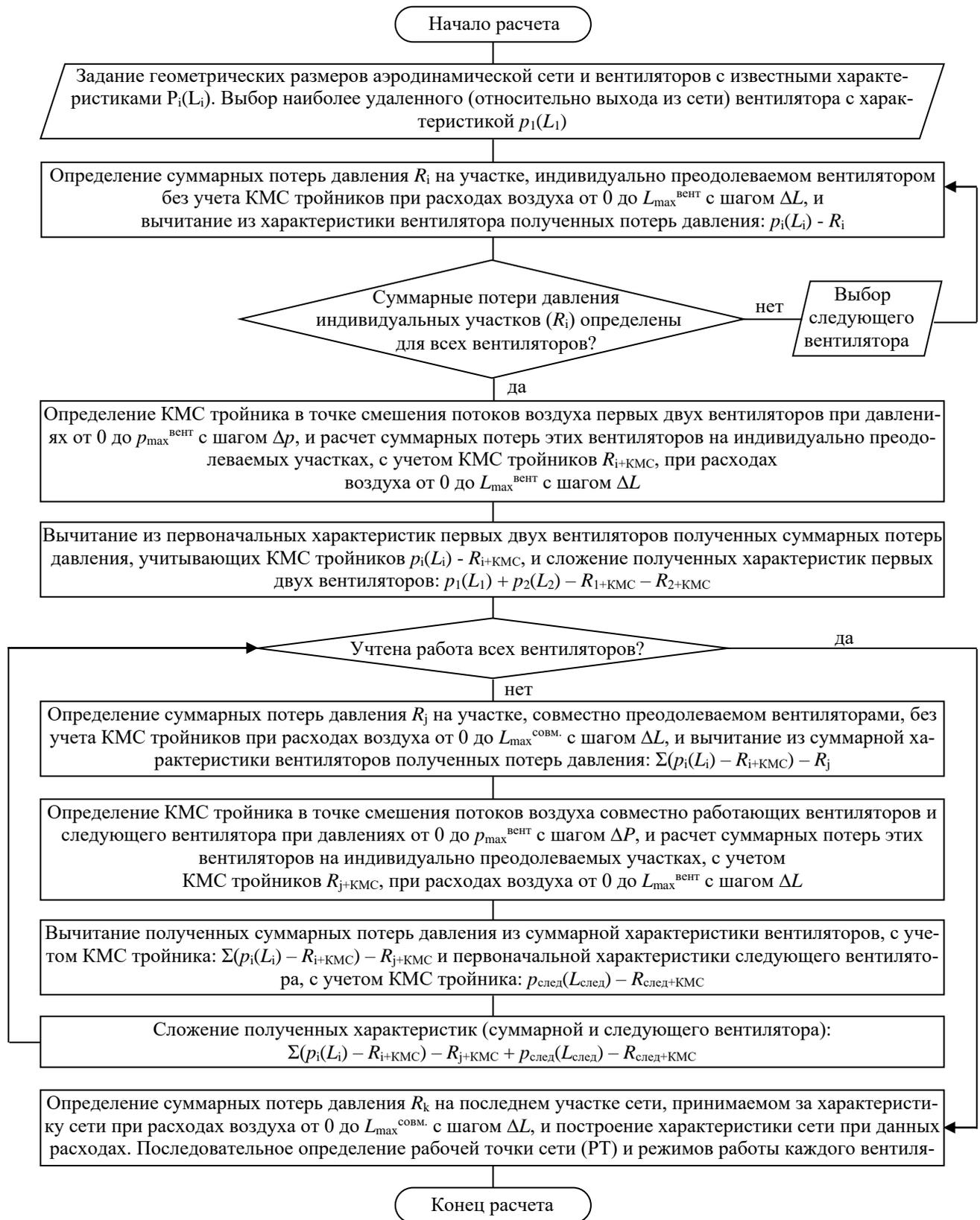


Рисунок 2.20 – Алгоритм решения задачи совместной работы двух и более вентиляторов в сети воздуховодов

Пример решения задачи совместной работы двух вентиляторов с различными характеристиками по данному алгоритму представлен на рисунке 2.21. Вентилятор 1, имеющий характеристику 1, преодолевает сопротивление индивидуального участка 1, вентилятор 2, имеющий характеристику 2, преодолевает сопротивление индивидуального участка 2. Суммарные потери давления воздуха на участках 1, 2 без учета КМС тройников равны R_1, R_2 . Суммарные потери давления воздуха на участках 1, 2 с учетом КМС тройников – $R_{1+КМС1}, R_{2+КМС2}$. Характеристики вентиляторов 1, 2 в точке смешения равны $1-R_{1+КМС1}$ и $2-R_{2+КМС2}$. Суммарная характеристика вентиляторов в точке смешения – $1+2-R_{1+КМС1}-R_{2+КМС2}$. Суммарные потери давления на последнем участке R_3 принимаются за характеристику сети.

Точка РТ – рабочая точка сети, показывающая давление и расход воздуха на выходе из сети. Точки А₁ и Б₁ характеризуют режим работы каждого вентилятора в точке смешения, точки А и Б – режим каждого вентилятора на входе в сеть.

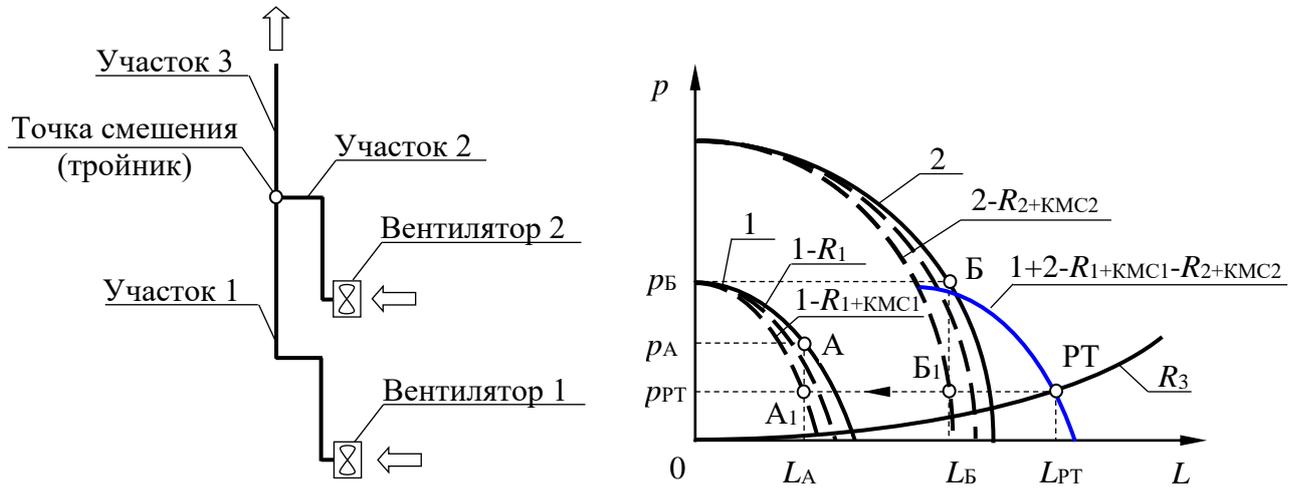


Рисунок 2.21 – Расчетная схема (а) и режим совместной работы вентиляторов (б) к решению задачи совместной работы двух вентиляторов в сети вытяжных каналов

Более сложной задачей является расчет совместной работы трех и более вентиляторов.

В качестве примера на рисунке 2.22 представлена расчетная схема сети воздуховодов с четырьмя вентиляторами. Последовательность определения режимов работы вентиляторов представлена на рисунках 2.23, 2.24 для случаев, когда характеристики вентиляторов одинаковы (рисунок 2.23) или различны (рисунок 2.24).

Вентиляторы 1-го – 4-го этажей имеют характеристики 1 – 4 и индивидуально преодолевают участки, суммарные потери давления которых, включая коэффициенты местных сопротивлений тройников, равны соответственно $R_1 – R_4$. Кривая 5 – есть результат совместной работы первых двух вентиляторов, кривая 6 – 1, 2 и 3 вентиляторов, кривая 7 – всех четырех вентиляторов. Кривая 8 является характеристикой сети.

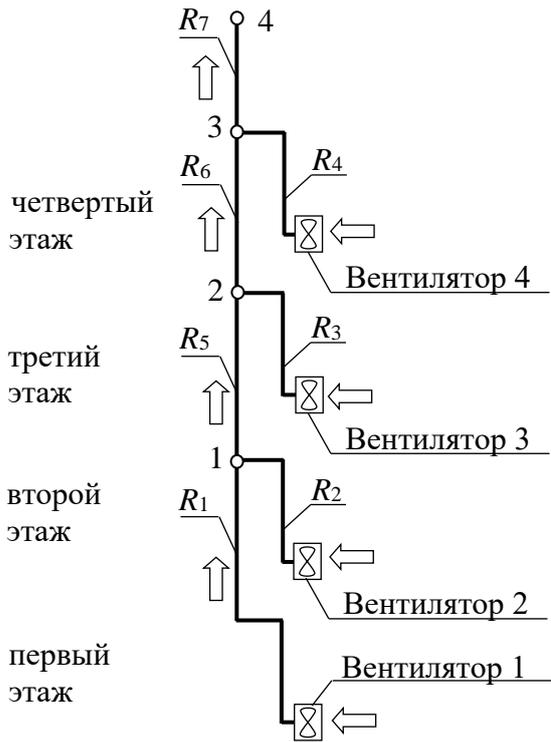


Рисунок 2.22 – Расчетная схема к решению задачи совместной работы четырех вентиляторов в сети воздуховодов

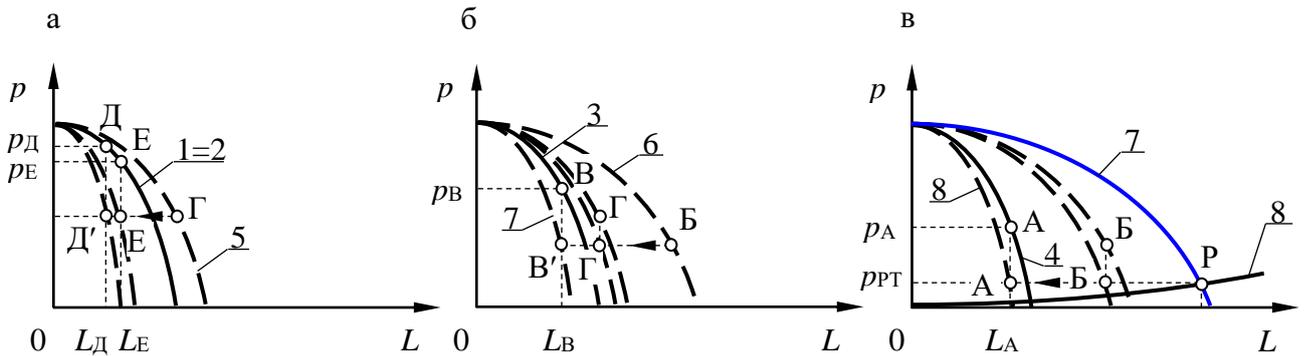


Рисунок 2.23 – Последовательное определение режимов совместной работы нескольких вентиляторов в сети воздуховодов для случая, когда характеристики вентиляторов одинаковы: а - 1 и 2 вентиляторов; б - 1, 2 и 3 вентиляторов; в - 1, 2, 3 и 4 вентиляторов

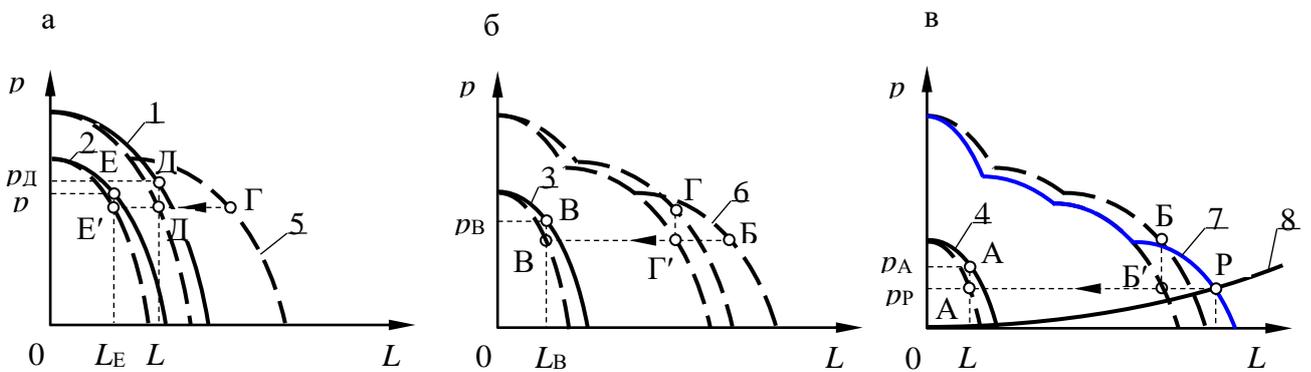


Рисунок 2.24 – Последовательное определение режимов совместной работы нескольких вентиляторов в сети воздуховодов для случая, когда характеристики вентиляторов различны: а - 1 и 2 вентиляторов; б - 1, 2 и 3 вентиляторов; в - 1, 2, 3 и 4 вентиляторов

2.4. Оценка корректности разработанных методов

2.4.1. Общая постановка задачи

Оценка корректности разработанной математической модели, используемой для расчета распределения потоков воздуха в системах механической вытяжной вентиляции зданий с индивидуальными вентиляторами, выполнена посредством:

– сопоставления результатов расчетов контрольного примера вытяжного вентиляционного канала с вентиляторами, установленными на каналах-спутниках, полученных на основе разработанной математической модели с результатами расчетов, выполненных графическим методом;

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

В качестве контрольного примера принята модель вытяжного вентиляционного канала диаметром 150 мм общей длиной 10,16 м с каналами-спутниками диаметром 100 мм, присоединенными к сборному каналу через этаж. На входе в каждый канал-спутник установлены осевые вентиляторы марки «Домовент 100». Количество каналов-спутников – четыре. Материал воздуховодов – пластмасса.

Аналогичная модель была смонтирована в лаборатории, в качестве лабораторного стенда, на котором были проведены замеры фактических расходов воздуха. Общая схема модели вентиляционного канала и ее внешний вид приведены на рисунках 2.25, 2.26.

Контролируемый параметр – расход воздуха в каналах-спутниках.

Приборы и оборудование: анемометр Testo 417-2, психрометр Ассмана, рулетка по ГОСТ 7502-98, штангенциркуль по ГОСТ 166-89. Все приборы поверены в установленном порядке.

Температура воздуха при проведении испытаний – $t_{в} = + 20 \pm 2$ °С.

Относительная влажность воздуха – $\phi_{в} = 45 \pm 5\%$.

Режим работы – одновременно включены все вентиляторы в каналах-спутниках.

До начала расчетов и лабораторных испытаний проведены испытания аэродинамических характеристик вытяжных вентиляторов. Испытания выполнены в соответствии с ГОСТ 10921-90 [26]. Результаты испытаний вентиляторов «Домовент 100» приведены в приложении А.

При проведении расчетов характеристики вентиляторов принимались по результатам испытаний.

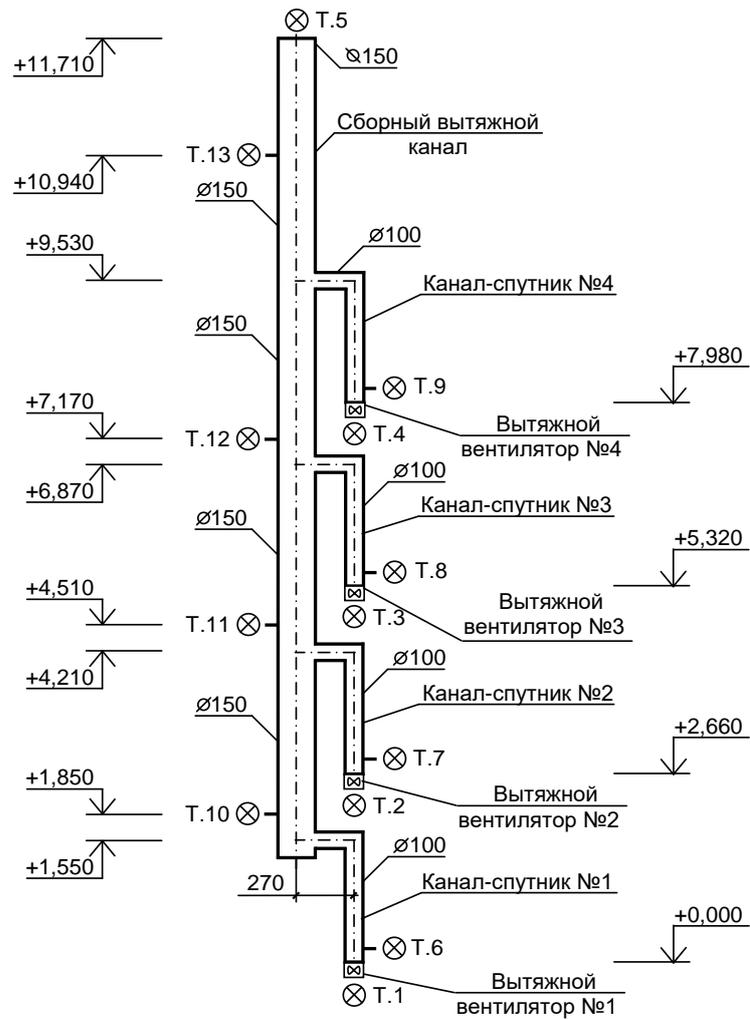


Рисунок 2.25 – Схема модели системы вентиляции с указанием точек замера расходов воздуха (Т.1 - Т.5) и перепадов давления (Т.6 - Т.13)



Рисунок 2.26 – Общий вид лабораторного стенда

2.4.2. Сопоставление результатов теоретических расчетов с результатами лабораторных испытаний

Теоретические расчеты модели вентиляционного канала, представленного на рисунке 2.25, выполнены:

- графическим методом по алгоритму, соответствующему рисунку 2.20;
- численным методом, на основе разработанной математической модели, по алгоритму, представленному на рисунке 2.7.

Результаты графического расчета приведены на рисунке 2.28.

Результаты расчета численным методом приведены в виде скриншота на рисунке 2.29.

Результаты испытаний в сопоставлении с результатами расчетов, выполненных при аппроксимации характеристик вентиляторов по формуле (2.9), приведены в таблице 2.3

Сопоставление результатов показывает 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. Например, при увеличении суммарных КМС в первом канале-спутнике на 3, невязка на этом и других участках сети составляет не более 3%.

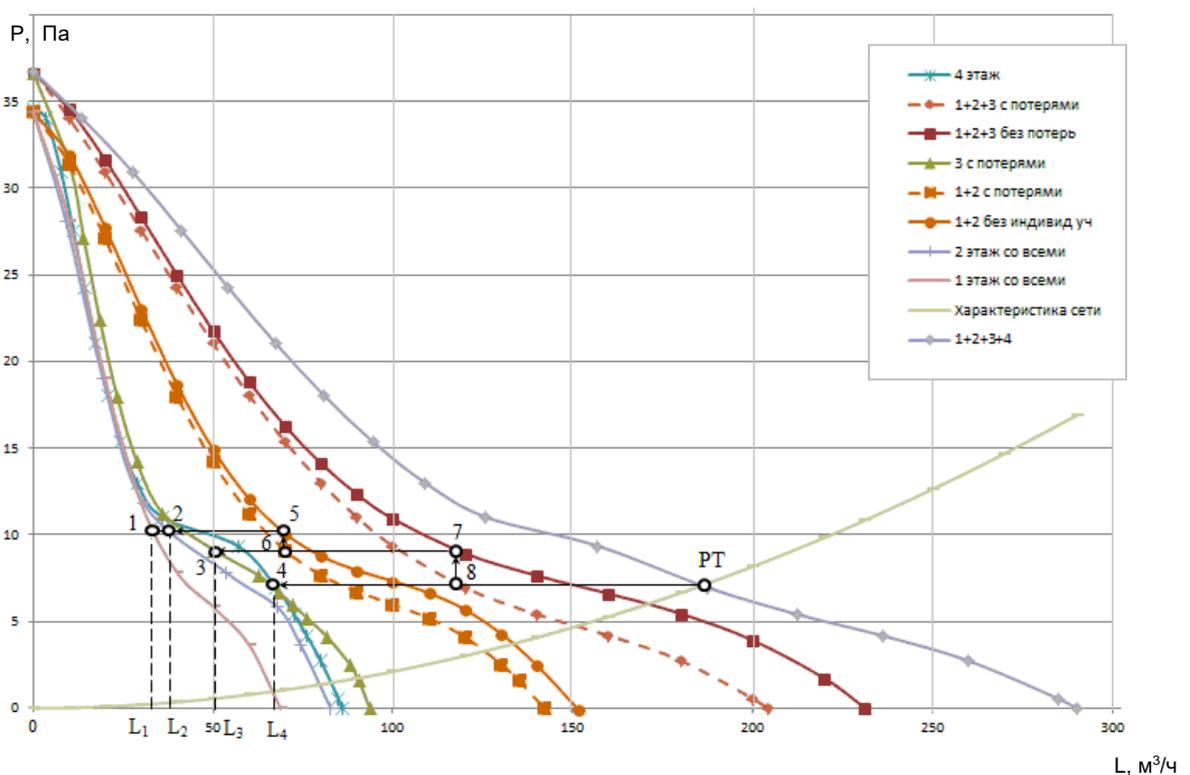


Рисунок 2.28 – Результаты расчета совместной работы четырех вентиляторов «Домовент 100», установленных в вентиляционном канале согласно рисунку 2.25, графическим методом

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ						
Уч	Расход воздуха L, м³/ч	Тепловой перепад давлений P _e , Па	Ветровое давление P _{ветр} , Па	Потери давления вентканалы Σ(S*L) _{уч} , Па	Давление вентиллятор Σ(S*L) _{вент} , Па	Потери давления на притоке Σ(S*L) _{приток} , Па
1	35,52	-	-	2,854919246	12,41	-
2	37,19	-	-	3,590148156	12,92	-
3	43,48	-	-	3,753082122	12,21	-
4	60,16	-	-	6,596279323	12,98	-
5	35,52	-	-	0,229325185	-	-
6	72,72	-	-	0,866004658	-	-
7	116,20	-	-	2,074213964	-	-
8	176,36	-	-	6,386024885	-	-

Рисунок 2.29 – Скриншот результатов расчета совместной работы четырех вентиляторов «Домовент 100», установленных в вентиляционных каналах согласно рисунку 2.25, численным методом

Таблица 2.3

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

Схема лабораторного стенда	№ участка	Расход удаляемого воздуха, м³/ч			Невязка замеров и расчетов, %	
		по замерам	по расчету численным методом	по расчету графическим методом	численным методом	графическим методом
	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. Температуре 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 «расход воздуха - перепад давлений» вентиляторов по формуле (2.16). 5. Суммарный расход воздуха по вентиляционному каналу определен сложением расходов воздуха (измеренных или рассчитанных) в каналах-спутниках 					

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.

Выводы по главе 2

1. Задача прогнозирования распределения воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами рассмотрена на основе математического моделирования воздушного режима здания и графических методов расчета совместной работы вентиляторов в сети воздуховодов.

2. Разработанная математическая модель базируется на известной теории гидравлических цепей и известных подходах к решению подобного рода задач моделирования воздушного режима зданий. В отличие от известных решений, использована полиномиальная зависимость задания аэродинамических характеристик элементов вентиляционной сети при составлении нелинейных уравнений, что позволяет более точно аппроксимировать характеристики вентиляторов, приточных и вытяжных вентиляционных устройств, и, в конечном счете, повысить точность результатов математического моделирования.

3. Усовершенствованный графический метод аэродинамического расчета позволяет решать «обратную» задачу аэродинамического расчета воздуховодов с одним или несколькими вентиляторами, совместно работающими в аэродинамической сети, а также проверить корректность разработанной математической модели. Методика расчета предусматривает получение решения, как при одинаковых, так и различных аэродинамических характеристиках вентиляторов.

4. Сопоставление результатов теоретических расчетов с результатами лабораторных испытаний, выполненное на примере модели вентиляционного канала с вытяжными вентиляторами, показывает достаточно хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных и позволяет сделать вывод о правомерности применения разработанной математической модели для прогнозирования распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЗДАНИЙ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ВЫТЯЖНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ

3.1. Постановка задачи

Расчет и проектирование систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами заключается в подборе геометрических параметров вытяжных каналов и воздуховодов и аэродинамических характеристик индивидуальных вентиляторов, обеспечивающих компенсацию потерь давления в приточных устройствах (клапанах) и в вытяжных каналах. При этом характеристики всех вентиляторов принимаются одинаковыми, а сами вентиляторы, считаются работающими одновременно.

Однако на стадии эксплуатации фактические условия могут существенно отличаться от проектных. В частности, индивидуальные вентиляторы как в пределах одной квартиры, так и разных квартир, могут выключаться (включаться) с учетом потребности жильцов, к вытяжным каналам могут подключаться кухонные вытяжки, на отдельных этажах могут открываться оконные створки, закрываться (регулироваться) приточные клапаны и т.п. На эти факторы могут накладываться изменение температуры наружного воздуха, направление и скорость ветра.

В свою очередь эффективность работы системы вентиляции в определенной мере может зависеть и от ее конструктивного решения – наличия теплого или холодного чердака, расположения вентиляционных каналов, наличия и места расположения регулирующих клапанов и др.

Цель исследований – анализ закономерностей распределения воздуха в системах вентиляции многоквартирных жилых зданий с децентрализованным механическим удалением воздуха 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 каналах обратных клапанов и (или) воздушных балансировочных клапанов (клапанов постоянного расхода воздуха).

Расчеты распределения потоков воздуха в системах вентиляции зданий выполнены на основе разработанной математической модели. Решение систем нелинейных уравнений, описывающих работу систем вентиляции заданной конфигурации осуществлялось методом обобщенного приведенного градиента с использованием программы Microsoft office Excel.

3.2. Результаты расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с вертикальными сборными каналами и каналами-спутниками

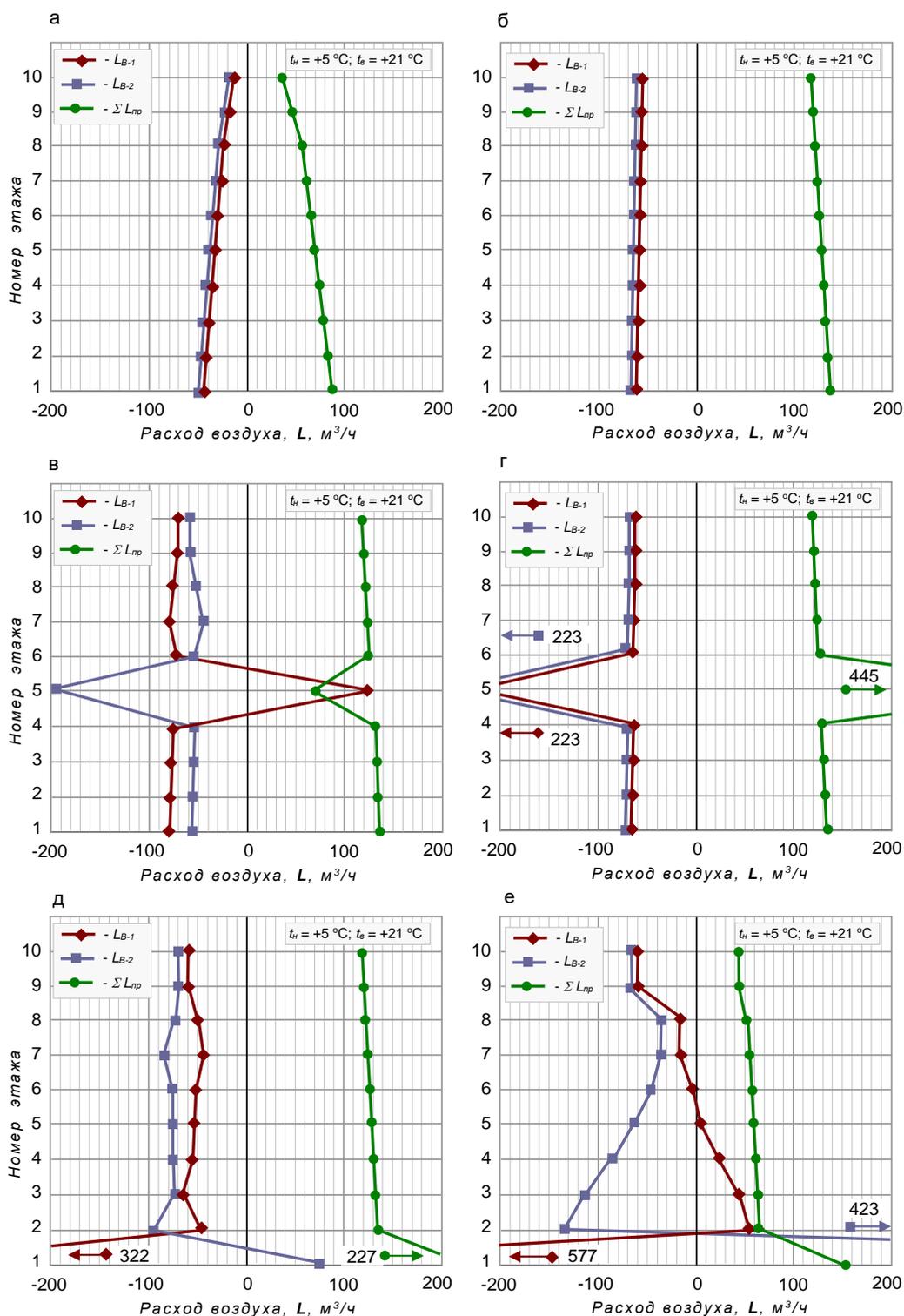
Отличительной особенностью систем вентиляции с вертикальными сборными каналами и каналами-спутниками, является подключение каналов-спутников к сборному каналу через этаж или через два этажа. Принципиальная схема данного типа вентиляции приведена на рисунке 2.1. Квартиры, расположенные друг над другом, в данной системе вентиляции являются узлами сети, соединенными вентиляционными каналами. В ряде многоквартирных зданий с системами вентиляции данного типа проведена серия расчетов.

В качестве примера на рисунке 2.8 приведена расчетная схема и граф системы вентиляции двухкомнатных квартир десятиэтажного жилого дома, подключенных к двум вытяжным вентиляционным каналам.

Результаты расчетов данной системы при варьировании ряда внешних и внутренних факторов, приведены на рисунке 3.1.

Анализ результатов расчетов позволил отметить следующие особенности:

- при выключении вентиляторов (система эксплуатируется как естественная, с гравитационным побуждением) требуемый воздухообмен не обеспечивается (см. рисунок 3.1 а); одна из основных причин – значительные потери давления в приточных устройствах.;
- установка вентиляторов в вытяжных каналах увеличивает воздухообмен, однако не все индивидуальные вентиляторы позволяют добиться требуемого воздухообмена (см. рисунок 3.1 б); необходим подбор вентиляторов и увязка их аэродинамических характеристик с потерями давления в вытяжных вентиляционных каналах и приточных устройствах;



Примечание: При $L < 0$ воздух удаляется, а при $L > 0$ поступает в квартиру.

Рисунок 3.1 – Результаты расчета системы вентиляции с индивидуальными вытяжными вентиляторами: 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

– изменение проектного режима работы системы вентиляции, в частности выключение или изменение характеристик отдельных вентиляторов (например, подключение к вентканалам кухонных вытяжек) 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 (см. рисунок 3.1 в);

– при подключении к вытяжным каналам кухонных вытяжек, возможно перетекание воздуха в квартиры других этажей вследствие создания подпора в сборном канале; при этом второй вентиляционный канал данной квартиры (например, расположенный в санузле) может быть «опрокинут» даже при работающем вентиляторе (см. рисунок 3.1 д, е);

– открытие створки окна в подобных системах приводит к резкому (в разы) увеличению воздухообмена данной квартиры и снижению расхода удаляемого воздуха из других квартир (см. рисунок 3.1 г);

– наилучшими 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.

3.3. Результаты расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с отдельными вертикальными каналами

В системах вентиляции с вертикальными отдельными каналами удаление воздуха из квартир разных этажей происходит по самостоятельным вытяжным каналам, не сообщающимися с каналами других этажей.

Принципиальная схема данного типа вентиляции приведена на рисунке 2.2 а.

Пример расчетной схемы и графа системы вентиляции с вертикальными отдельными каналами многоквартирного жилого дома приведен на рисунке 3.2.

Результаты расчетов данной системы при варьировании ряда внешних и внутренних факторов, представленные на рисунке 3.3, показывают, что устройство отдельных вытяжных каналов существенно повышает эксплуатационную надежность системы вентиляции и исключает перетекание воздуха между отдельными квартирами.

Однако и при этом конструктивном решении возможно опрокидывание вентиляционных каналов в пределах квартиры при выключении одного или обоих вентиляторов (см. рисунок 3.3 г) или подключении к каналу кухонной вытяжки (см. рисунок 3.3 е).

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

Закрытие приточных клапанов приводит к уменьшению воздухообмена в квартире и практически не сказывается на работе системы вентиляции других квартир (см. рисунок 3.3 б, д).

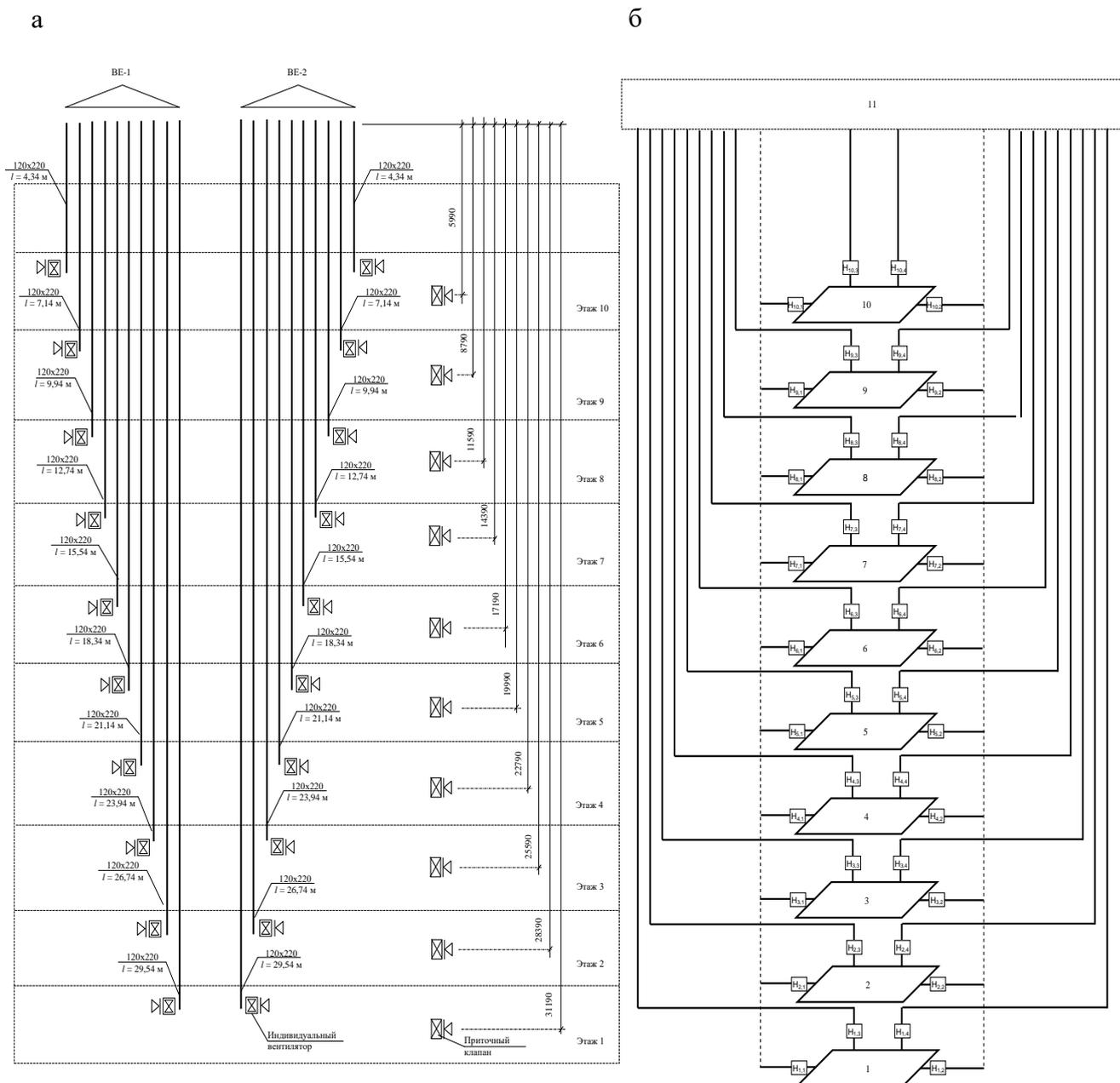


Рисунок 3.2 – Расчетная схема (а) и граф (б) системы вентиляции многоквартирного десятиэтажного жилого дома с отдельными вертикальными вентиляционными каналами

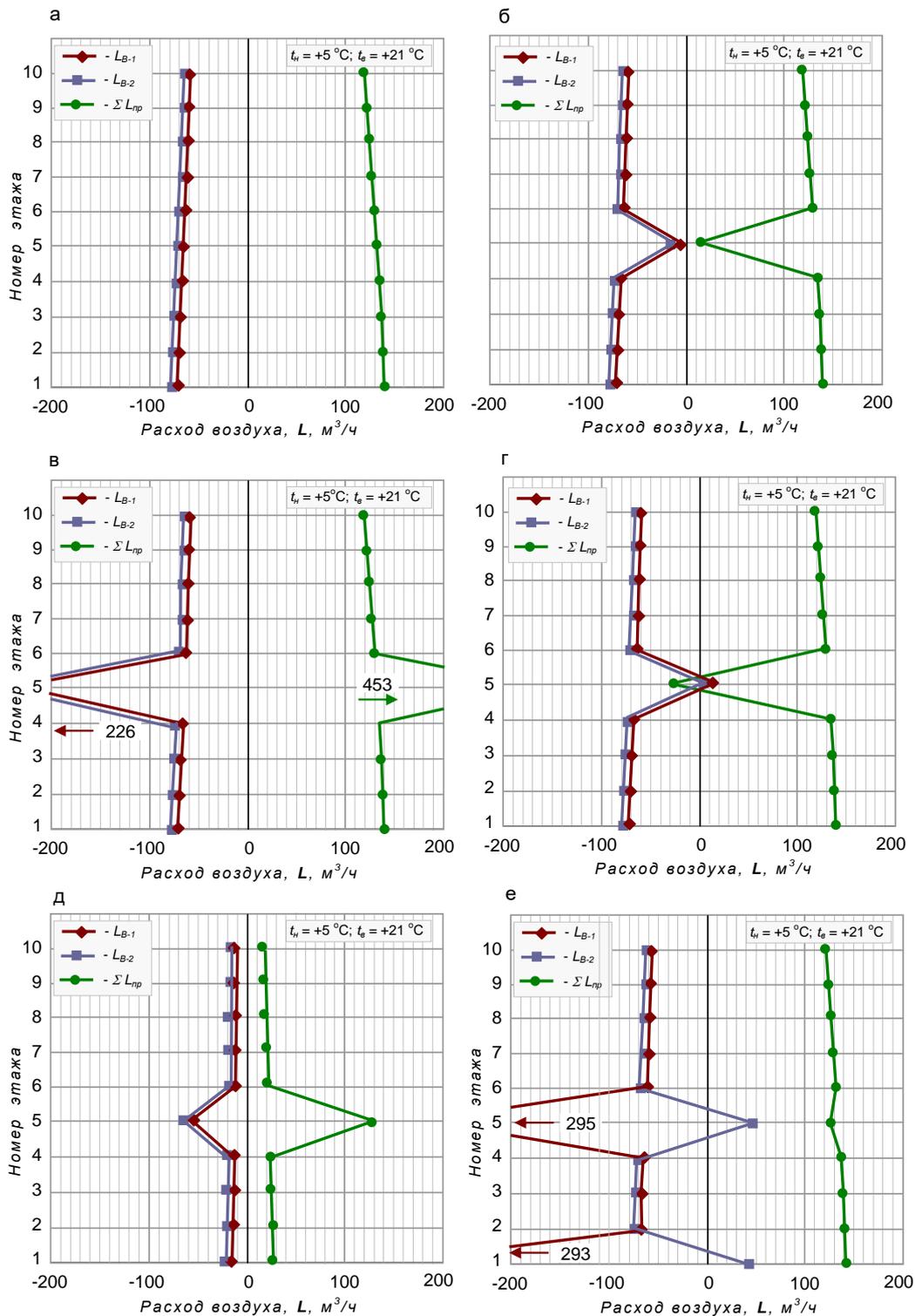


Рисунок 3.3 – Результаты расчета системы вентиляции с индивидуальными вытяжными вентиляторами: а – вентиляторы включены, приточные клапаны открыты; б – то же, на пятом этаже закрыты приточные клапаны; в – то же, на пятом этаже открыта створка окна; г – вентиляторы на всех этажах включены, приточные клапаны открыты, на пятом этаже выключены оба вентилятора; д – то же, приточные клапаны закрыты, за исключением пятого этажа; е – вентиляторы на всех этажах включены, приточные клапаны открыты, на первом и пятом этаже к ветканалам подключены кухонные вытяжки

3.4. Результаты расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с горизонтальными сборными каналами на чердаке

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.

Данного рода системы достаточно широко использовались в пятиэтажных зданиях постройки 50-х – 70-х годов и продолжают эксплуатироваться в настоящее время.

Системы вентиляции с горизонтальными сборными каналами проектировались, как правило, с естественным побуждением движения воздуха. Однако на практике к вытяжным каналам подключались вытяжные вентиляторы, кухонные вытяжки. В результате изначально запроектированная естественная система вентиляции продолжала эксплуатироваться как смешанная, с частичной работой вентканалов с механическим побуждением.

На рисунке 3.4 приведен граф подобной системы вентиляции. Включение вентилятора в любой из квартир создает избыточное давление в сборном канале и соответственно приводит либо к уменьшению расходов удаляемого воздуха из других квартир, либо к опрокидыванию направления движения воздуха и его перетеканию из сборного канала в другие квартиры.

Результаты расчета некоторых частных случаев системы вентиляции с горизонтальными сборными каналами приведены на рисунках 3.5, 3.6.

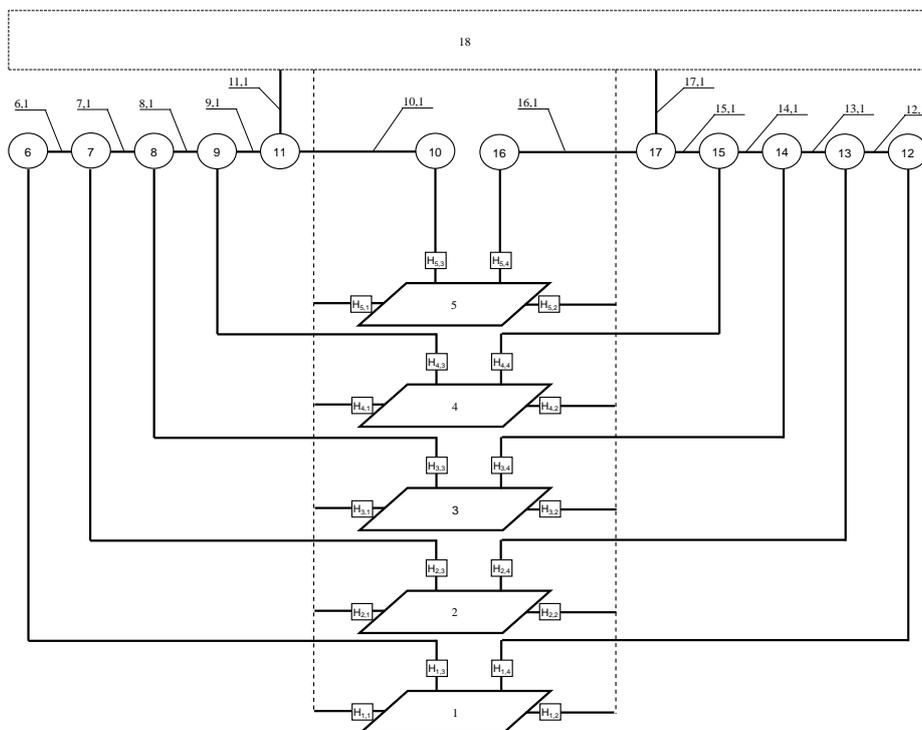
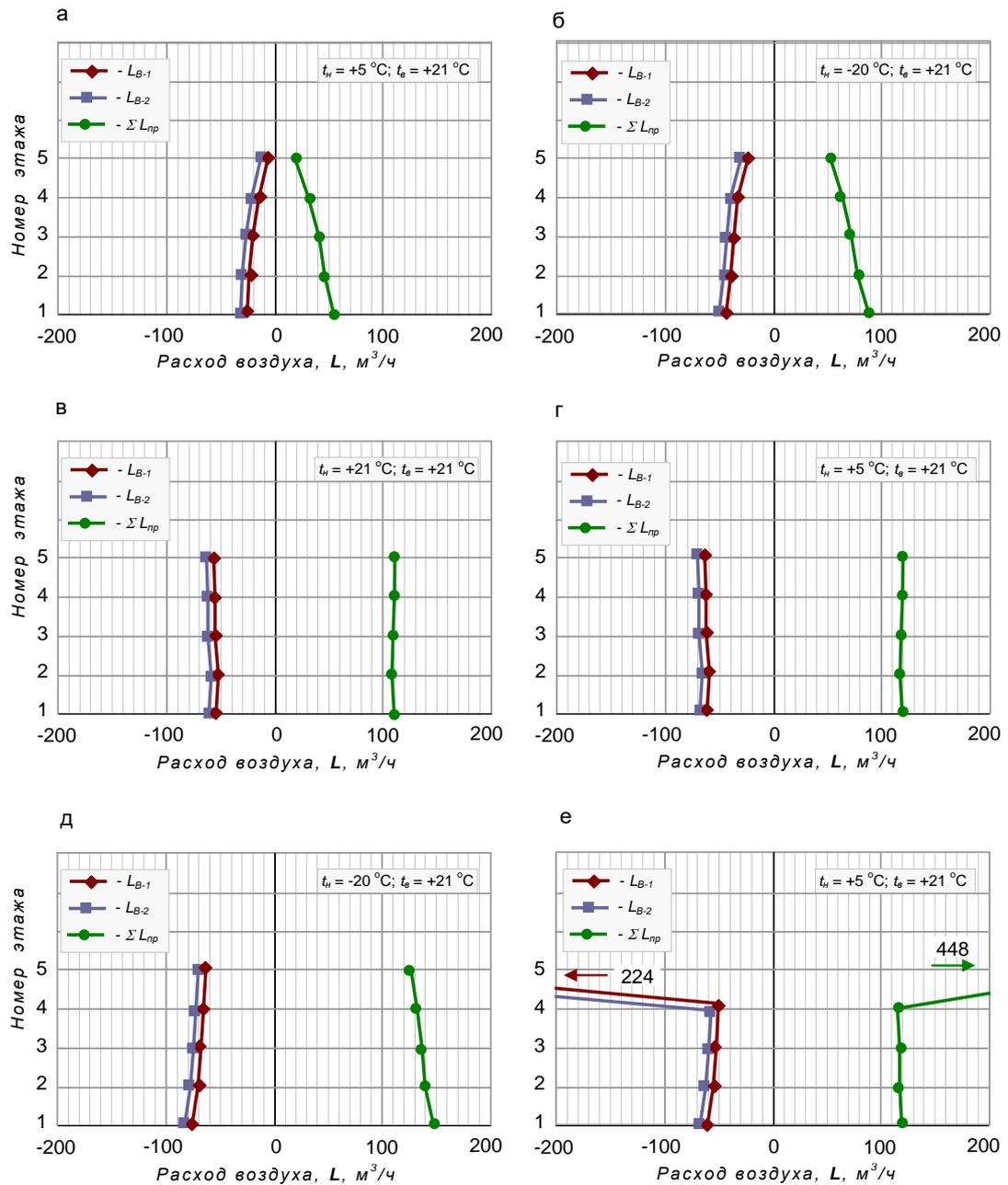
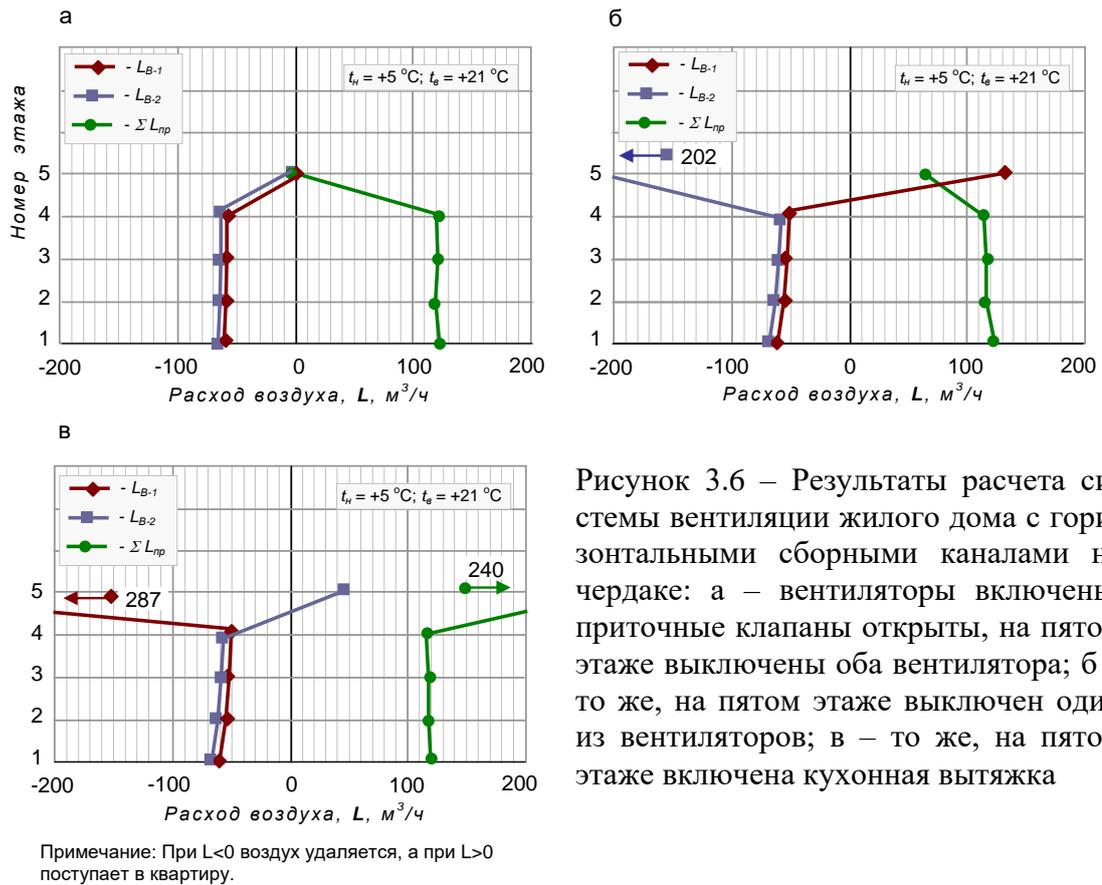


Рисунок 3.4 – Граф системы вентиляции многоквартирного пятиэтажного жилого дома с горизонтальными сборными каналами на чердаке



Примечание: При $L < 0$ воздух удаляется, а при $L > 0$ поступает в квартиру.

Рисунок 3.5 – Результаты расчета системы вентиляции жилого дома с горизонтальными сборными каналами на чердаке: а, б – вентиляторы выключены, приточные клапаны открыты; в, г, д – то же, на всех этажах включены вентиляторы; е – то же, на пятом этаже открыта створка окна



Анализ результатов расчетов показывает, что изменение режима работы, связанное с подключением к вытяжным каналам индивидуальных вентиляторов, в значительной степени влияет на работу данных систем. В частности:

- при установке во всех каналах вытяжных вентиляторов и их одновременном включении требуемый воздухообмен в квартирах может быть обеспечен (при наличии приточных вентиляционных клапанов) в широком диапазоне температур наружного воздуха (см. рисунок 3.5 в, г, д); при этом понижение температуры наружного воздуха приводит к увеличению воздухообмена квартир (в большей степени верхних этажей, что связано с увеличением естественных перепадов давлений);

- открытие створки окна на пятом этаже (при включенных вытяжных вентиляторах и открытых приточных клапанах) влечет за собой резкое (в несколько раз) увеличение воздухообмена квартиры пятого этажа и заметное снижение воздухообмена квартир нижележащих этажей (см. рисунок 3.5 е);

- выключение двух вытяжных вентиляторов в любой из квартир, например, на пятом этаже (см. рисунок 3.6 а), приводит практически к прекращению воздухообмена в данной квартире; при этом выключение одного из вентиляторов (см. рисунок 3.6 б) приводит к опрокидыва-

нию второго канала и перетеканию грязного воздуха из нижележащих квартир в квартиру данного этажа;

– аналогичные результаты получаются при включении кухонной вытяжки – опрокидывание направления движения воздуха в канале санузла (см. рисунок 3.6 в).

3.5. Результаты расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с теплыми чердаками

Системы вентиляции с теплыми чердаками широко применяются с 70-х годов XX века. В данных системах вентиляции воздух из вытяжных каналов квартир поступает в чердачное пространство, после чего удаляется через сборную вентиляционную шахту. Теплые чердаки рекомендуется применять для жилых многоквартирных зданий девяти и более этажей.

На рисунке 3.7 приведен граф подобной системы вентиляции, объединяющей три стояка квартир десятиэтажного жилого дома. Чердачное помещение выполняет функцию камеры статического давления, что повышает надежность работы системы вентиляции.

Результаты расчета некоторых частных случаев системы вентиляции с индивидуальными вытяжными каналами и теплыми чердаками для одного стояка квартир приведены на рисунках 3.8, 3.9:

– установка во всех вытяжных каналах вентиляторов (при открытых приточных клапанах) позволяет обеспечить требуемый воздухообмен квартир (см. рисунок 3.8 в, г, д); при понижении температуры наружного воздуха расход удаляемого воздуха из квартир нижних этажей существенно возрастает (см. рисунок 3.8 д) и превышает требуемый;

– выключение вытяжных вентиляторов в любой из квартир приводит к резкому снижению воздухообмена даже при открытых приточных клапанах (см. рисунок 3.9 а); выключение одного из вентиляторов (см. рисунок 3.9 б) сопровождается опрокидыванием второго канала и перетеканию грязного воздуха из пространства теплого чердака в квартиру данного этажа;

– включение кухонной вытяжки в одной из квартир (см. рисунок 3.9 в) приводит к опрокидыванию второго канала (из санузла) – так же, как и при других схемах систем вентиляции; отличие – грязный воздух поступает в квартиру из пространства теплого чердака.

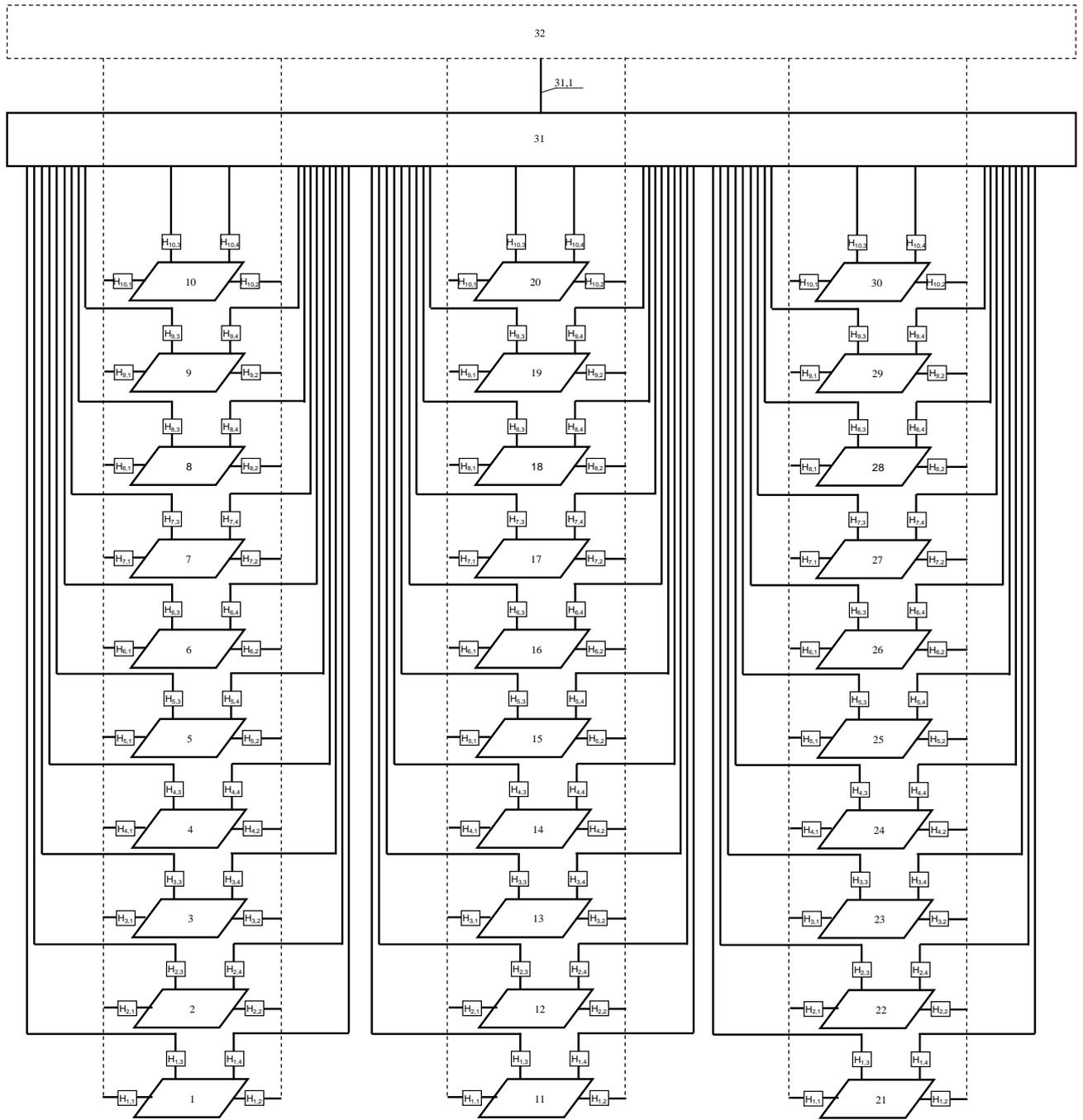
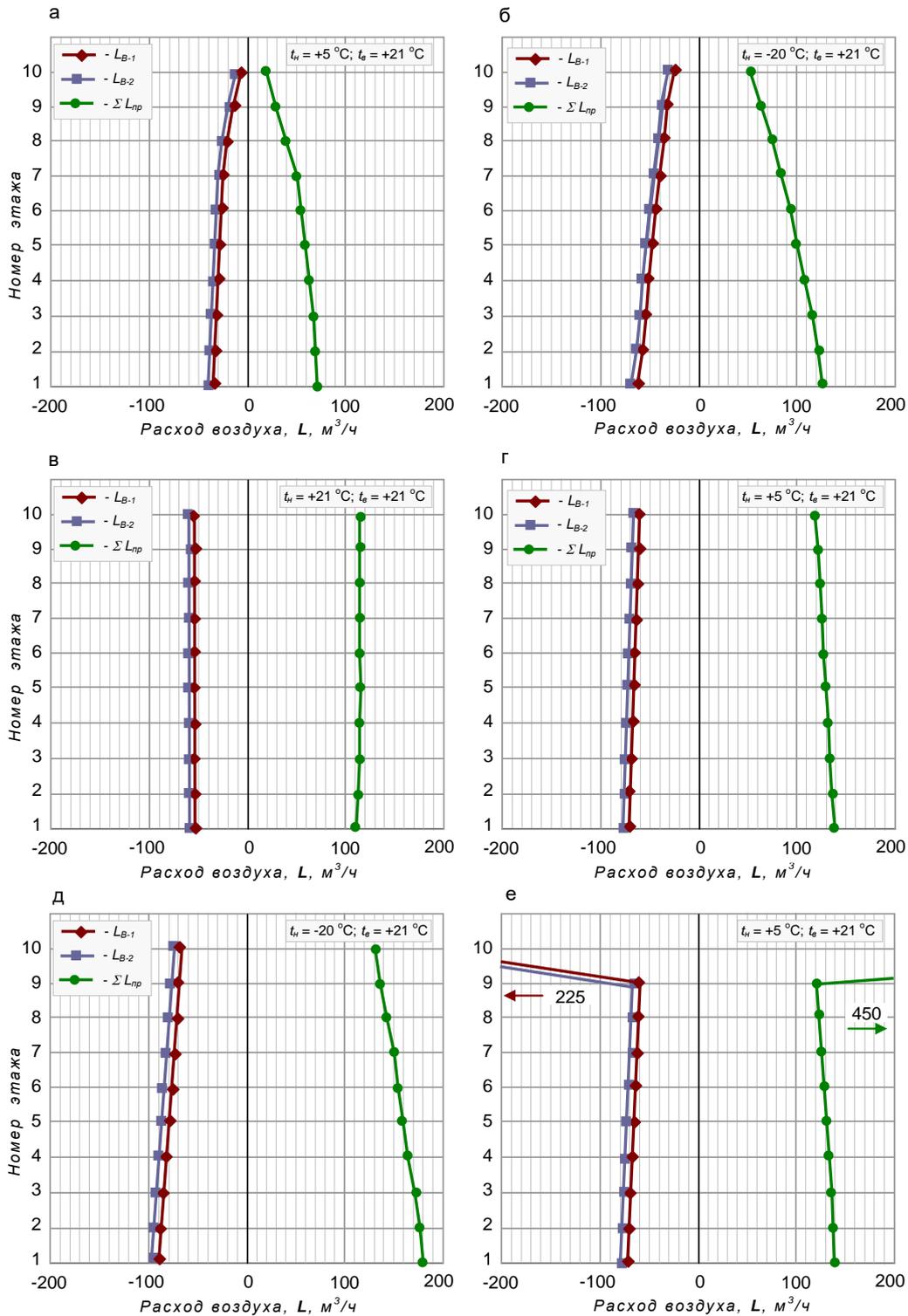


Рисунок 3.7 – Граф системы вентиляции многоквартирного десятиэтажного жилого дома с индивидуальными вытяжными каналами и теплым чердаком



Примечание: При $L < 0$ воздух удаляется, а при $L > 0$ поступает в квартиру.

Рисунок 3.8 – Результаты расчета системы вентиляции жилого дома с индивидуальными вытяжными каналами и теплым чердаком (для одного стояка квартир): а, б – вентиляторы выключены, приточные клапаны открыты; в, г, д – то же, на всех этажах включены вентиляторы; е – то же, на десятом этаже открыта створка окна

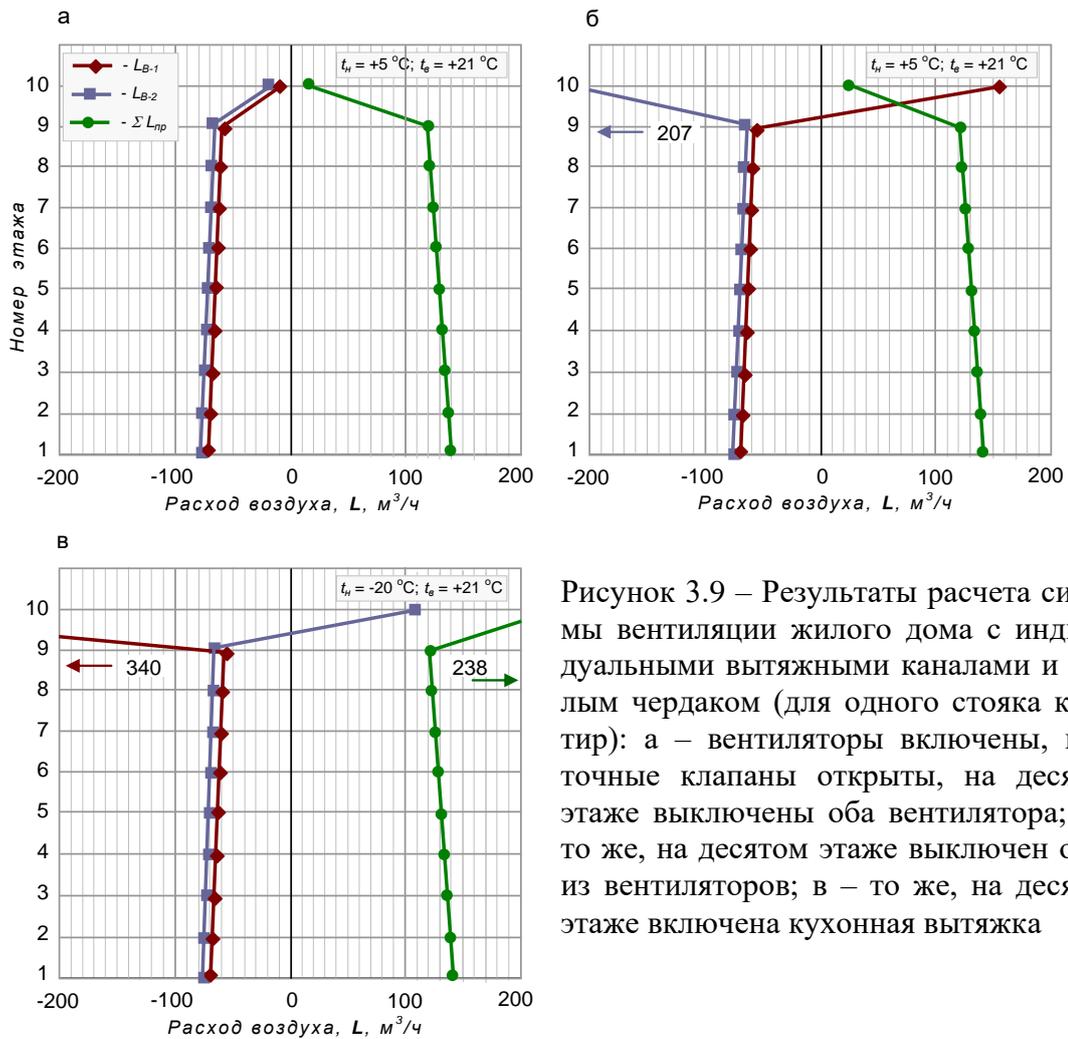


Рисунок 3.9 – Результаты расчета системы вентиляции жилого дома с индивидуальными вытяжными каналами и теплым чердаком (для одного стояка квартир): а – вентиляторы включены, приточные клапаны открыты, на десятом этаже выключены оба вентилятора; б – то же, на десятом этаже выключен один из вентиляторов; в – то же, на десятом этаже включена кухонная вытяжка

3.6. Оценка эффективности регулирования расхода воздуха в вытяжных каналах

Очевидным решением для обеспечения требуемого воздухообмена и исключения нарушения работы систем вентиляции квартир различных этажей представляется ограничение и регулирование расхода воздуха, удаляемого через вытяжные вентиляционные каналы.

В данном случае речь идет о нескольких возможных вариантах:

- установка в вытяжных каналах обратных клапанов, исключающих (или, по крайней мере, уменьшающих) вероятность поступления загрязненного воздуха из других квартир или пространства теплого чердака;

- ограничение расхода воздуха в вытяжных каналах за счет установки клапанов постоянного расхода воздуха (см. рисунок 3.10), повышающих сопротивление при увеличении расхода и таким образом выравняющих влияние отдельных вентиляторов на воздухораспределение в сборных каналах (в качестве примера можно привести воздушные клапаны фирм «Airfix», «Aereco»);

– управление расходом воздуха за счет изменения режима работы вентилятора в зависимости от потребностей при использовании программируемых вентиляторов, оснащенных управляющими блоками и датчиками различного типа (движения, углекислого газа, относительной влажности воздуха и др.)

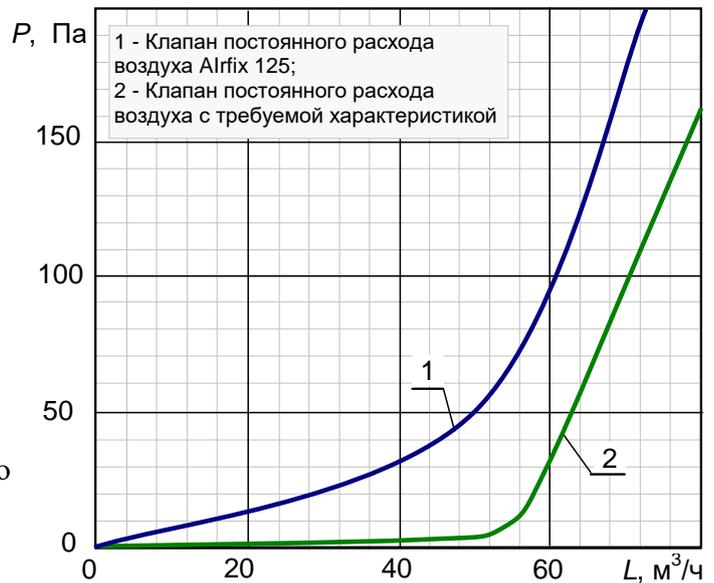


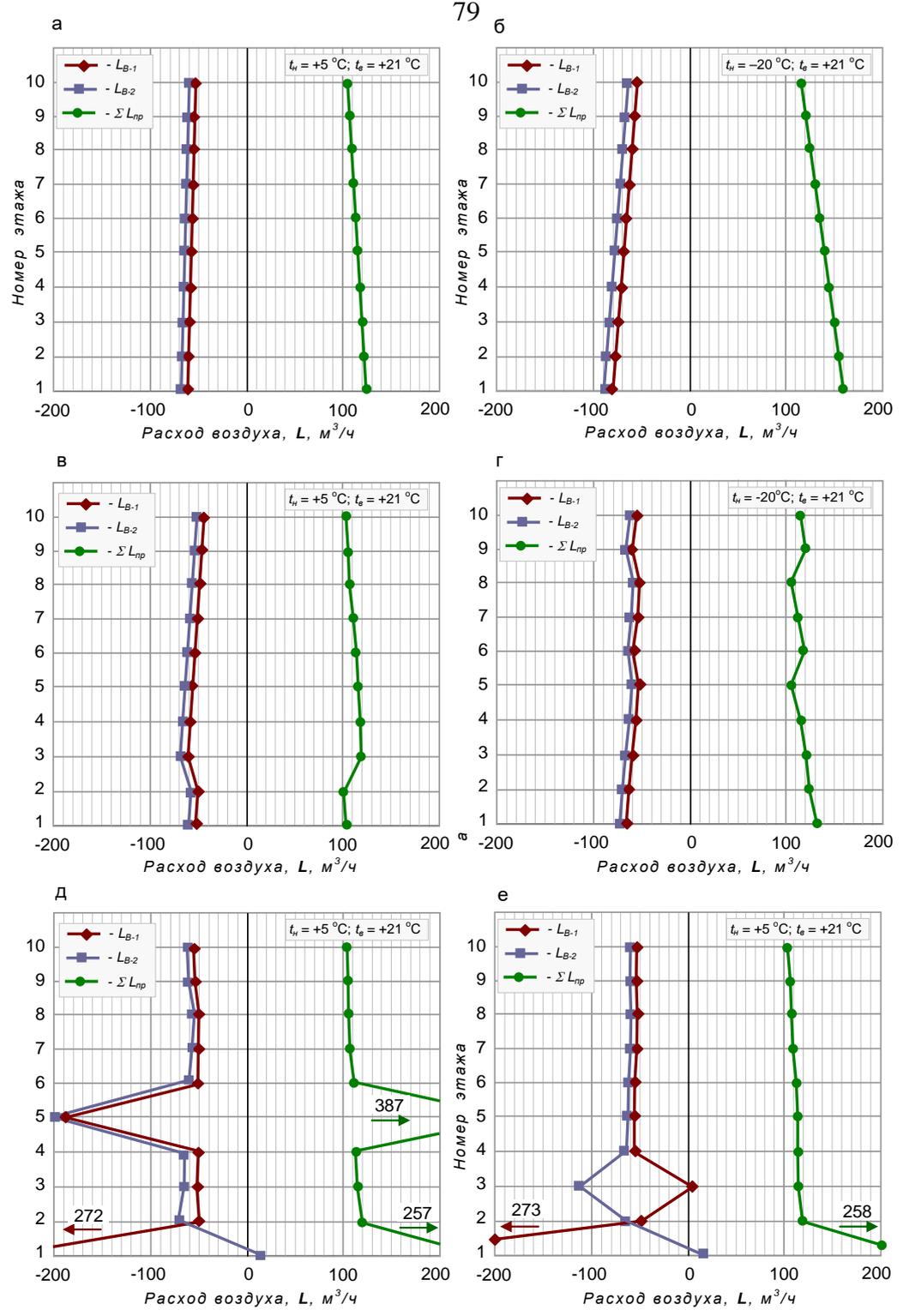
Рисунок 3.10 – Клапаны постоянного расхода воздуха: 1 – Airfix 125; 2 – с требуемой характеристикой

Результаты расчета распределения потоков воздуха при применении разработанных технических решений в системе вентиляции с вертикальными сборными каналами и каналами-спутниками приведены на рисунках 3.11, 3.12.

Анализ результатов показывает, что реализация данных решений обеспечивает эксплуатационную устойчивость систем механической вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами и требуемый воздухообмен в течение всего периода эксплуатации здания. В частности:

– установка обратных клапанов практически исключает (незначительные расходы воздуха при опрокидывании) возможность опрокидывания вентиляционных каналов как при выключении отдельных вентиляторов, так и при включении кухонной (см. рисунок 3.11 д, е; для сравнения – см. рисунок 3.3 е), однако не исключает значительное увеличение воздухообмена при включении кухонных вытяжек или открытии окон;

– регулирование производительности вытяжных вентиляторов позволяет обеспечить требуемый воздухообмен во всех квартирах как при температуре наружного воздуха $+5\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рисунок 4.10 в), так и при температуре $-20\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рисунок 4.10 г) за счет изменения скорости вращения вытяжных вентиляторов от 100% до 50%;



Примечание: При $L < 0$ воздух удаляется, а при $L > 0$ поступает в квартиру.

Рисунок 3.11 – 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 – вентиляторы включены (100%), приточные клапаны открыты, на первом этаже включена кухонная вытяжка, на третьем этаже выключен вентилятор В-1

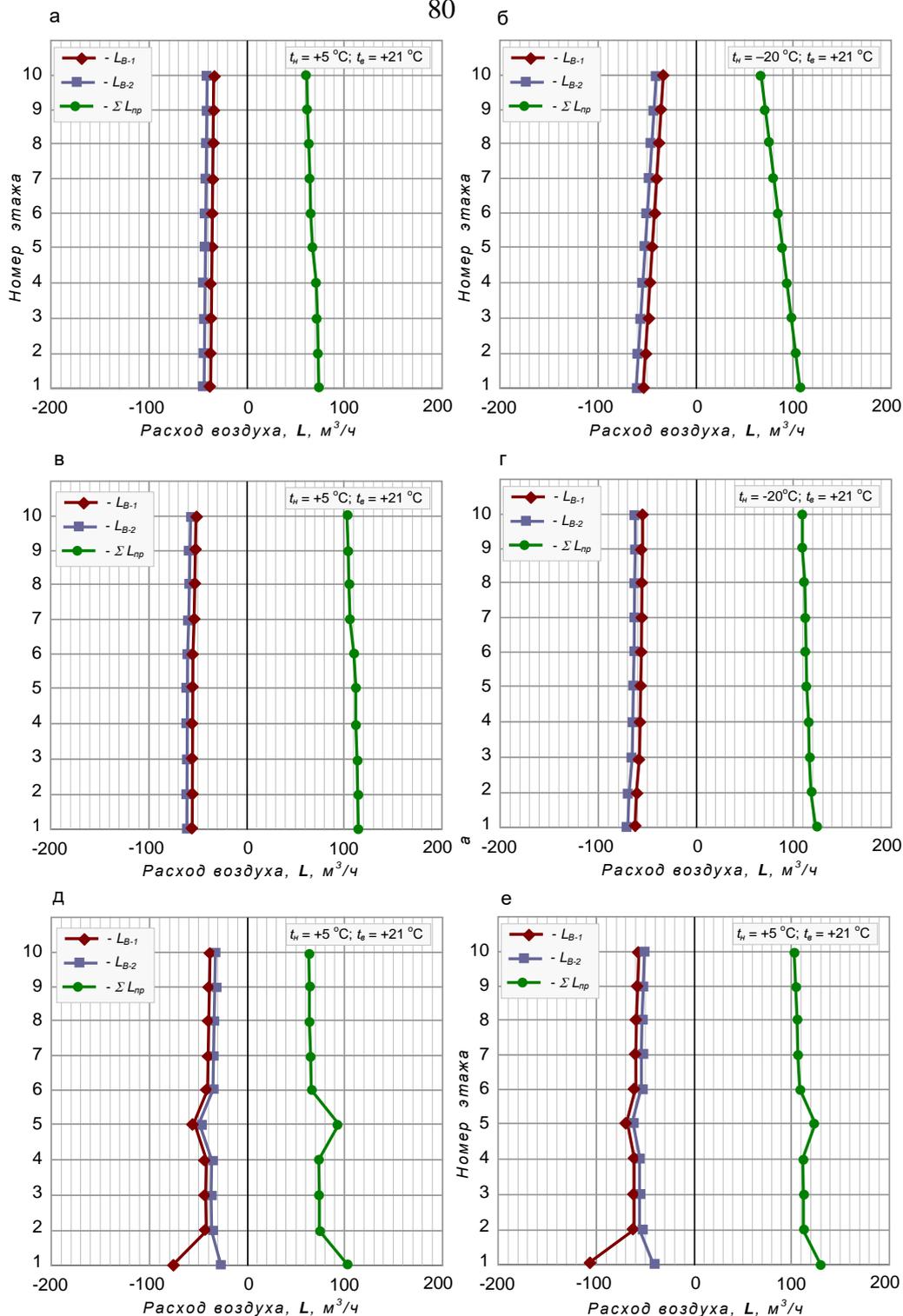


Рисунок 3.12 – Результаты расчета системы вентиляции с индивидуальными вытяжными вентиляторами: при установке в вытяжных каналах обратных клапанов и клапанов постоянного расхода воздуха: а, б – вентиляторы включены, приточные клапаны открыты, после каждого вентилятора установлен клапан постоянного расхода Airfix 125; в, г – то же, после каждого вентилятора вместо Airfix 125 установлен клапан постоянного расхода с требуемой характеристикой; д, е – вентиляторы включены, приточные клапаны открыты, на первом этаже включена кухонная вытяжка, на 5-ом этаже открыто окно, после каждого вентилятора установлены клапаны постоянного расхода Airfix 125 (д) и клапаны постоянного расхода с требуемой характеристикой (е)

– установка клапанов постоянного расхода воздуха позволяет повысить устойчивость работы системы при открытии створок окон или включении кухонных вытяжек; в данном случае открытие створки окна на одном из этажей (см. рисунок 3.12 д, е) сопровождается увеличением воздухообмена в конкретной квартире, но гораздо в меньшей степени, чем без авторегулирования (для сравнения – см. рисунок 3.3 в), и не сказывается на работе вытяжных каналов других квартир; включение кухонной вытяжки не приводит к значительному увеличению воздухообмена квартиры (см. рисунок 3.12 д, е, для сравнения – см. рисунок 3.3 е);

– недостатком известных решений клапанов постоянного расхода воздуха (Airfix 125) являются значительные потери давления, создаваемые при низких расходах воздуха, что приводит к уменьшению воздухообмена помещений (см. рисунок 3.12 а, б; для сравнения – см. рисунок 3.11 а, б); решить данную проблему позволяет установка клапанов постоянного расхода воздуха с требуемой характеристикой (см. рисунок 3.10), которые не только обеспечивают устойчивость работы системы вентиляции при включении кухонных вытяжек и открытии створок окон, но и создают незначительные потери давления при низких расходах (см. рисунок 3.12 в, г, е; для сравнения – см. рисунок 3.12 а, б, д);

Выводы по главе 3

1. Системы вентиляции с естественным побуждением движения воздуха в ряде случаев не обеспечивают требуемого воздухообмена в квартирах многоэтажных зданий даже при наличии приточных вентиляционных устройств (приточных клапанов); одна из основных причин – значительные потери давления в приточных устройствах.

2. Установка вентиляторов в вытяжных каналах увеличивает воздухообмен, однако не все индивидуальные вентиляторы позволяют добиться требуемого воздухообмена; необходима увязка характеристик вентиляторов с потерями давления в приточных устройствах и вытяжных вентиляционных каналах.

3. Изменение проектного режима работы системы вентиляции, в частности выключение или изменение характеристик отдельных вентиляторов (например, подключение к вентканалам кухонных вытяжек) может кардинально изменить режим работы системы вентиляции, как непосредственно в отдельной квартире, так и других квартирах, подключенных через каналы-спутники к одному сборному каналу.

4. Для повышения эксплуатационной надежности и эффективности управления системами механической вытяжной вентиляции индивидуальными вентиляторами целесообразно применение:

- обратных клапанов, предотвращающих опрокидывание направления движения воздуха;
- клапанов постоянного расхода воздуха (воздушных балансировочных клапанов), устанавливаемых в вентиляционных каналах для ограничения расхода удаляемого воздуха;
- программируемых блоков управления вентиляторами (контроллеров), предназначенных для управления и регулирования индивидуальными вытяжными вентиляторами с учетом режима эксплуатации помещений.

5. Установка обратных клапанов практически исключает возможность опрокидывания вентиляционных каналов, как при выключении отдельных вентиляторов, так и при включении кухонной вытяжки, однако не исключает значительное увеличение воздухообмена при включении кухонных вытяжек или открытии окон.

6. Установка клапанов постоянного расхода воздуха позволяет повысить устойчивость работы системы при открытии створок окон или включении кухонных вытяжек.

Недостатком известных решений клапанов постоянного расхода воздуха являются значительные потери давления, создаваемые при низких расходах воздуха, что приводит к уменьшению воздухообмена. Решить данную проблему позволяет установка клапанов постоянного расхода воздуха с требуемой характеристикой, которые не только повышают устойчивость работы системы вентиляции, но и создают незначительные потери давления при низких расходах.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИТОКА ВОЗДУХА

4.1. Основные положения

Задача моделирования распределения воздушных потоков в помещениях в диссертационной работе решена методами вычислительной гидродинамики CFD с применением программного пакета Ansys Fluent.

В основе численного моделирования турбулентных течений воздуха в помещениях лежат нестационарные уравнения неразрывности (сохранения массы), уравнения движения (сохранения импульса) Навье-Стокса, уравнения сохранения энергии и уравнение состояния (закон идеального газа) [160]:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_0 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_0 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu_0 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.3)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{T_0}{T}, \quad (4.4)$$

где (4.1) – уравнение неразрывности, (4.2) – уравнение движения, (4.3) – уравнение сохранения энергии, (4.4) – уравнение состояния; x, y, z – ортогональные оси, м; u, v, w – составляющие скорости соответственно в осях x, y, z , м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; t – время, с; P – абсолютное (термодинамическое) давление, Па; μ – динамическая вязкость воздуха, Н·с/м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; T – температура воздуха, К; c_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/кг·К; λ – теплопроводность воздуха, Вт/м·К; нижний индекс 0 обозначает известное начальное значение величины.

Следует отметить, что в уравнении состояния (4.4) есть упрощение, касающееся плотности, связанное с тем, что изменения давления для воздуха «...достаточно малы, поэтому воздух считается несжимаемой средой. В связи с этим в уравнении состоянии учитывается только температура...» [160].

Основными методами расчета турбулентных течений, применяемыми в CFD моделировании, на данный момент являются:

- прямое численное моделирование DNS (direct numerical simulation);
- метод моделирования крупных вихрей LES (large eddy simulation);
- метод решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations).

4.2. Анализ методов расчета турбулентных течений, применяемых в CFD моделировании

4.2.1. Прямое численное моделирование (DNS)

Метод DNS относится к численному решению дискретизированных уравнений Навье-Стокса. В настоящее время данный метод неприменим для моделирования вентиляции помещений. Это в основном связано с относительно небольшими временными шагами и необходимыми размерами ячейки при разбиении сетки. Прямое численное моделирование турбулентных течений имеет целью симуляцию на компьютере всего диапазона турбулентных статистических флуктуаций во всех соответствующих физических масштабах. Это сложная задача, которая возрастает с увеличением числа Рейнольдса, поскольку размер наименьших турбулентных вихрей обратно пропорционален $Re^{3/4}$, известной шкале Колмогорова, связанной с турбулентной диссипацией. Например, для точки в вентилируемом помещении размер ячейки в соответствии со шкалой Колмогорова составляет 1 мм. В результате для помещения объемом 100 м^3 потребуется разбиение сетки на 10^{11} ячеек [160]. Кроме того, для точного моделирования временных изменений требуются очень маленькие временные шаги. Например, в работе [166] обтекание относительно простой геометрии потребовало 6 месяцев времени вычисления на суперкомпьютере с 2100 процессорами.

Таким образом, серьезные требования к вычислительной мощности компьютера (большое количество требуемых сеточных узлов и временных шагов) приводят к невозможности применения метода DNS для моделирования вентиляции помещений [142, 160, 161, 166].

Тем не менее, DNS широко применяется в качестве основного инструмента исследования для лучшего понимания фундаментальных механизмов турбулентности, с целью создания базы данных информации, которая будет использоваться для улучшения приближений более низкого уровня, таких как LES или моделей турбулентности для RANS [166].

4.2.2. Метод моделирования крупных вихрей (LES)

Моделирование методом LES уменьшает проблемы DNS, напрямую моделируя только большие вихри, а меньшие вихри моделируются полуэмпирически. Процедура разделения мелкомасштабных и крупных структур называется фильтрованием. За счет фильтрования требуемая вычислительная мощность уменьшается. В последние годы это позволило выполнять вычисления LES более широко. Несколько примеров использования данного метода для моделирования естественной вентиляции помещения приведены в [160].

По сравнению с моделями RANS, LES по-прежнему очень требователен к вычислительным ресурсам, отчасти потому, что он решает нестационарные уравнения, что приводит к необходимости небольших временных шагов для получения устойчивости при решении. LES также значительно более требователен к граничным условиям, так как они должны быть указаны в нестационарной форме [160].

Поскольку оставшиеся большие турбулентные колебания моделируются напрямую, вычислительные требования к моделированию методом LES все еще очень высоки [140, 142, 160, 161, 166].

4.2.3. Метод решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS)

Наиболее широко применяемым методом CFD моделирования является приближение, посредством которого уравнения турбулентности усредняются во времени по всему спектру турбулентных флуктуаций. Это приводит к так называемым «осредненным по Рейнольдсу уравнениям Навье-Стокса», которые требуют, кроме того, эмпирической или, по крайней мере, полуэмпирической информации о структуре турбулентности и ее связи с усредненным потоком [166].

Процесс турбулентного усреднения вводится для того, чтобы получить законы движения для «средних», усредненных по времени, турбулентных величин. Это усреднение по времени следует определять таким образом, чтобы устранить влияние турбулентных колебаний, не разрушая при этом зависимость от времени, связанную с другими нестационарными явлениями, с масштабами времени, отличными от масштабов турбулентности.

Усредненная по Рейнольдсу форма основных уравнений Навье-Стокса получается, когда мгновенное значение величины разлагается на два компонента, то есть усредненный по времени компонент, который не зависит от времени, и изменяющийся во времени компонент, для которого среднее время равно нулю [160]. В результате система уравнений является незамкнутой, так как в нее входит неизвестный тензор напряжений Рейнольдса. Замыкание системы уравне-

ний требует использования некоторых приближений, связывающих тензор напряжений Рейнольдса и параметры среднего потока. Введенные приближения называются моделями турбулентности [140, 160].

Таким образом, уравнения RANS могут быть решены, только если есть какой-то способ выразить эти напряжения в терминах других известных величин с использованием модели турбулентности. На данный момент не существует универсальной модели турбулентности, подходящей для моделирования различных процессов, в связи с чем был разработан целый ряд полуэмпирических моделей турбулентности. Описание различных типов моделей приведено в [87, 140, 142, 160–162, 166].

Наиболее часто используемые модели на сегодняшний день: k - ε и k - ω [142, 160]. Здесь k обозначает турбулентную кинетическую энергию, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ε обозначает скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, $\text{м}^2/\text{с}^2$ (то есть скорость, с которой k превращается в тепловую энергию благодаря молекулярной вязкости); ω – удельная скорость диссипации, $\text{м}^2/\text{с}^2$.

Свойства сдвиговых течений лучше описывают k – ε модели, а моделирование пристеночных функций модели типа k – ω [142].

В соответствии с рядом отечественных и зарубежных работ [87, 140, 160, 165] для численного моделирования распределения воздушных потоков в помещениях наиболее целесообразным является метод решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS) с применением k – ε модели турбулентности.

Уравнения k – ε включают формулу Колмогорова–Прандтля для турбулентной вязкости и уравнения переноса кинетической энергии турбулентных пульсаций и скорости ее диссипации [87, 142].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4.6)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (4.7)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, $\text{м}^2/\text{с}^2$; τ_{ij} – компоненты тензора рейнольдсовых напряжений, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ρ , t , μ – то же, что и в формулах (2.1) – (2.4); $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_μ , σ_k , σ_ε – модельные константы ($C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$).

4.3. Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении

4.3.1. Постановка задачи

В системах механической вытяжной вентиляции с индивидуальными вентиляторами изменение ряда внешних и внутренних факторов может значительно влиять на распределение воздушных потоков в помещениях. Согласно [109]: «...в жилых комнатах и кухне приток воздуха следует обеспечить через регулируемые оконные створки, фрамуги, форточки, клапаны или другие устройства, в том числе стеновые воздушные клапаны с регулируемым открыванием...». Однако увеличение расхода приточного воздуха за счет включения вентиляторов и кухонных вытяжек, открытия окон и форточек может привести к значительному понижению температуры внутреннего воздуха. Тип и место установки приточных клапанов также влияет на распределение температур и скоростей воздушных потоков в помещении. В этой связи произведены расчеты распределения воздушных потоков в помещении при различных вариантах организации естественного притока воздуха с учетом изменения расхода приточного воздуха.

Моделирование распределения воздушных потоков в помещениях в диссертационной работе выполнено методом решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS) с применением $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

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.

За основу модели помещения было принято жилое помещение трехкомнатной квартиры жилого многоквартирного дома. Площадь помещения – 13,5 м (размерами 3х4,5 м), высота помещения от потолка до пола – 2,8 м. В наружную стену шириной 3 м встроен оконный блок из ПВХ-профилей размерами 1,5х1,5 м. Оконный блок имеет форточку размерами 650х500 мм, а также две створки 950х1500 мм и 650х1000 мм соответственно. Непосредственно под окном наружной стены установлен алюминиевый радиатор шириной 800 мм, высотой 500 мм и глубиной 80 мм с отступом от стены 70 мм. За основу отопительного прибора был принят алюминиевый радиатор марки Extra Therm (модель Serir 500/80) с номинальным тепловым потоком одной секции 185,4 Вт согласно результатам испытаний, представленным в [96]. Температура воды в отопительном приборе принята равной 80 °С (как средняя для теплоносителя с параметрами 90/70 °С). Схема помещения с указанием основных элементов и, разработанная в графическом редакторе DesignModeler, геометрическая модель помещения представлены на рисунке 4.1.

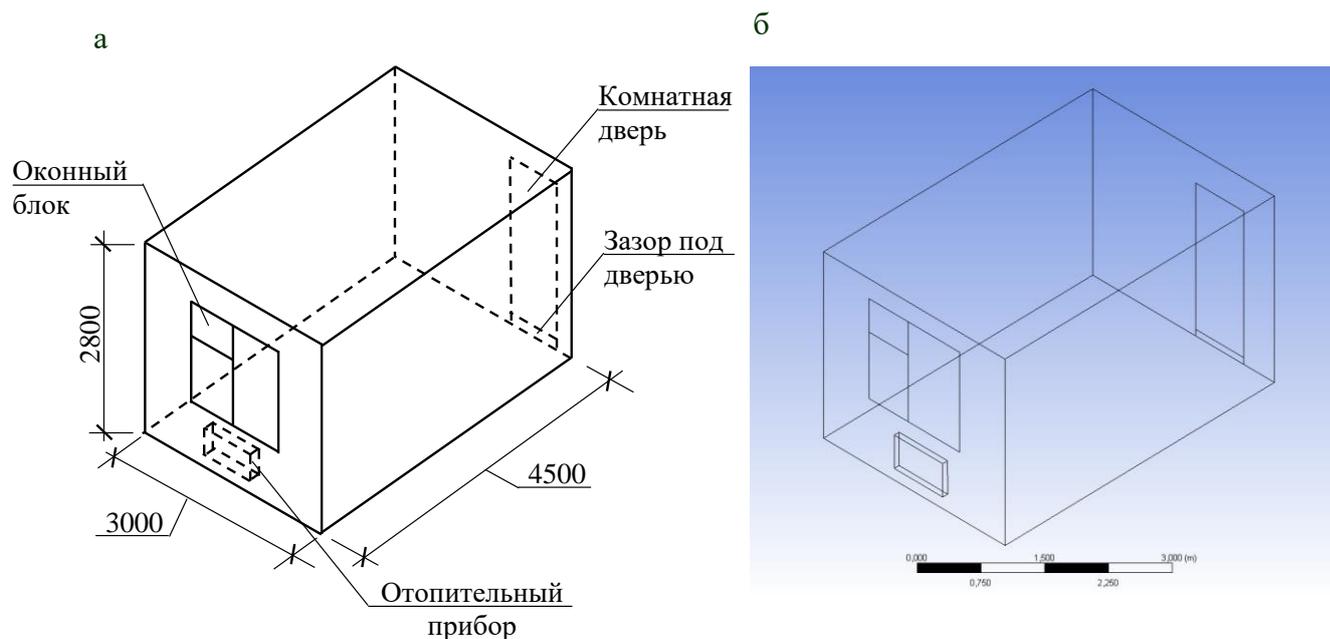


Рисунок 4.1 – Схема помещения с указанием основных элементов (а) и, разработанная в графическом редакторе, геометрическая модель помещения (б)

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 блок;
- стенового приточного клапана, установленного рядом с оконным блоком;
- стенового приточного клапана, установленного над отопительным прибором.

Удаление воздуха из помещения предусмотрено через щель, имитирующую зазор под закрытой комнатной дверью.

Расчеты производились при температуре наружного воздуха – $t_n = -30$ °С.

Начальная температура воздуха в помещении – $t_b = +20$ °С.

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

Расход приточного воздуха для жилого помещения квартиры верхнего этажа при включенных вентиляторах и отсутствии регулирования работы вытяжных вентиляторов составляет при открытии:

- форточки – $L = 293$ м³/ч;
- приточного клапана, установленного в створке оконного блока – $L = 56$ м³/ч;
- приточного клапана, установленного рядом с оконным блоком – $L = 68$ м³/ч;
- приточного клапана, установленного над отопительным прибором – $L = 60$ м³/ч.

Регулирование скорости вращения вентиляторов до 50 % и установка клапанов постоянного расхода воздуха с требуемой характеристикой приводит к снижению расхода приточного воздуха и составляет при открытии:

- форточки – $L = 125 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- приточного клапана, установленного в створке оконного блока – $L = 33 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- приточного клапана, установленного рядом с оконным блоком – $L = 34 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- приточного клапана, установленного над отопительным прибором – $L = 32 \text{ м}^3/\text{ч}$.

4.3.2. Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении при открытии форточек

Визуализация полей температур и скоростей воздуха произведена по трем вертикальным плоскостям. Схема помещения с указанием расстояния от стен до плоскостей представлена на рисунке 4.2. Результаты моделирования полей скоростей и температур через 1 минуту после открытия форточки представлены на рисунках 4.3, 4.4. Наибольший интерес представляет плоскость визуализации 1, проходящая через середину форточки.

Расчетный расход воздуха через форточку принят при отсутствии регулирования работы вытяжных вентиляторов ($L = 293 \text{ м}^3/\text{ч}$).

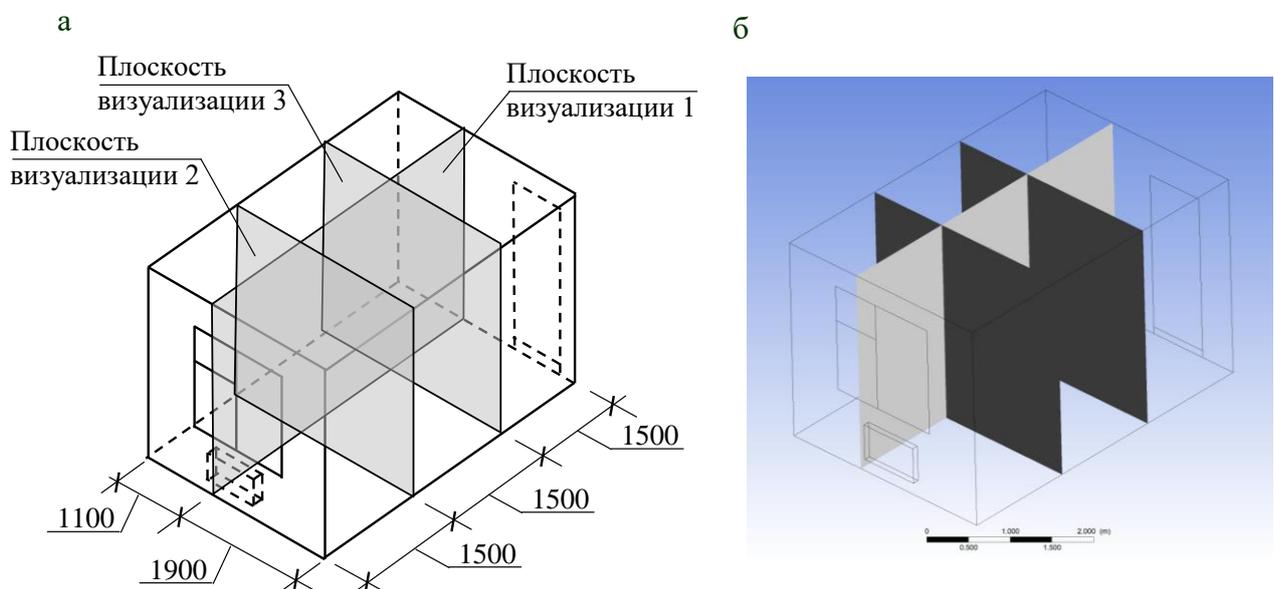


Рисунок 4.2 – Схема помещения с указанием плоскостей визуализации (а) и разработанная в графическом редакторе (б)

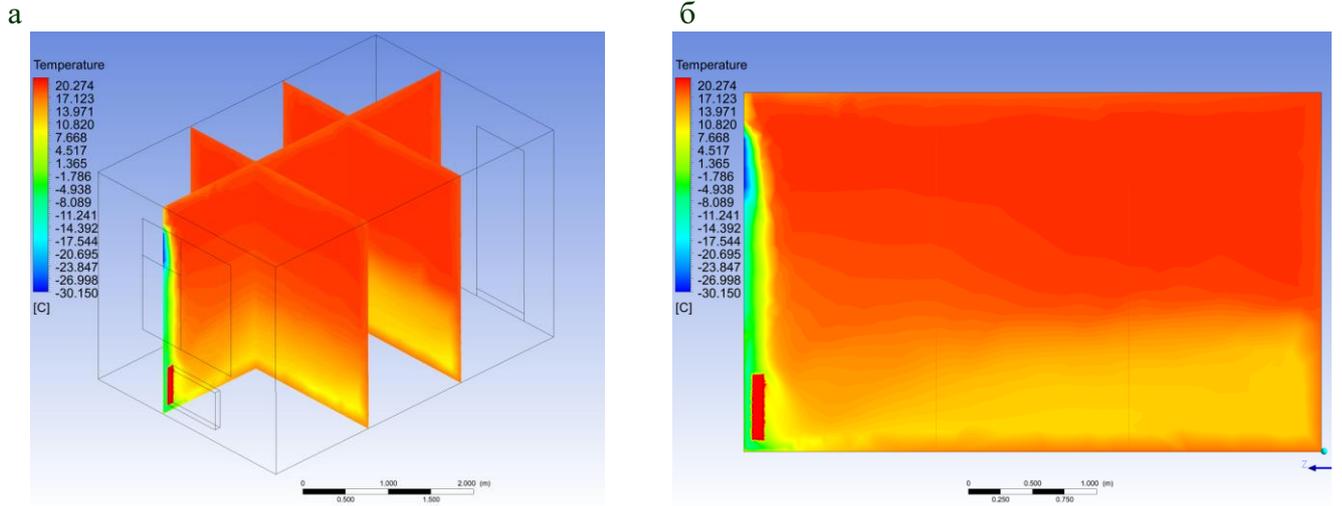


Рисунок 4.3 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 1 минуту после открытия форточки

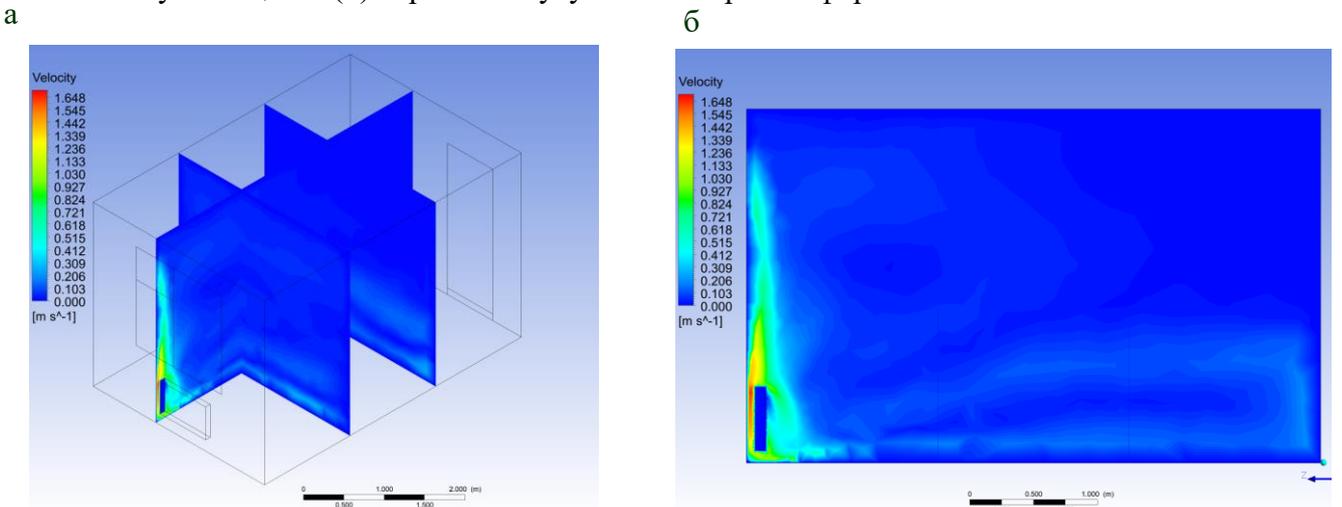


Рисунок 4.4 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 1 минуту после открытия форточки

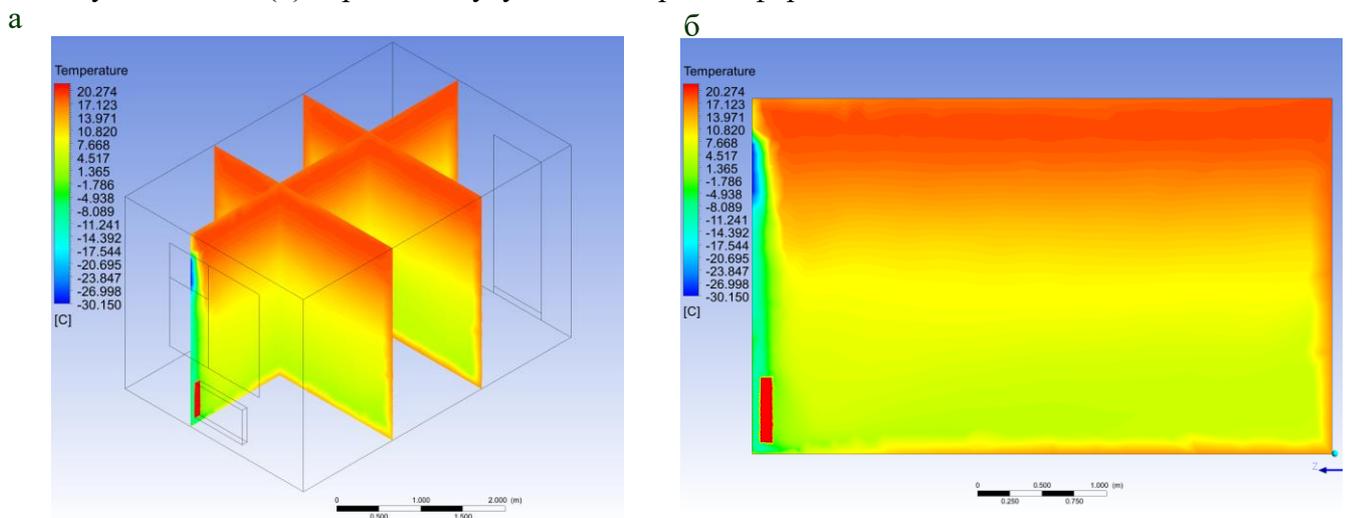
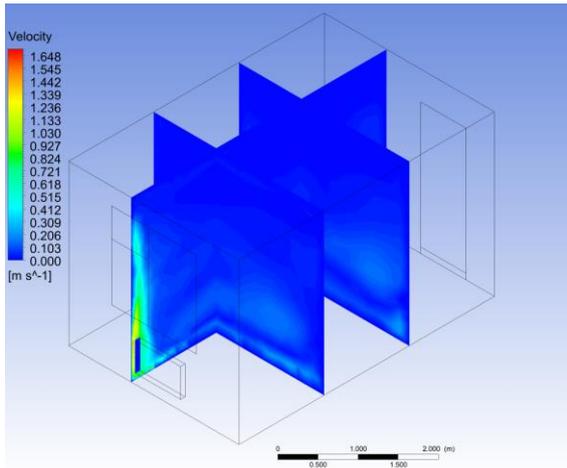


Рисунок 4.5 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 5 минут после открытия форточки

а



б

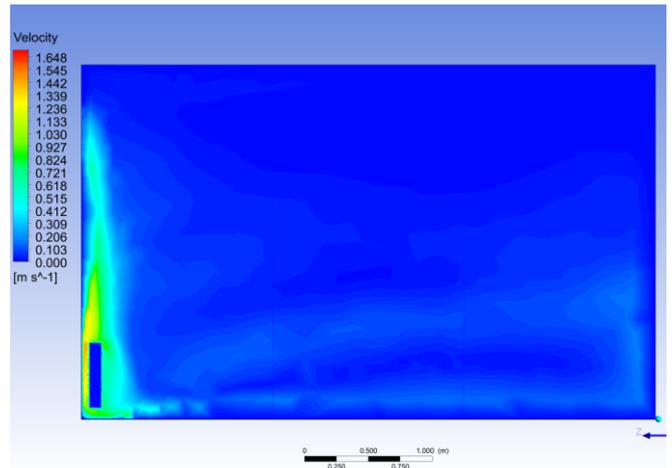
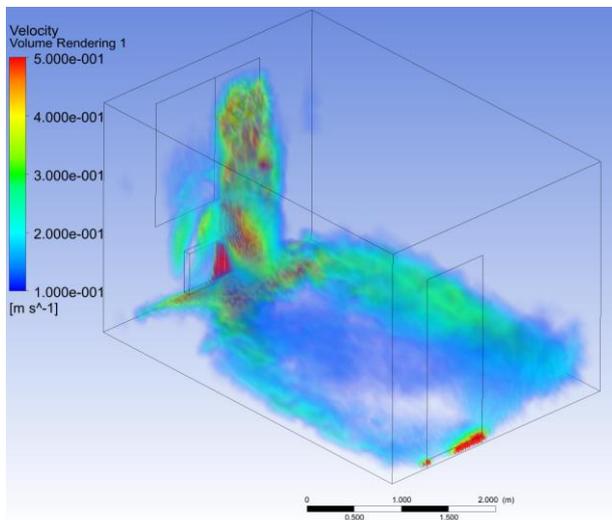


Рисунок 4.6 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 5 минут после открытия форточки

а



б

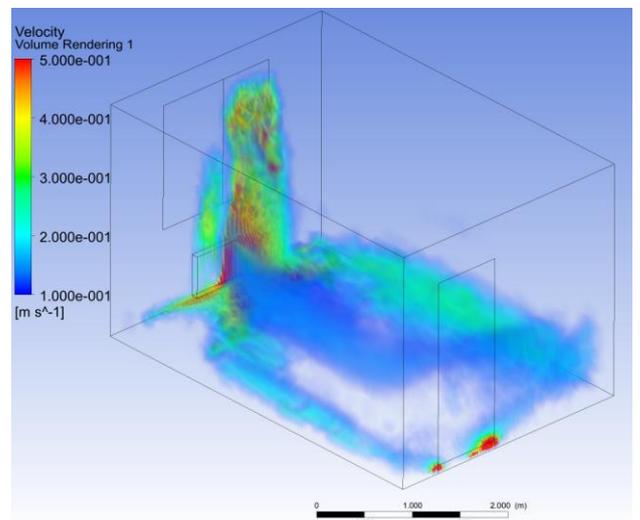


Рисунок 4.7 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, через 1 минуту (а) и 5 минут (б)

Результаты моделирования полей скоростей и температур через 5 минут после открытия форточки представлены на рисунках 4.5, 4.6. Распределение воздушных потоков внутри помещения (рисунок 4.7) получено с помощью объемного рендеринга полей скоростей при минимальной скорости 0,1 м/с.

При открытии форточки воздух сразу опускается в нижнюю зону помещения. Наибольшие значения скоростей воздуха наблюдаются в зоне отопительного прибора. В нижней зоне середины помещения скорость воздуха не достигает 0,1 м/с. Отличия в распределении скоростей через 1 и 5 минут наблюдаются в основном в зоне радиатора.

Значительное снижение температуры воздуха (до 12 °С в нижней зоне помещения) наблюдается уже через 1 минуту после открытия форточки. С течением времени температура воздуха падает и через 5 минут достигает уже 10°С в центре помещения и до 4 °С в нижней зоне. Сред-

няя температура воздуха в помещении через 5 минут – 6,24 °С. Таким образом, проветривание помещений за счет периодического открытия форточек может привести к значительному снижению температуры внутреннего воздуха помещений уже через 5 минут после открытия форточки и привести к переохлаждению помещения. Также, необходимо отметить, что в связи с большим количеством поступающего холодного наружного воздуха, возрастут затраты теплоты на подогрев приточного воздуха и теплотери помещения в целом.

4.3.3. Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении при установке приточного клапана в створке оконного блока

Приточный клапан, устанавливаемый непосредственно в створку оконного блока моделировался в виде прямоугольного отверстия размером 15x290 мм.

Визуализация полей температур и скоростей воздуха произведена по трем вертикальным плоскостям. Схема помещения с указанием расстояния от стен до плоскостей представлена на рисунке 4.8. Результаты моделирования полей скоростей и температур через 1 минуту после открытия приточного клапана при расходе приточного воздуха 56 м³/ч представлены на рисунках 4.9, 4.10. Наибольший интерес представляет плоскость визуализации 1, проходящая через середину приточного клапана.

Результаты моделирования полей скоростей и температур через 5 минут после открытия клапана при расходе приточного воздуха 56 м³/ч представлены на рисунках 4.11, 4.12. Распределение воздушных потоков внутри помещения (рисунок 4.13) получено с помощью объемного рендеринга полей скоростей при минимальной скорости 0,1 м/с.

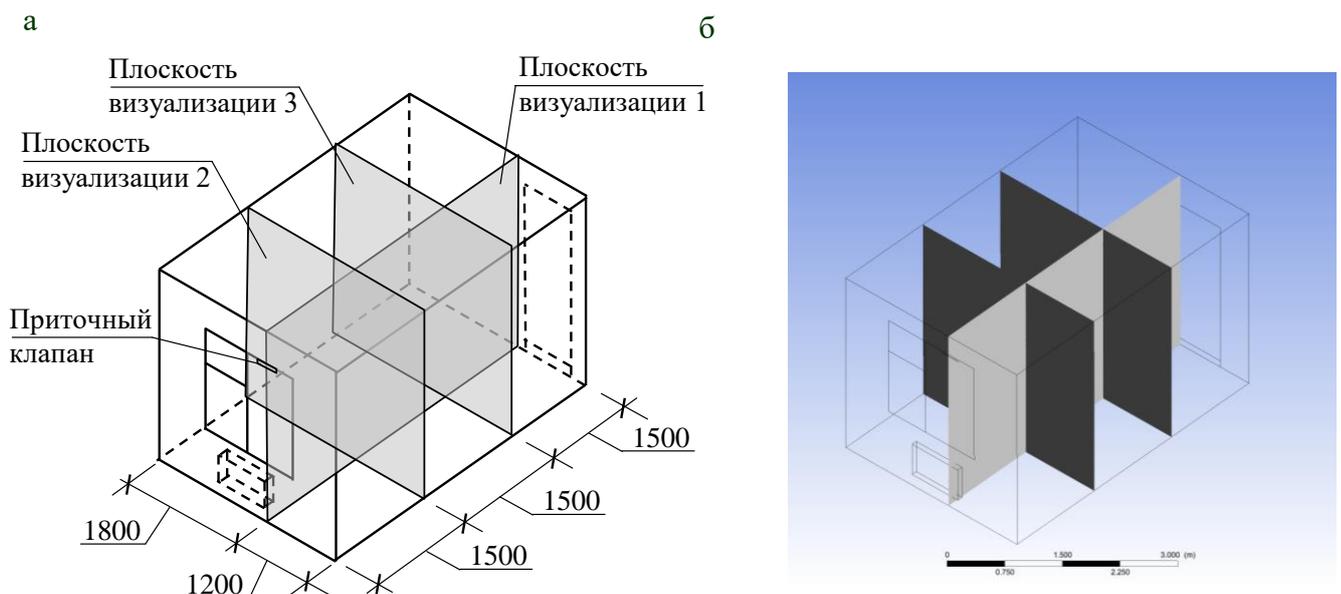
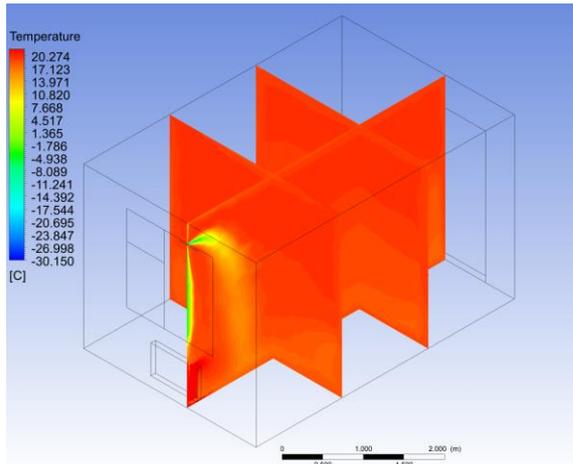


Рисунок 4.8 – Схема помещения с указанием плоскостей визуализации (а) и разработанная в графическом редакторе (б)

а



б

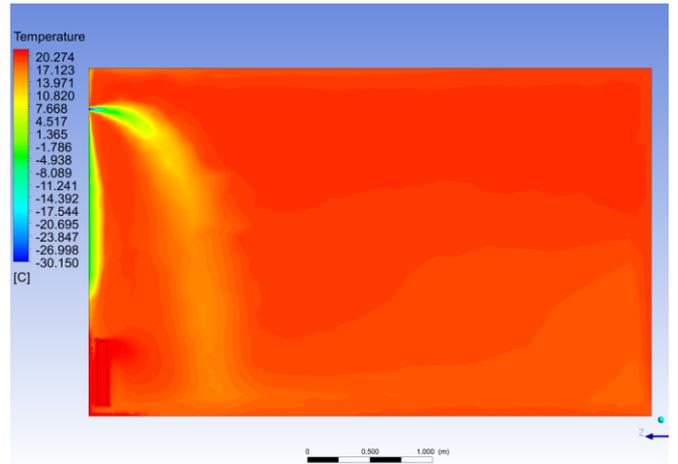


Рисунок 4.9 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 1 минуту после открытия приточного клапана

а

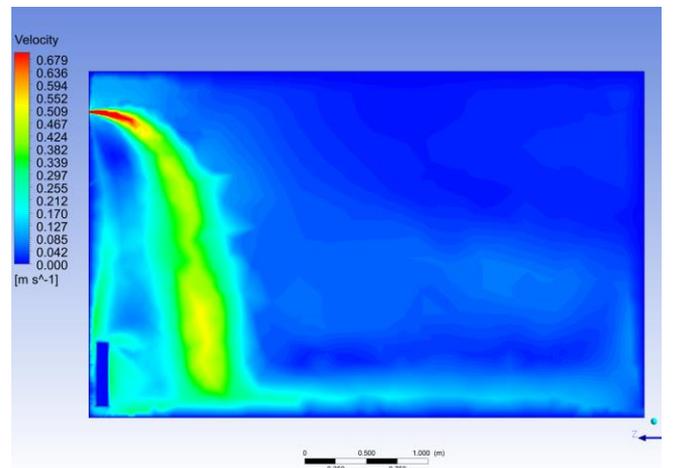
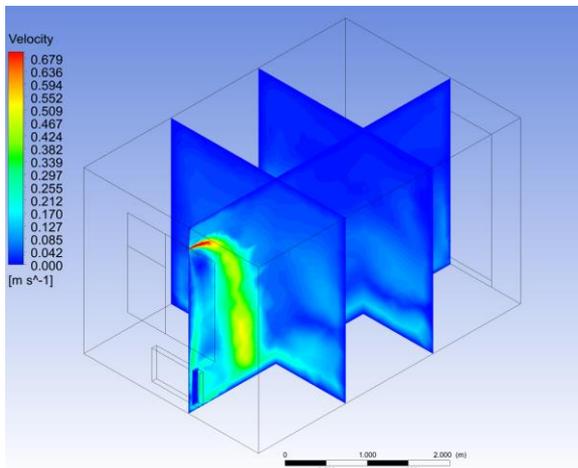
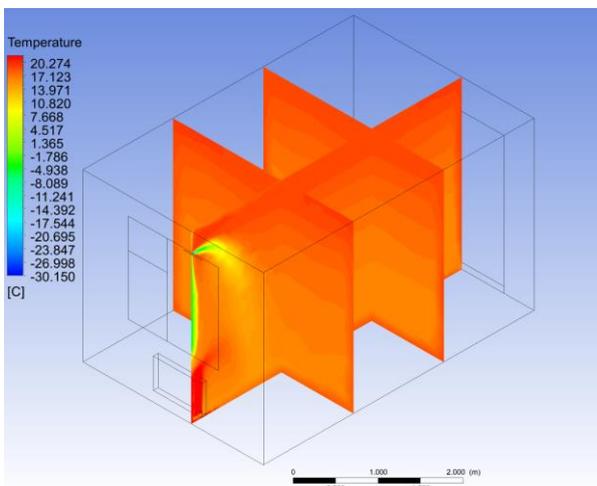


Рисунок 4.10 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 1 минуту после открытия приточного клапана

а



б

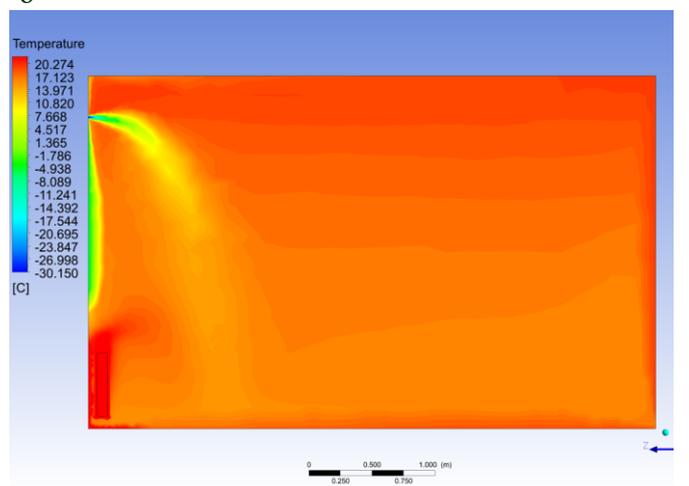
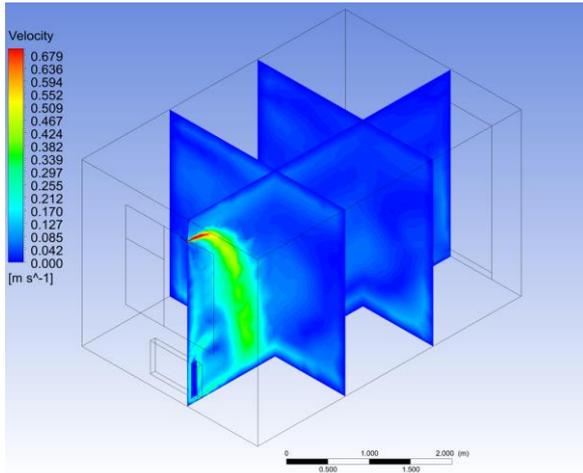


Рисунок 4.11 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 5 минут после открытия приточного клапана

а



б

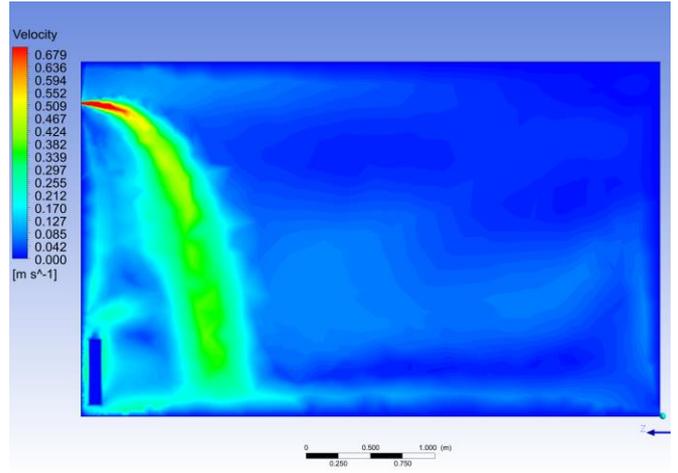
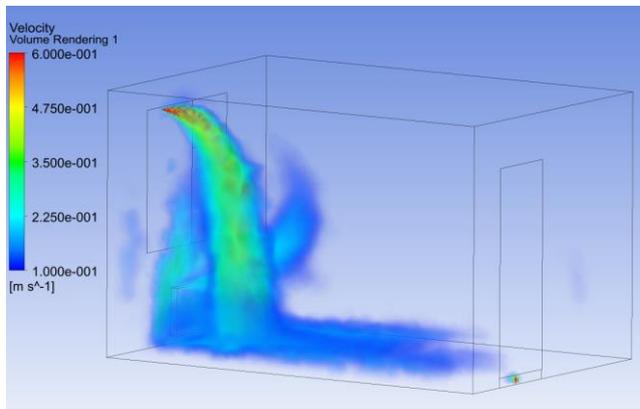


Рисунок 4.12 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 5 минут после открытия приточного клапана

а



б

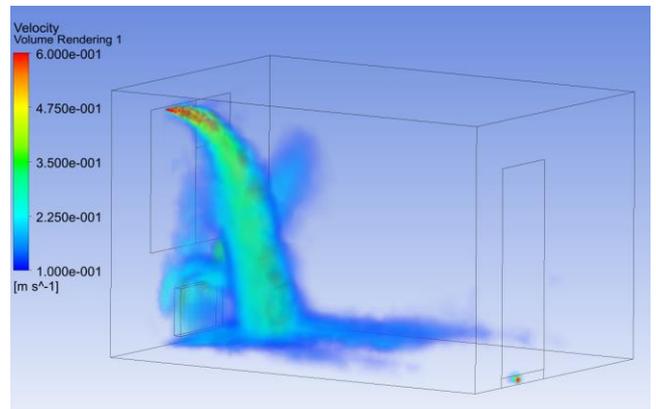
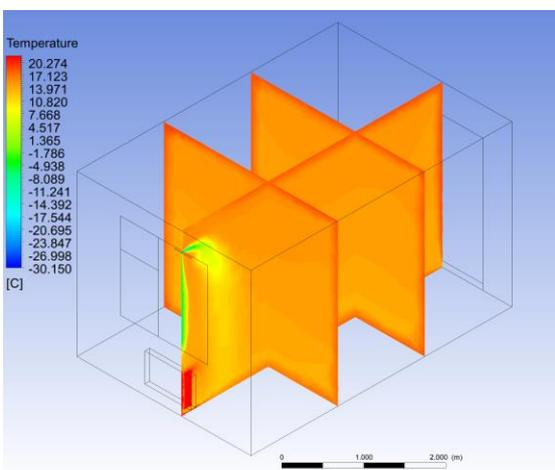


Рисунок 4.13 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, через 1 минуту (а) и 5 минут (б) после открытия приточного клапана

а



б

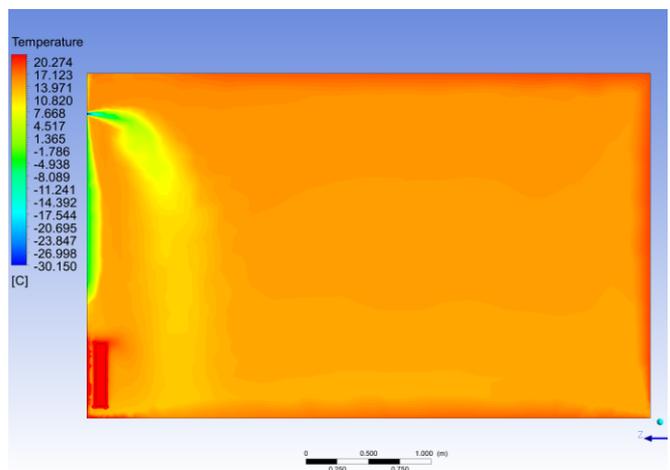


Рисунок 4.14 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима

а

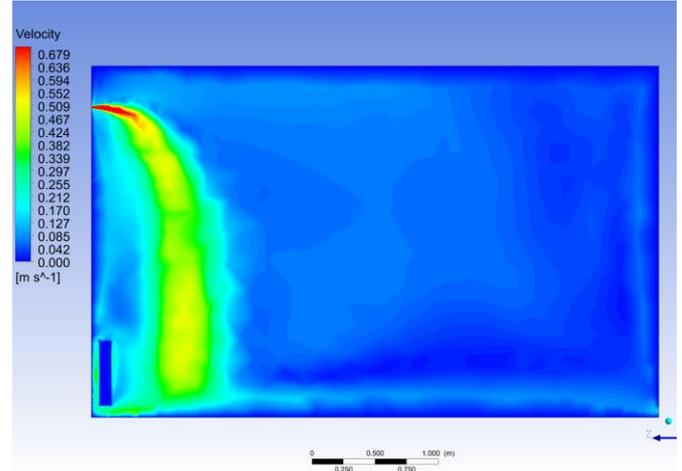
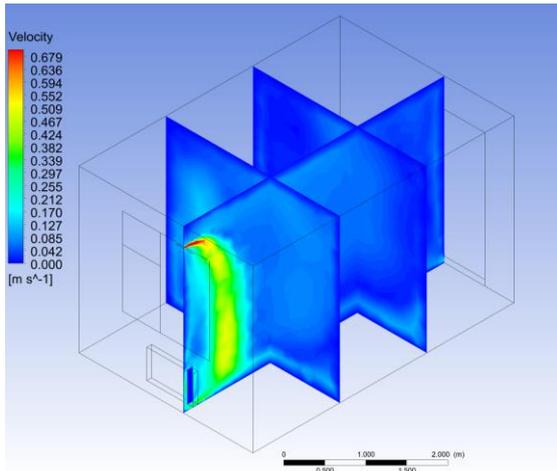


Рисунок 4.15 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима

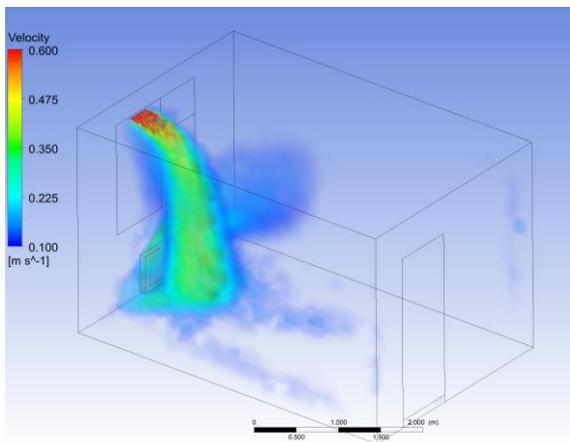


Рисунок 4.16 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, при достижении стационарного режима

При открытии приточного клапана в помещение поступает струя холодного воздуха, которая опускается в нижнюю зону помещения на расстоянии ≈ 1 м от наружной стены. Далее часть воздуха движется в сторону отопительного прибора, часть – распространяется по полу помещения. Наибольшие значения скоростей воздуха наблюдаются на выходе воздуха из приточного клапана (1,5 м/с).

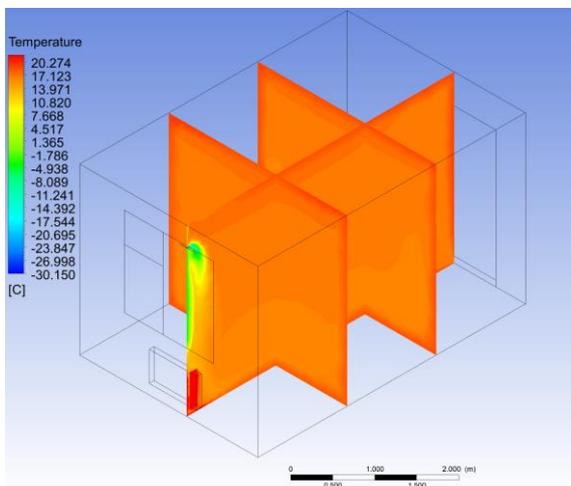
Через минуту после открытия клапана температура в нижней зоне помещения опускается в среднем на 2 °С, через 5 минут – 4 °С. Средняя температура по плоскости визуализации 1 через 5 минут после открытия клапана составляет $15,9$ °С, что ниже допустимых 18 °С в соответствии с [27]. Наибольшее снижение температуры наблюдается в зоне факела холодного воздуха, поступающего из клапана.

При достижении стационарного режима (рисунки 4.14 – 4.16) средняя температура по плоскости визуализации 1 снижается до $13,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, плоскости визуализации 2 – $14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, плоскости визуализации 3 – $14,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, что гораздо ниже допустимой величины. Средняя температура воздуха в помещении достигает $14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя скорость воздуха – $0,24\text{ м/с}$.

Снижение температуры внутри помещения очевидно связано с увеличением расхода приточного воздуха за счет включения вытяжных вентиляторов. Одним из возможных решений является регулирование скорости вращения вентиляторов и уменьшения воздухообмена квартиры в целом.

На рисунках 4.17 – 4.19 представлены результаты прогнозирования распределения воздушных потоков при регулировании скорости вращения вентиляторов до 50 % и установки клапанов постоянного расхода воздуха при достижении стационарного режима.

а



б

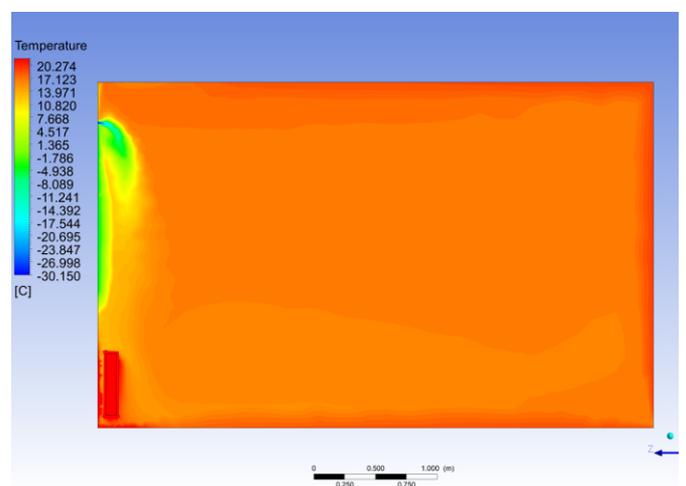
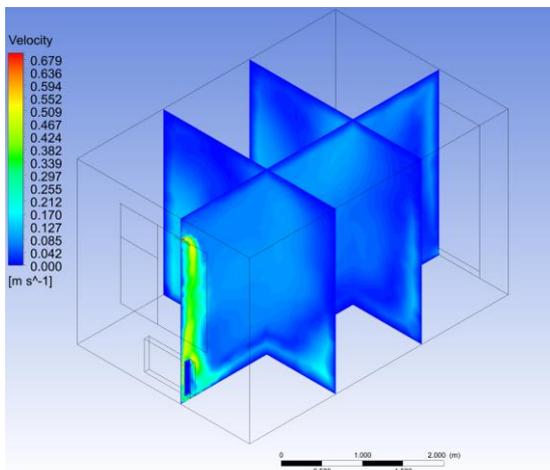


Рисунок 4.17 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима оконного приточного клапана после регулирования воздухообмена

а



б

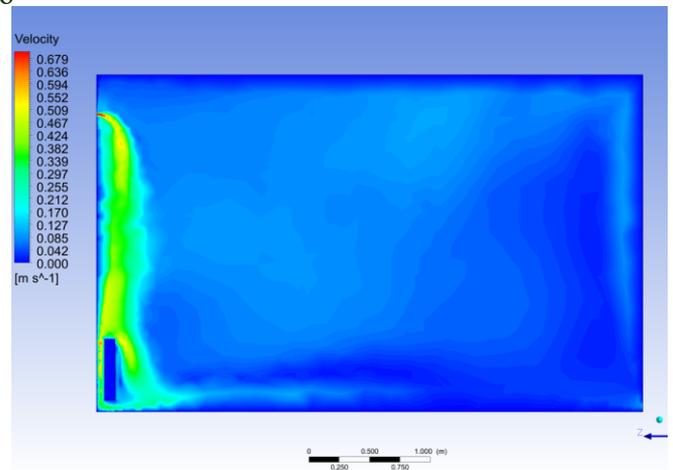


Рисунок 4.18 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима оконного приточного клапана после регулирования воздухообмена

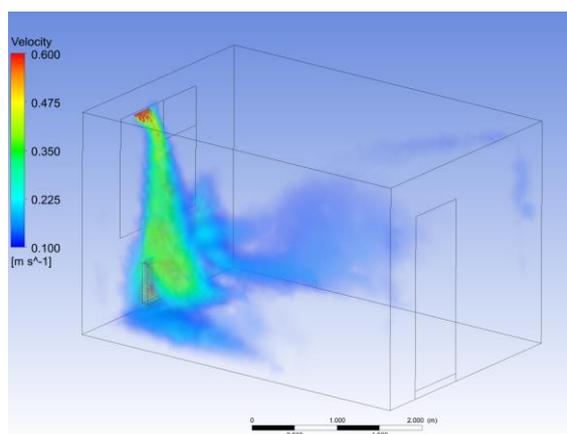


Рисунок 4.19 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, при достижении стационарного режима оконного приточного клапана после регулирования воздухообмена

Регулирование воздухообмена помещения приводит к уменьшению средней температуры по плоскости визуализации 1 до 11,3 °С, что связано с уменьшением расстояния между наружной стеной и областью падения приточной струи. Средняя температура в плоскости визуализации 2 поднимается до 17,3 °С, а в плоскости визуализации 3 – 17,4 °С, что ниже допустимого значения.

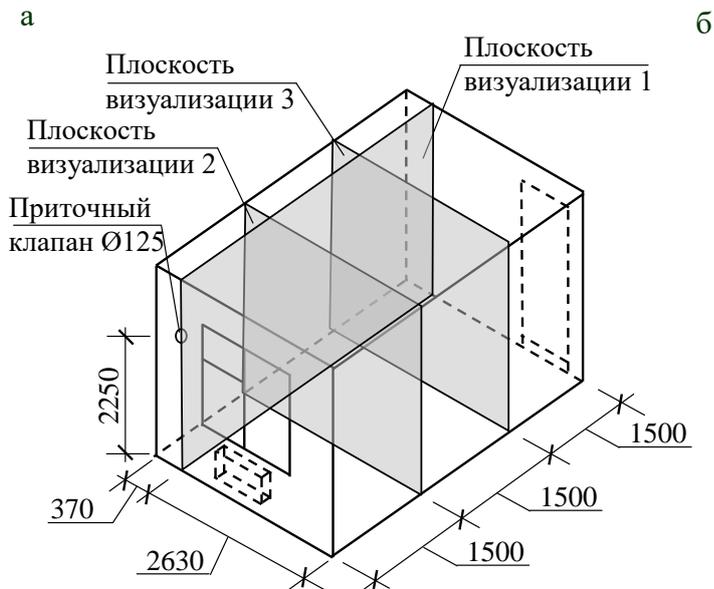
Средняя температура воздуха в помещении достигает 17 °С, что на 1 °С ниже минимального из допустимых значений в соответствии с [27].

4.3.4. Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении при установке стенового приточного клапана рядом с оконным блоком

Приточный клапан, устанавливаемый рядом с оконным блоком, моделировался в виде отверстия в стене диаметром 125 мм.

Визуализация полей температур и скоростей воздуха произведена по трем вертикальным плоскостям. Схема помещения с указанием расстояния от стен до плоскостей представлена на рисунке 4.20. Результаты моделирования полей скоростей и температур через 1 минуту после открытия приточного клапана при расходе приточного воздуха 68 м³/ч представлены на рисунках 3.21, 3.22.

Результаты моделирования полей скоростей и температур через 5 минут после открытия клапана при расходе приточного воздуха 68 м³/ч представлены на рисунках 4.23, 4.24. Распределение воздушных потоков внутри помещения представлено на рисунке 4.25.



б

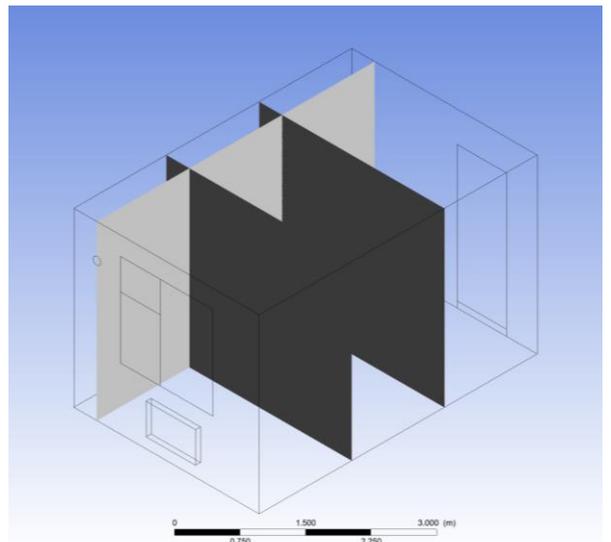
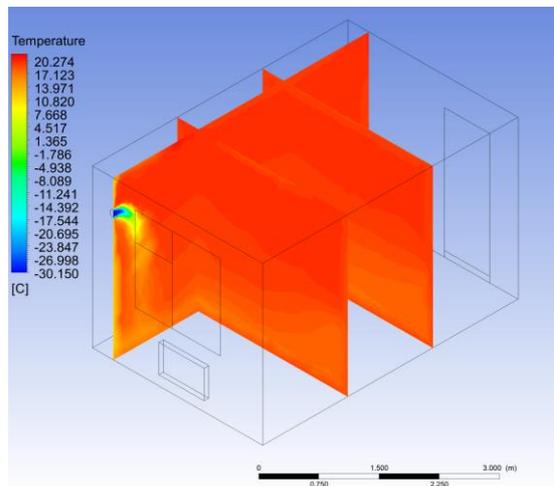


Рисунок 4.20 – Схема помещения с указанием плоскостей визуализации (а) и разработанная в графическом редакторе (б)

а



б

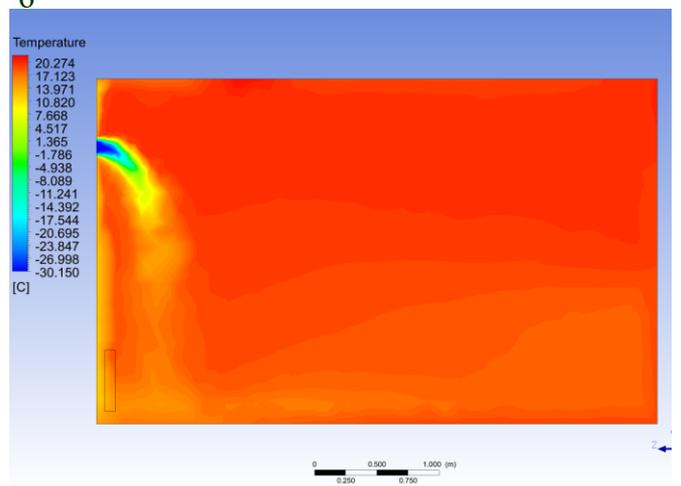
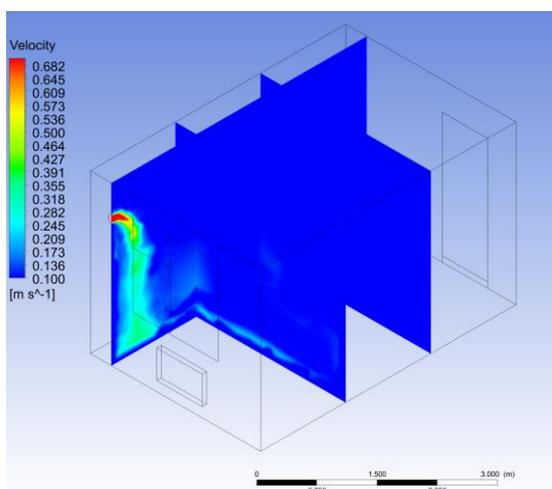


Рисунок 4.21 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 1 минуту после открытия приточного клапана

а



б

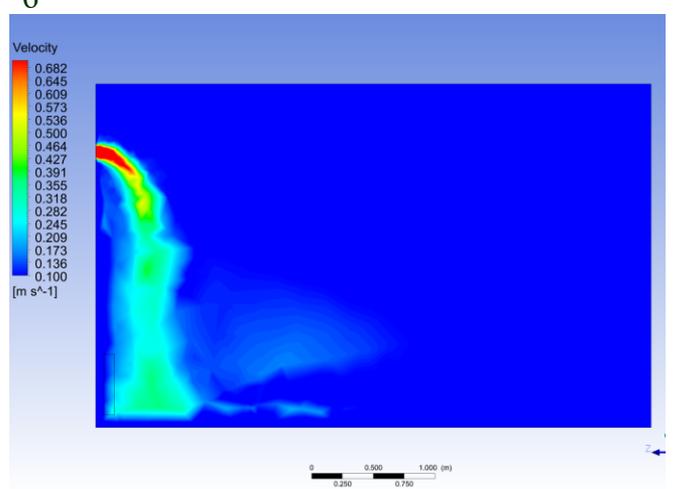
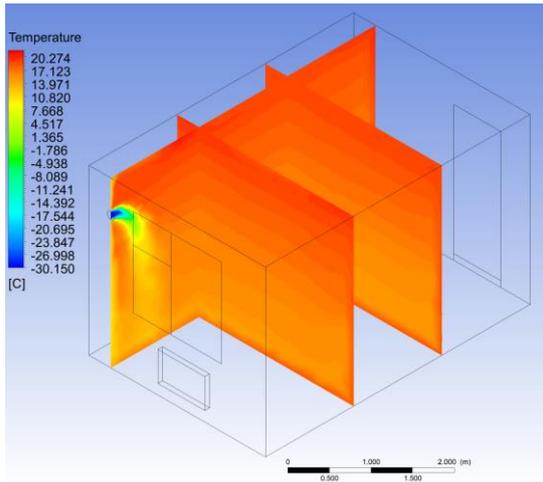


Рисунок 4.22 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 1 минуту после открытия приточного клапана

а



б

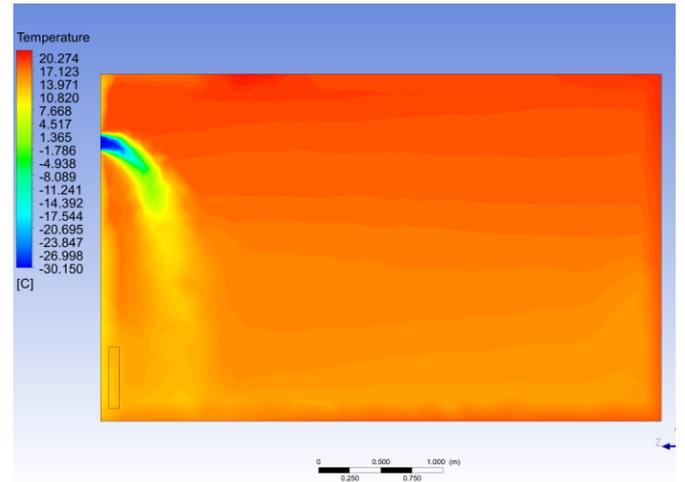
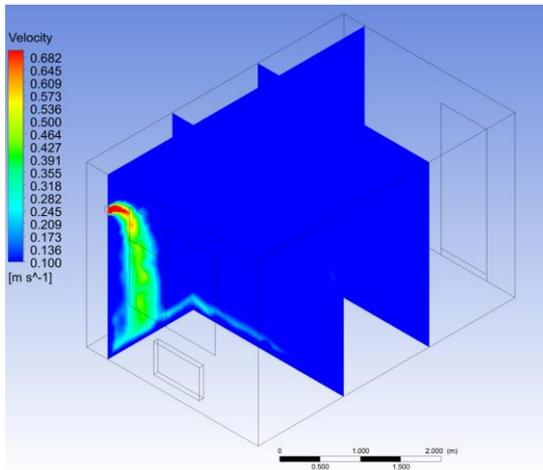


Рисунок 4.23 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 5 минут после открытия приточного клапана

а



б

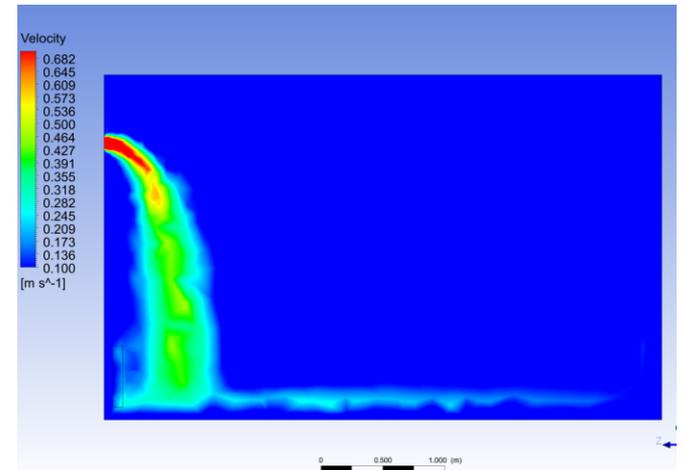
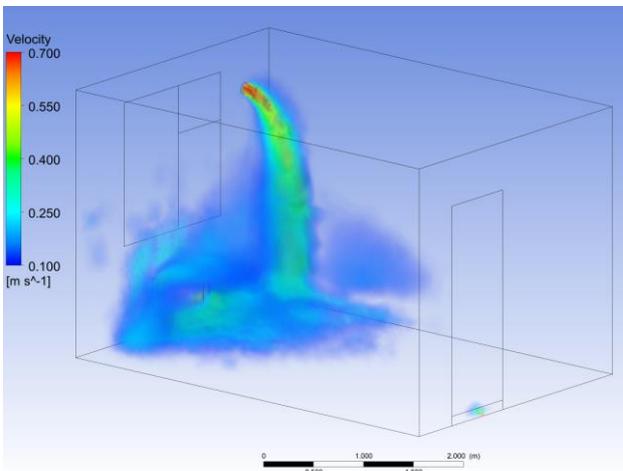


Рисунок 4.24 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 5 минут после открытия приточного клапана

а



б

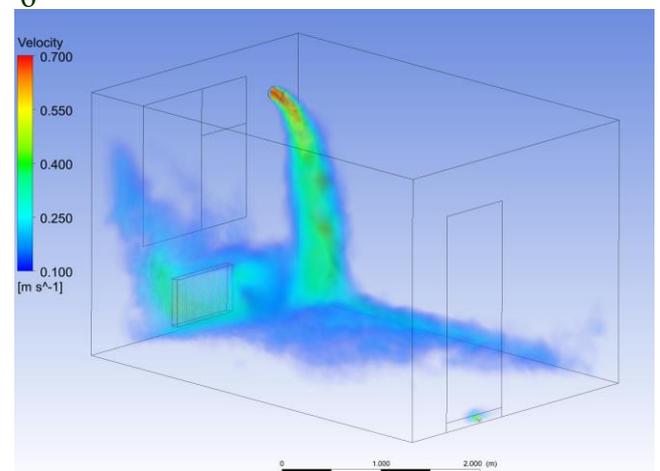
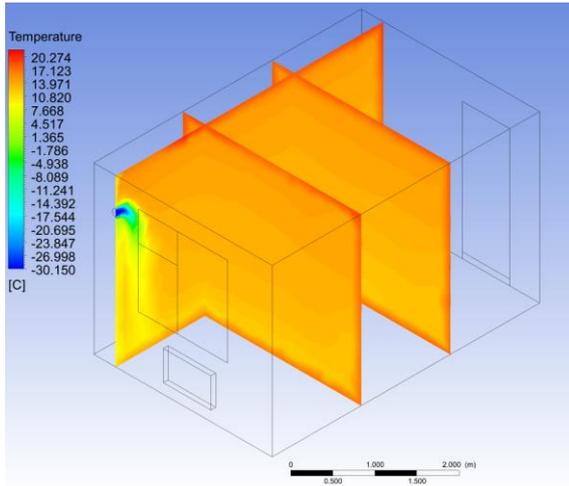


Рисунок 4.25 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, через 1 минуту (а) и 5 минут (б) после открытия приточного клапана

а



б

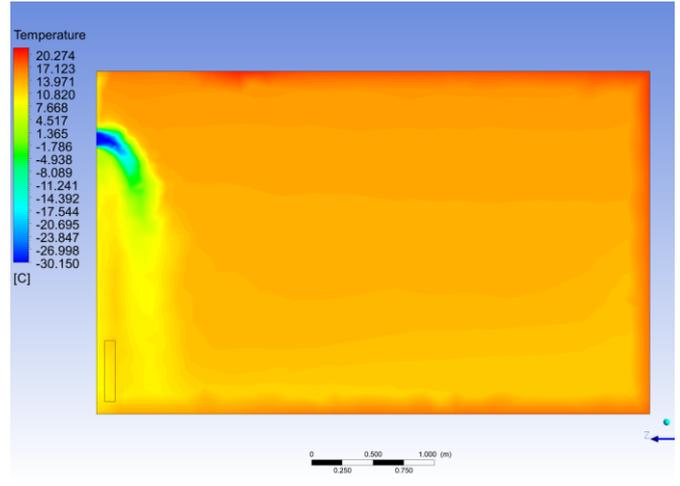
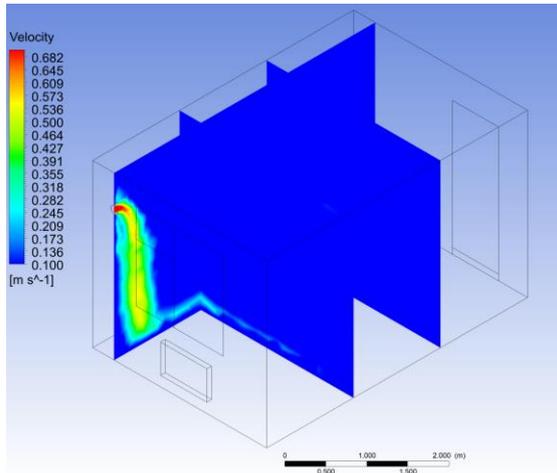


Рисунок 4.26 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима

а



б

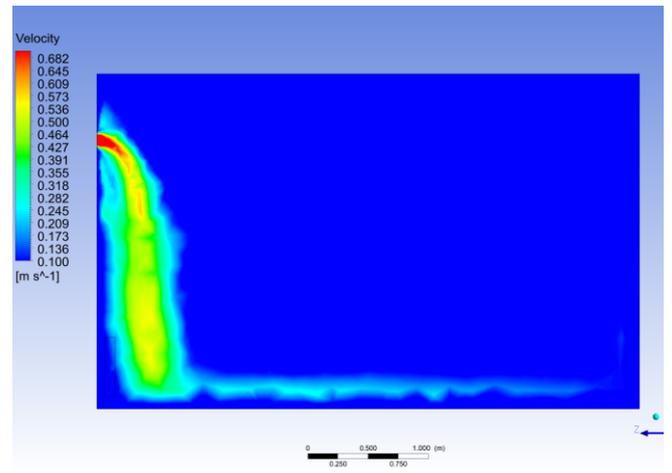


Рисунок 4.27 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима

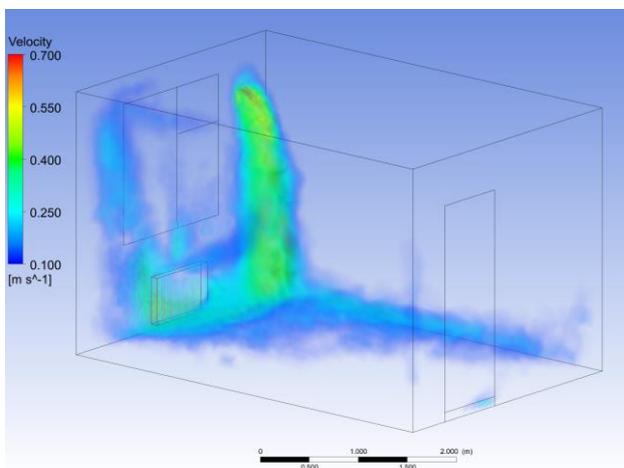


Рисунок 4.28 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, при достижении стационарного режима

При открытии приточного клапана в помещение поступает струя холодного воздуха, которая опускается в нижнюю зону помещения на расстоянии 0,6 м от наружной стены. Далее часть воздуха движется в сторону отопительного прибора, часть – распространяется по полу помещения. Наибольшие значения скоростей воздуха наблюдаются на выходе воздуха из приточного клапана (0,77 м/с).

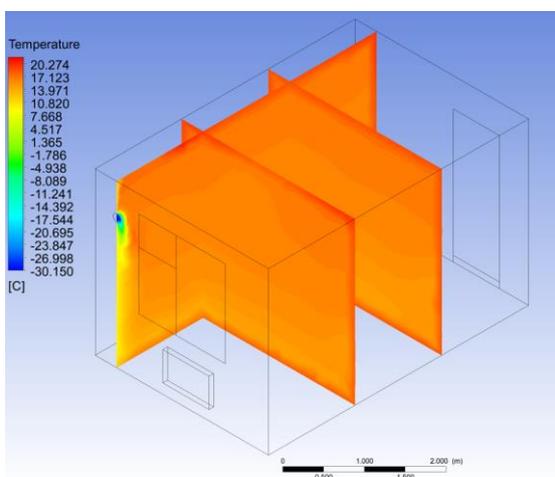
Через минуту после открытия клапана температура в нижней зоне помещения опускается в среднем на 2,5 °С, через 5 минут – 5 °С. Средняя температура по плоскости визуализации 1 через 5 минут после открытия клапана составляет 12,7 °С, что значительно ниже допустимых 18 °С в соответствии с [27]. Наибольшее снижение температуры наблюдается в зоне факела холодного воздуха, поступающего из клапана.

При достижении стационарного режима (рисунки 4.26 – 4.28) средняя температура по плоскости визуализации 1 снижается до 8,7 °С, плоскости визуализации 2 – 13,7 °С, плоскости визуализации 3 – 13,8 °С. Средняя температура воздуха в помещении – 13,7 °С, что гораздо ниже допустимой величины. Средняя скорость воздуха – 0,16 м/с.

Снижение температуры внутри помещения, как и с оконным клапаном, очевидно связано с увеличением расхода приточного воздуха за счет включения вытяжных вентиляторов. При этом большее снижение температуры внутреннего воздуха наблюдается у стенового клапана, установленного рядом с оконным блоком. Также следует отметить, что для более точного моделирования работы приточного стенового клапана необходимо прорисовка модели оголовка приточного клапана.

На рисунках 4.29 – 4.31 представлены результаты прогнозирования распределения воздушных потоков при регулировании скорости вращения вентиляторов до 50 % и установки клапанов постоянного расхода воздуха при достижении стационарного режима.

а



б

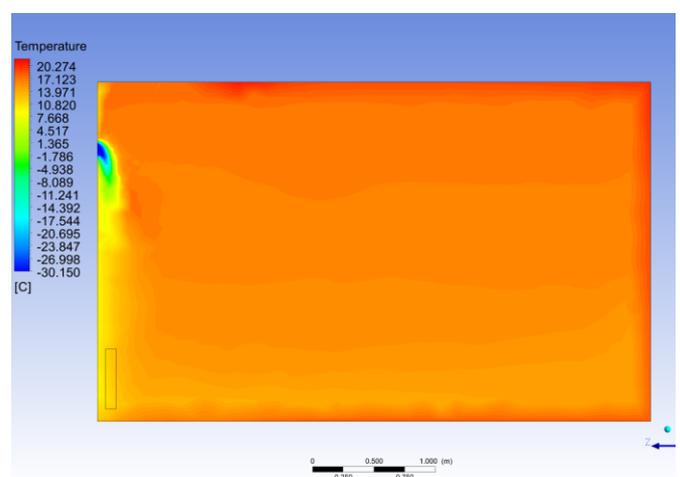
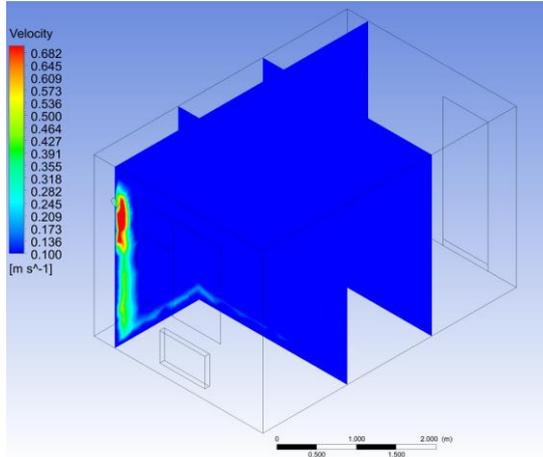


Рисунок 4.29 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима стенового приточного клапана, установленного рядом с оконным блоком после регулирования воздухообмена

а



б

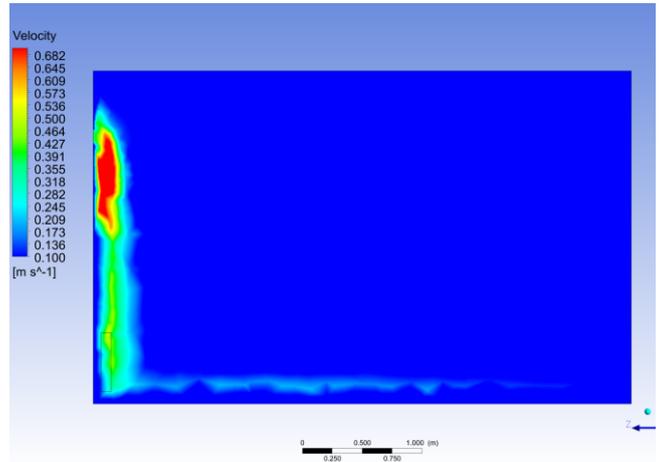


Рисунок 4.30 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима стенового приточного клапана, установленного рядом с оконным блоком после регулирования воздухообмена

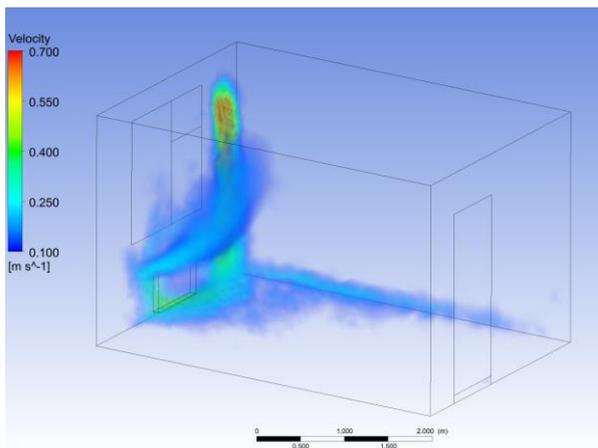


Рисунок 4.31 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, при достижении стационарного режима стенового приточного клапана, установленного рядом с оконным блоком после регулирования воздухообмена

Регулирование воздухообмена помещения приводит к увеличению средней температуры в плоскости визуализации 1 до 12,7 °С, в плоскости визуализации 2 – до 16,1 °С, а в плоскости визуализации 3 – до 16,2 °С,

Средняя температура воздуха в помещении поднимается до 16,4 °С, что, тем не менее, ниже минимально допустимых 18 °С в соответствии с [27].

4.3.5. Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении при установке стенового приточного клапана над отопительным прибором

Приточные стеновые клапаны, устанавливаемые непосредственно над отопительным прибором, моделировался в виде решетки с четырьмя прямоугольными отверстиями размерами 10x400 мм.

Визуализация полей температур и скоростей воздуха произведена по трем вертикальным плоскостям. Схема помещения с указанием расстояния от стен до плоскостей представлена на рисунке 4.32. Результаты моделирования полей скоростей и температур через 1 минуту после открытия приточного клапана при расходе приточного воздуха $60 \text{ м}^3/\text{ч}$ представлены на рисунках 4.33, 4.34.

Результаты моделирования полей скоростей и температур через 5 минут после открытия клапана при расходе приточного воздуха $60 \text{ м}^3/\text{ч}$ представлены на рисунках 4.36, 4.37. Распределение воздушных потоков внутри помещения представлено на рисунке 4.38.

При открытии приточного клапана часть холодного воздуха падает на отопительный прибор, другая часть – за отопительный прибор и опускается до пола за отопительным прибором, после чего направляется в сторону помещения. Наибольшие значения скоростей наблюдаются в зоне за отопительным прибором (до 1,1 м/с). Скоростей воздуха на выходе воздуха из приточного клапана – 0,5 м/с.

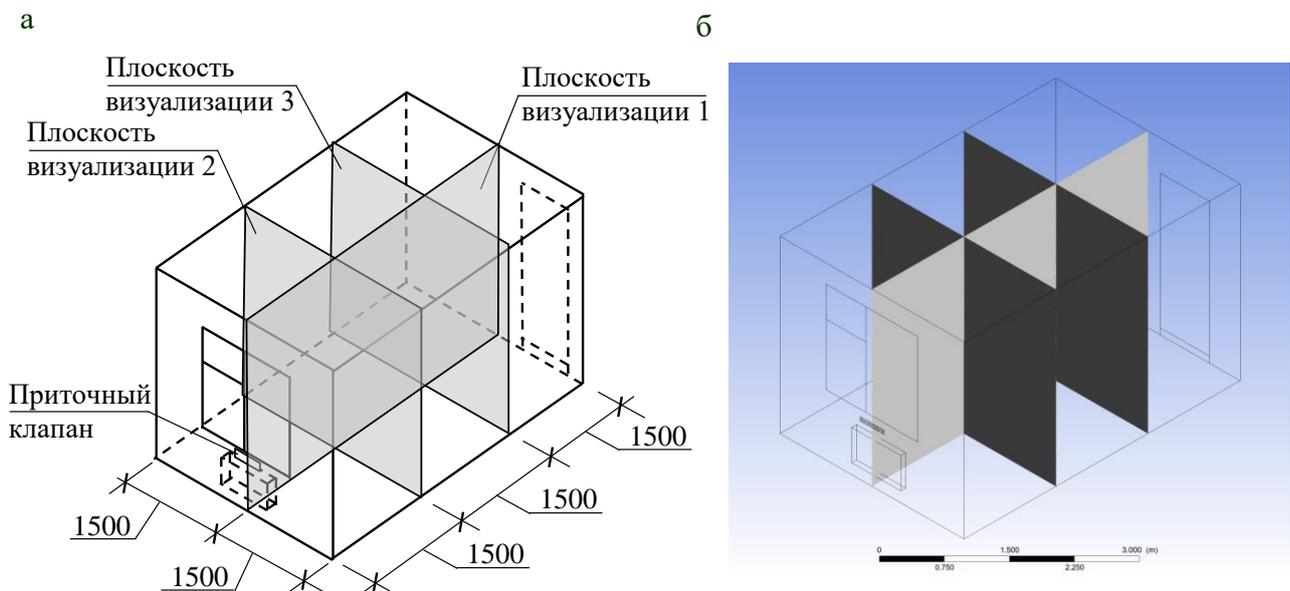


Рисунок 4.32 – Схема помещения с указанием плоскостей визуализации (а) и разработанная в графическом редакторе (б)

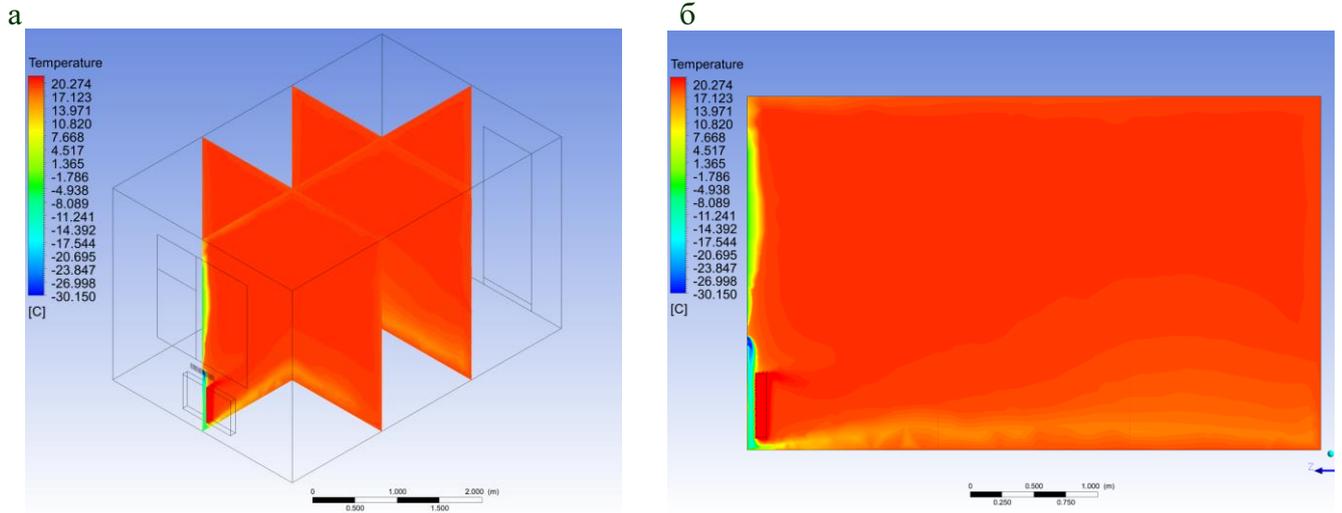


Рисунок 4.33 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 1 минуту после открытия приточного клапана

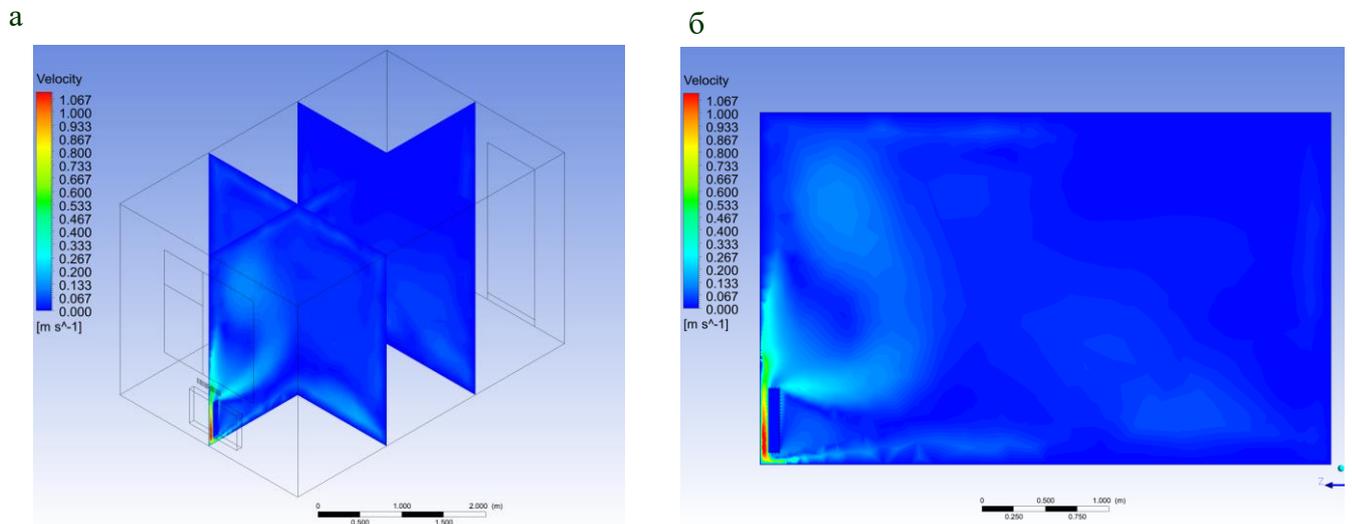


Рисунок 4.34 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 1 минуту после открытия приточного клапана

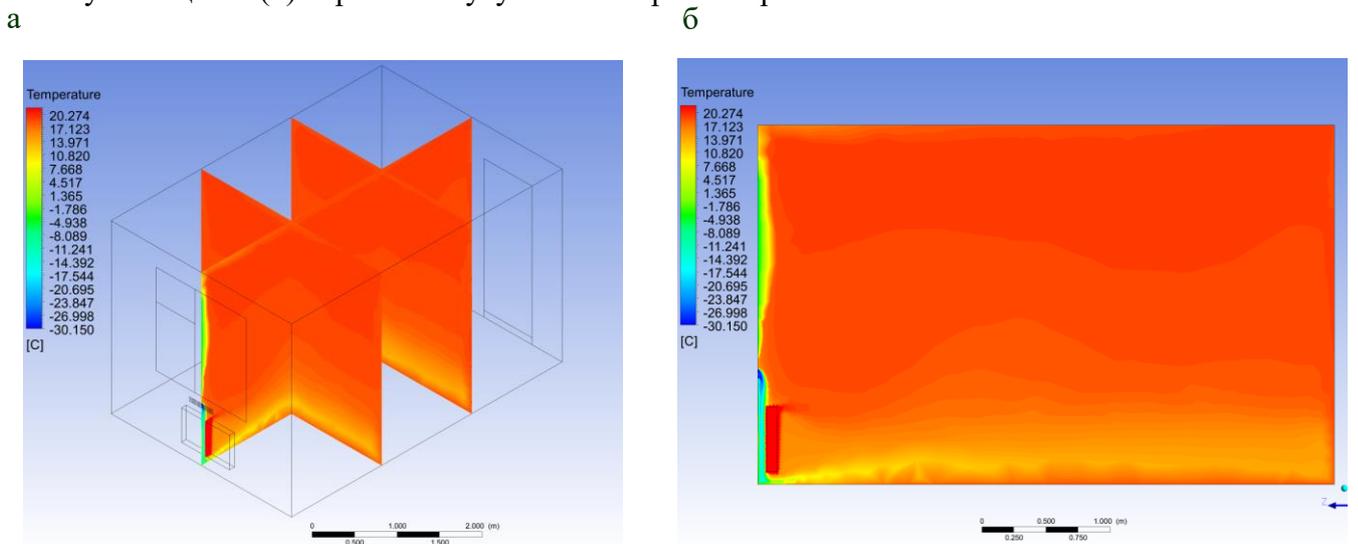
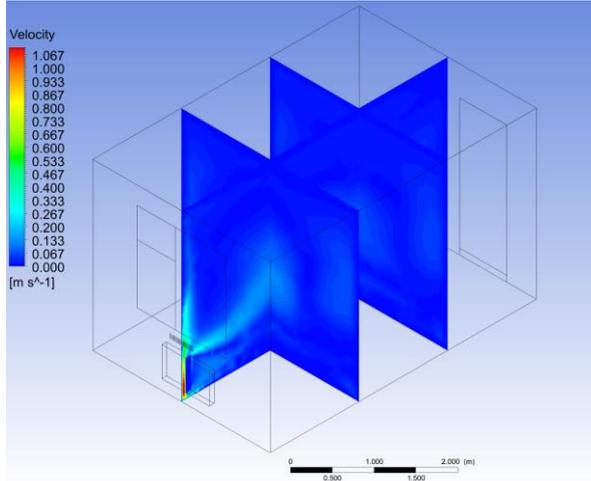


Рисунок 4.35 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 5 минут после открытия приточного клапана

а



б

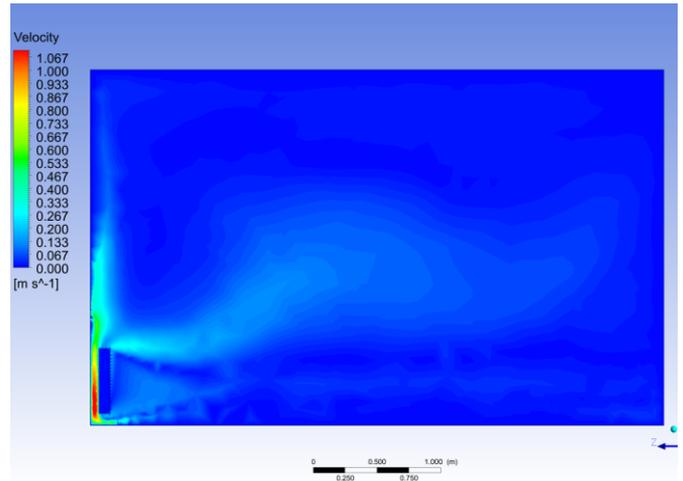
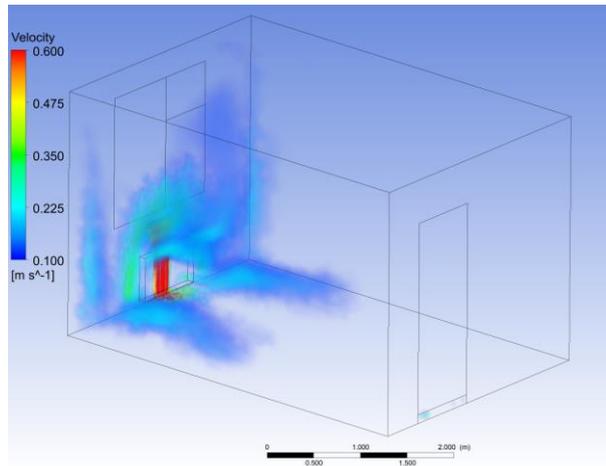


Рисунок 4.36 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) через 5 минут после открытия приточного клапана

а



б

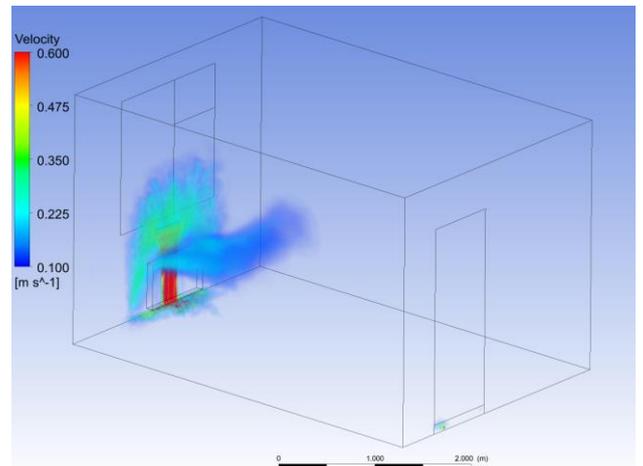
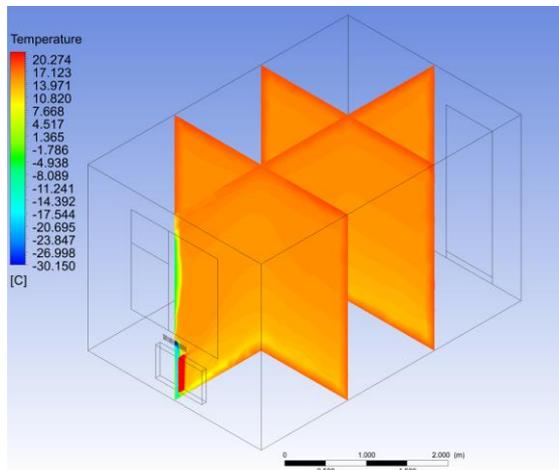


Рисунок 4.37 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, через 1 минуту (а) и 5 минут (б) после открытия приточного клапана

а



б

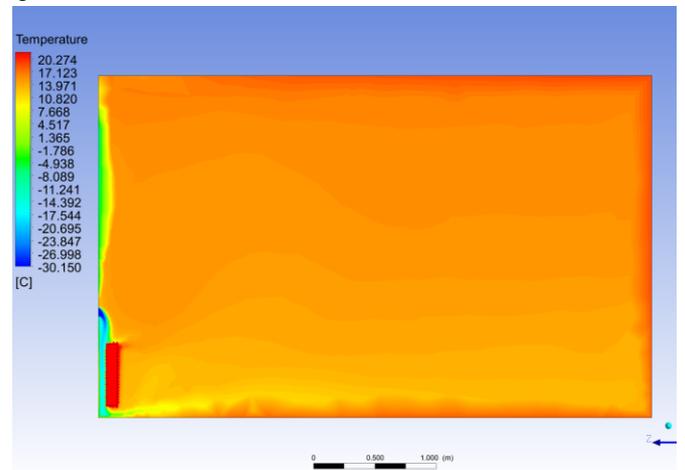
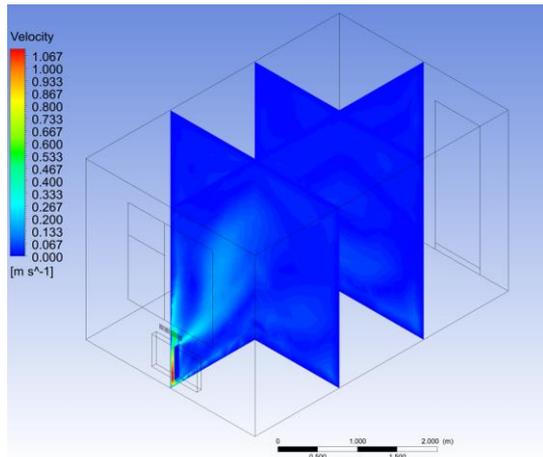


Рисунок 4.38 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима

а



б

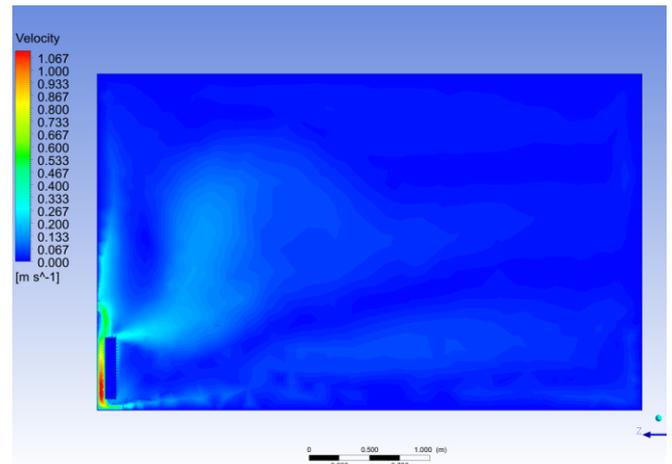


Рисунок 4.39 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима

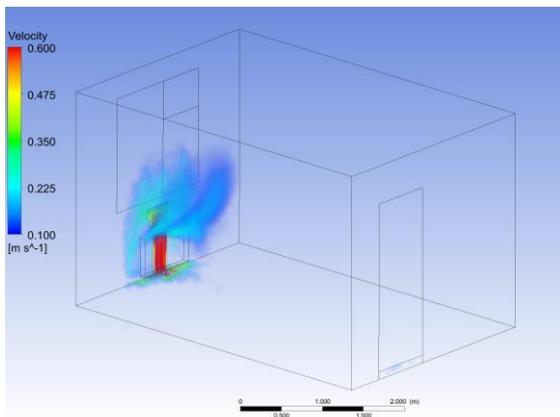


Рисунок 4.40 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, при достижении стационарного режима

Через минуту после открытия клапана температура воздуха в помещении изменяется незначительно. Снижение температуры в нижней зоне помещения 1–2 °С. Через 5 минут у пола помещения наблюдается снижение температуры на 6–7 °С. Средняя температура по плоскости визуализации 1 через 5 минут после открытия клапана составляет 9,1 °С, что значительно ниже допустимых 18 °С в соответствии с [27], что связано с низкой температурой в области отопительного прибора. При этом в большей части помещений температура не снижается ниже 19°С.

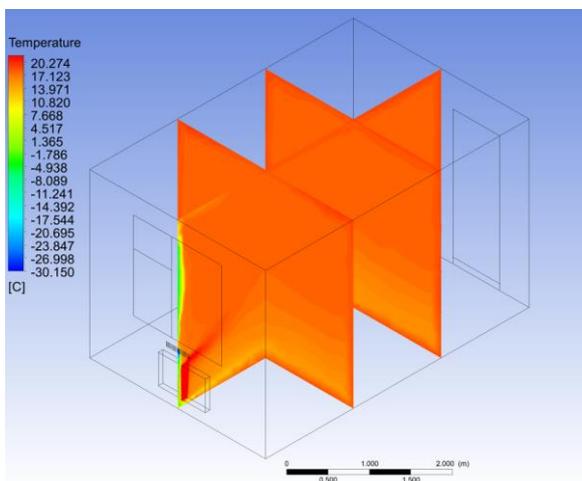
При достижении стационарного режима (рисунки 4.48 – 4.40) средняя температура по плоскости визуализации 1 снижается до 5,9 °С, при этом в плоскости визуализации 2 средняя температура составляет 15,0 °С, в плоскости визуализации 3 – 15,1 °С, что также ниже допустимой величины. Следует отметить, что температура в большей части помещения при установке

клапана над отопительным прибором выше по сравнению с другими клапанами. Средняя температура воздуха в помещении достигает $15,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя скорость воздуха – $0,23\text{ м/с}$.

На рисунках 4.41 – 4.43 представлены результаты прогнозирования распределения воздушных потоков при регулировании скорости вращения вентиляторов до 50 % и установки клапанов постоянного расхода воздуха при достижении стационарного режима.

Регулирование воздухообмена помещения приводит к снижению средней температуры в плоскости визуализации 1 до $11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что связано с низкой температурой воздуха за отопительным прибором. Средняя температура в плоскости визуализации 2 возрастает до $17,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в плоскости визуализации 3 – до $17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средняя температура воздуха в помещении достигает $17,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

а



б

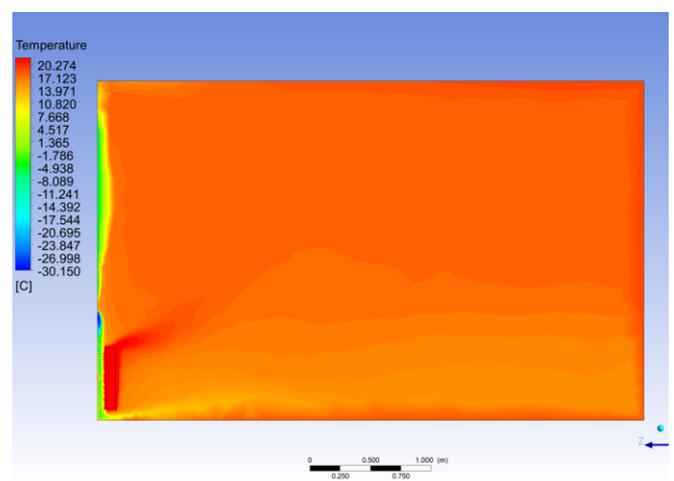
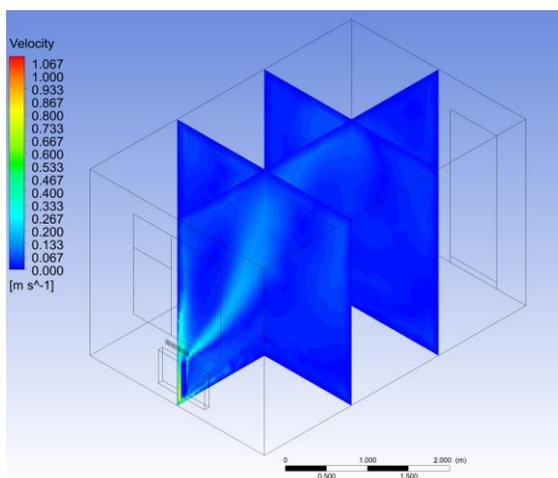


Рисунок 4.41 – Поле температуры по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима стенового приточного клапана, установленного над отопительным прибором после регулирования воздухообмена

а



б

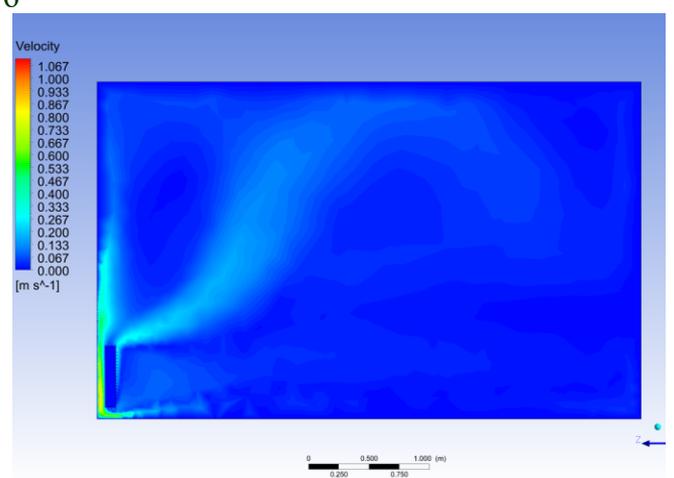


Рисунок 4.42 – Поле скорости по всем плоскостям визуализации (а) и отдельно по плоскости визуализации 1 (б) при достижении стационарного режима стенового приточного клапана, установленного над отопительным прибором после регулирования воздухообмена

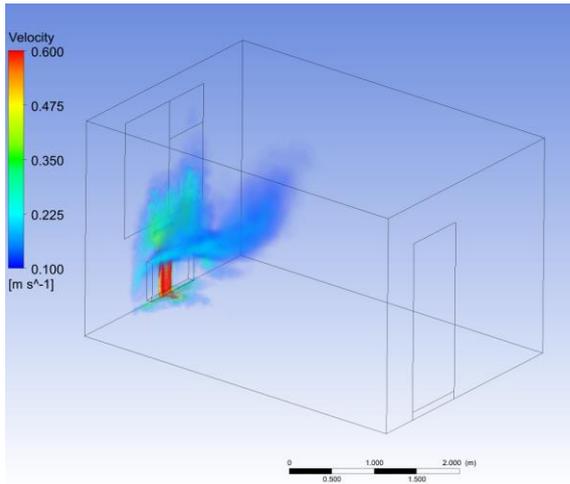


Рисунок 4.43 – Распределение воздушных потоков внутри помещения, полученное с помощью объемного рендеринга полей скоростей, при достижении стационарного режима стенового приточного клапана, установленного над отопительным прибором после регулирования воздухообмена

Следует отметить, что характер распределения полей скоростей и температур в помещении при работе всех приточных клапанов близок к результатам, полученным в работах [29, 33]. Установка конвекторов вместо радиаторов может в лучшую сторону повлиять на температурный режим помещения.

4.3.6. Оценка влияния регулирования воздухообмена на температурный режим помещения и теплопотери помещения при различных температурах наружного воздуха

Результаты моделирования распределения воздушных потоков в помещении показывают, что регулирование воздухообмена помещения за счет изменения скорости вращения вентиляторов позволяет управлять параметрами микроклимата в помещении.

Оценка влияния регулирования воздухообмена на температурный режим помещения и величину теплопотерь произведена на основании серии расчетов при варьировании следующих параметров:

- температура наружного воздуха t_n : $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- расход приточного воздуха L : $10\text{ м}^3/\text{ч}$, $20\text{ м}^3/\text{ч}$, $40\text{ м}^3/\text{ч}$, $60\text{ м}^3/\text{ч}$.

Начальная температура внутреннего воздуха – $t_b = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Оценка влияния регулирования воздухообмена на температурный режим помещения и величину теплопотерь решена методами вычислительной гидродинамики CFD с применением программного пакета Ansys Fluent. В качестве примера рассматривался случай с установкой при-

точного клапана в створке оконного блока. Исходные данные к расчету приведены в § 4.3.1. Расчетная схема помещения представлена на рисунке 4.8. Створки окон и форточка закрыты.

Результаты изменения средней температуры внутреннего воздуха в помещении представлены в таблице 4.1 и на рисунке 4.44.

Таблица 4.1

Средняя температура внутреннего воздуха при регулировании воздухообмена помещения

Расход приточного воздуха L , м ³ /ч	Средняя температура внутреннего воздуха $t_{вн}$, при температуре наружного воздуха $t_{н}$, °С		
	-10	-20	-30
10	20,1	19,4	18,7
20	19,6	18,6	17,6
40	18,4	17,0	16,0
60	17,2	15,9	14,6

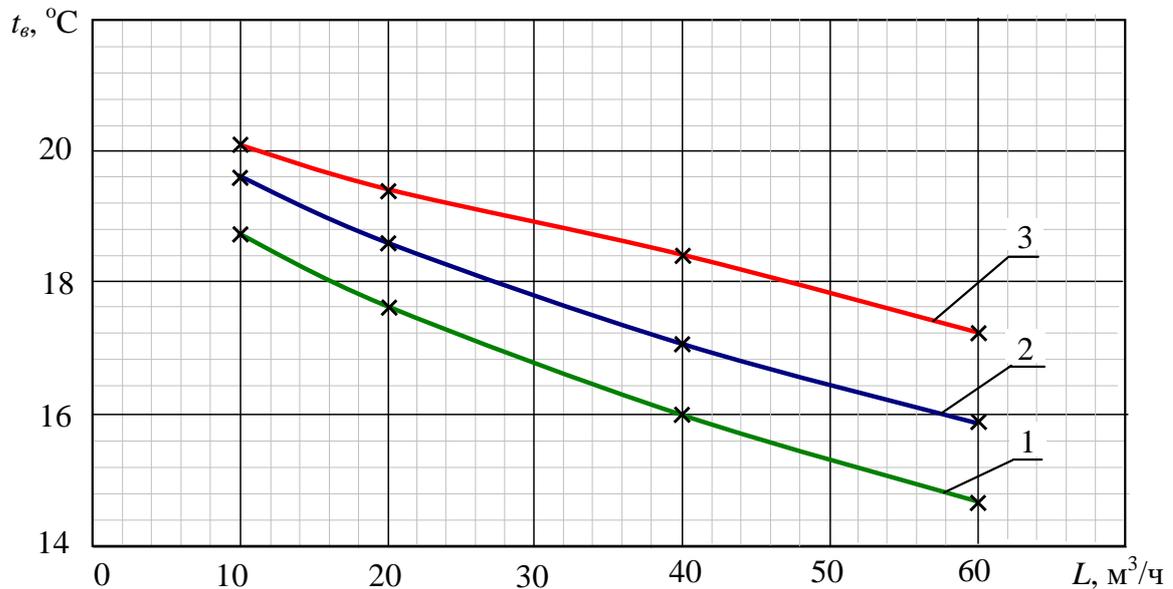


Рисунок 4.44 – Изменение температуры внутреннего воздуха в помещении при регулировании воздухообмена: 1 – температура наружного воздуха -30 °С; 2 – температура наружного воздуха -20 °С; 3 – температура наружного воздуха -10 °С

Анализ результатов показывает, что регулирование воздухообмена помещения обуславливает изменение средней температуры внутреннего воздуха и соответственно теплопотерь помещения во всех вариантах (при различных значениях температуры наружного воздуха).

Результаты изменения теплопотерь помещения представлены в таблице 4.2 и на рисунке 4.45.

Таблица 4.2

Теплопотери помещения Q при регулировании величины воздухообмена

Наименование	Теплопотери Q , Вт, при расходе приточного воздуха L , м ³ /ч			
	10	20	40	60
$t_{\text{нар}} -30\text{ }^{\circ}\text{C}$				
Нагрев приточного воздуха	106	211	422	638
Форточка	49	48	46	46
Створка окна 1	198	197	190	185
Створка окна 2	102	100	95	94
Наружная стена	270	268	264	259
Суммарные теплопотери ΣQ	725	824	1017	1222
$t_{\text{нар}} -20\text{ }^{\circ}\text{C}$				
Нагрев приточного воздуха	86	173	345	522
Форточка	41	41	41	38
Створка окна 1	162	159	156	153
Створка окна 2	85	86	83	78
Наружная стена	222	219	216	212
Суммарные теплопотери ΣQ	596	678	841	1003
$t_{\text{нар}} -10\text{ }^{\circ}\text{C}$				
Нагрев приточного воздуха	67	134	269	407
Форточка	33	32	32	30
Створка окна 1	126	125	120	113
Створка окна 2	68	67	62	60
Наружная стена	172	172	168	165
Суммарные теплопотери ΣQ	466	530	651	775

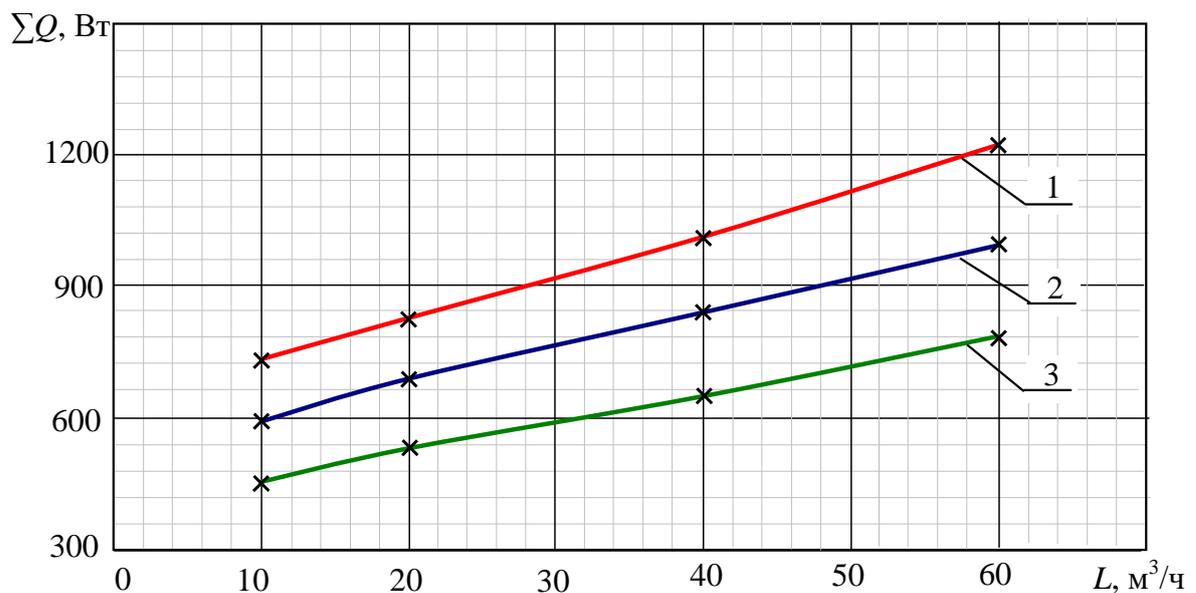


Рисунок 4.45 – Изменение суммарных теплопотерь помещения при регулировании воздухообмена: 1 – температура наружного воздуха $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – температура наружного воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – температура наружного воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

С увеличением расхода приточного воздуха возрастают затраты теплоты на его подогрев и соответственно суммарные теплопотери помещения. Регулирование воздухообмена может привести к сокращению суммарных теплопотерь. Например, снижение расхода с $40 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $20 \text{ м}^3/\text{ч}$ при температуре наружного воздуха $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ может привести к сокращению суммарных теплопотерь на 19%, а снижение расхода с $60 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ – на 40%.

Результаты оценки влияния регулирования воздухообмена на температурный режим и теплопотери помещения показывают, что регулирование воздухообмена за счет управления работой вентиляторов позволяет повысить среднюю температуру воздуха и снизить теплопотери помещения за счет снижения затрат теплоты на подогрев приточного воздуха.

Выводы по главе 4

1. Анализ применяемых методов расчета турбулентных течений и математических моделей турбулентности показывает, что моделирование распределения воздушных потоков в помещении с использованием методов вычислительной гидродинамики наиболее целесообразно методом решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS) с применением $k - \varepsilon$ модели турбулентности.

2. Анализ результатов моделирования распределения воздушных потоков в помещении показывает, что:

– увеличение расхода приточного воздуха, связанное с включением вытяжных вентиляторов в системах механической вытяжной вентиляции с индивидуальными вентиляторами, может значительно снизить температуру внутреннего воздуха в помещении независимо от вариантов организации притока воздуха в помещения;

– проветривание помещений за счет открытия форточек может привести к значительному снижению температуры внутреннего воздуха помещений уже через 5 минут после открытия форточки и к переохлаждению помещения;

– сравнительный анализ вариантов организации притока воздуха в помещении показывает, что наиболее эффективным решением является установка приточных клапанов непосредственно над отопительными приборами.

3. Регулирование воздухообмена помещений за счет управления работой вентиляторов позволяет повысить среднюю температуру воздуха в помещении и снизить теплопотери помещения за счет снижения затрат теплоты на подогрев приточного воздуха.

5. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЗДАНИЙ С ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ВЫТЯЖНЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ И РЕГУЛИРУЕМЫМ ВОЗДУХООБМЕНОМ

5.1. Разработка устройства, управляющего работой индивидуального вытяжного вентилятора

Управление скоростью вращения вытяжных вентиляторов с достаточной эффективностью позволяет регулировать воздухообмен помещений в соответствии с требованиями потребителей. Управление может осуществляться либо вентиляторами с встроенными функциями программирования, либо с помощью специальных блоков управления, позволяющих программировать работу вытяжных вентиляторов, не имеющих функций программирования. Возможность программирования режимов работы по времени и показаниям датчиков различного типа (влажности, температуры углекислого газа и т.д.), позволяет учесть требования в зависимости от соответствующих показателей (повысить комфорт потребителей) и автоматизировать работу системы вентиляции в целом.

В общем случае устройство должно включать следующие функции:

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

При этом устройство должно иметь небольшие габариты, обеспечивающие возможность его монтажа в существующие элементы бытовой электрической сети.

Внешний вид и схема требуемого устройства с указанием основных элементов представлены на рисунках 5.1, 5.2.

С учетом проведенных исследований был разработан алгоритм программирования работы устройства (рисунок 5.3).

В приложении Б представлена общая электрическая схема блока управления вентилятора в целом. Схемы отдельных элементов – панели управления, блока питания и блока управления нагрузкой приведены в приложении В.

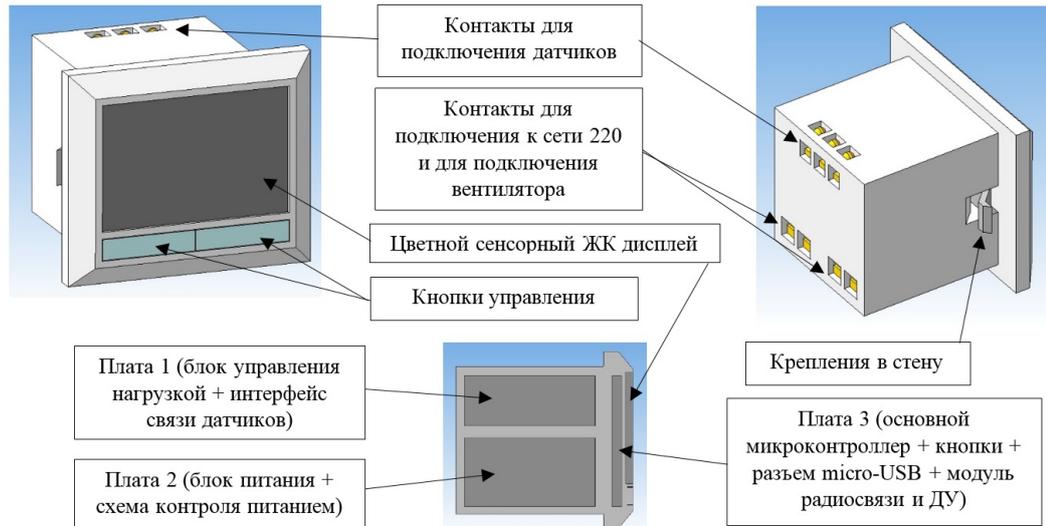


Рисунок 5.1 – Внешний вид требуемого устройства, регулирующего работу вентилятора с указанием основных элементов

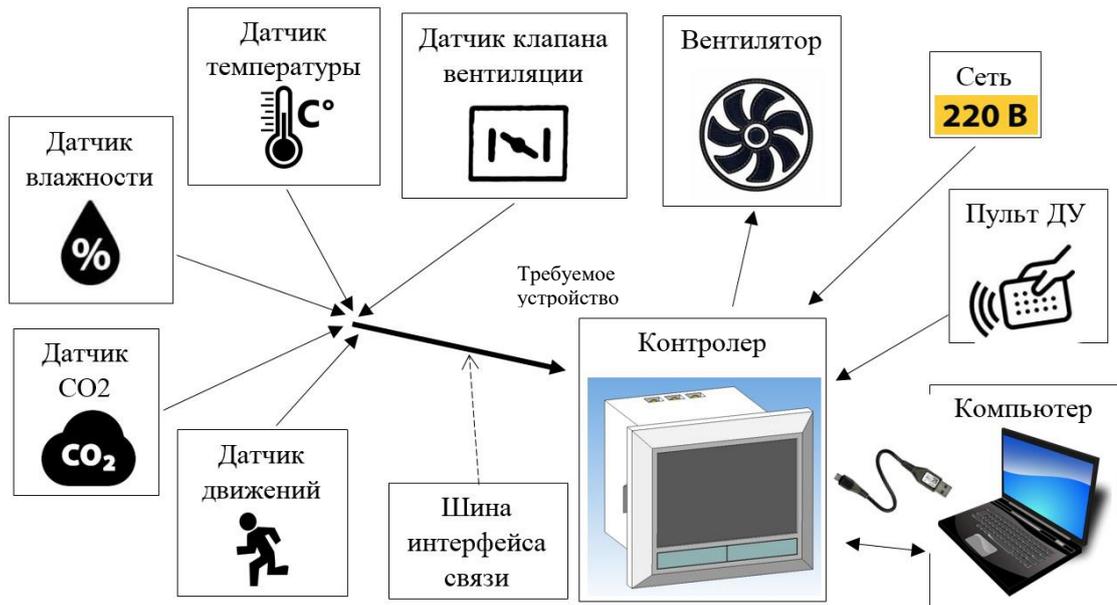


Рисунок 5.2 – Схема требуемого устройства, регулирующего работу вентилятора с указанием основных элементов

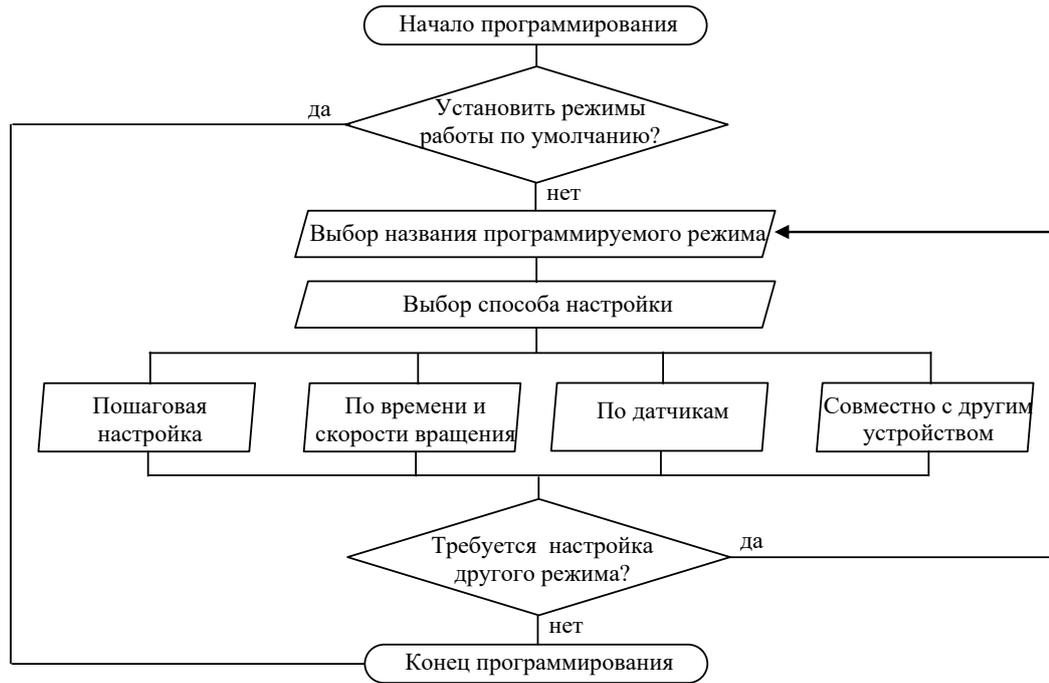


Рисунок 5.3 – Алгоритм программирования работы устройства, управляющего работой вентилятора

В качестве опытного образца было разработано устройство (блок управления вентилятором) с возможностью программирования режимов работы вентилятора по времени и по скорости вращения для вентиляторов мощностью от 10 Вт. Внешний вид устройства представлен на рисунке 5.4.



Рисунок 5.4 – Внешний вид опытного образца устройства, управляющего работой вентилятора

Внешний вид панели управления, блоков питания и управления нагрузкой, схема регулирования опытного образца представлены в приложении Г. Основные технические характеристики устройства приведены в приложении Д.

С целью определения влияния регулирования вентиляторов с помощью разработанного устройства в соответствии с требованиями ГОСТ [26] были определены аэродинамические характеристики бытовых вентиляторов.

По результатам испытаний получены аэродинамические характеристики исследуемых вентиляторов, а также аэродинамические характеристики вентиляторов при регулировании их скорости вращения. Измеренные характеристики представлены в приложении Е.

Для оценки работоспособности разработанного устройства и эффективности регулирования воздухообмена помещений были проведены натурные исследования систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

5.2. Результаты натурных исследований систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами

5.2.1. Цель и задачи натурных исследований

Цель натурных исследований – проверка ряда закономерностей, полученных по результатам расчетов систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами, оценка работоспособности разработанных опытных образцов устройства, управляющих работой индивидуальных вытяжных вентиляторов.

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.

Исследования проведены на двух объектах – системах вентиляции квартир, расположенных в многоквартирных жилых домах.

5.2.2. Результаты натурных исследований системы вентиляции трехкомнатной квартиры шестнадцатизэтажного жилого дома

5.2.2.1. Краткая характеристика объекта исследования

Объект исследований – система вентиляции трехкомнатной квартиры, расположенной на восьмом этаже шестнадцатизэтажного жилого дома в г. Омске.

Квартира включает кухню, три жилые комнаты, коридор, ванную, туалет и балкон.

Конструктивная схема здания – каркасная, с опиранием наружных и внутренних стен на межэтажные железобетонные перекрытия. Высота этажа - 3,0 м. Наружные стены – двухслойные, с теплоизоляционным слоем из газобетона и облицовочным слоем из силикатного кирпича. Заполнение оконных проемов – оконные блоки из ПВХ-профилей с двухкамерными стеклопакетами из обычного стекла и заполнением межстекольного пространства воздухом. Входные двери – металлические, утепленные. Лестничная клетка – незадымляемая, с лифтовой шахтой.

Внешний вид здания приведен на рисунке 5.5. Схематичный план квартиры приведен на рисунке 5.6.

Система вентиляции здания – с децентрализованным организованным притоком воздуха через приточные вентиляционные клапаны и механическим удалением воздуха посредством индивидуальных вытяжных вентиляторов, установленных в вентиляционных каналах.



Рисунок 5.5 – Общий вид жилого дома (объект №1)

Приток воздуха предусмотрен в жилые комнаты – посредством стеновых вентиляционных клапанов СВК «В-75» и стеновых клапанов «КИВ 125», расположенных в жилых комнатах. Удаление воздуха – через вытяжные вентиляционные каналы кухни, ванной и гостевого санузла (см. рисунок 5.6).

Система вытяжной вентиляции – с вертикальными сборными каналами и каналами-спутниками, присоединенными к сборному каналу через этаж. В вытяжных каналах ванной комнаты В1, санузла В2 установлены вентиляторы Вентс ВКО 125 Турбо, подключенные к электрической сети через блоки управления, на кухне установлена кухонная вытяжка Faber Incs Plus HCS X A52, подключенная к вытяжному каналу В3.

Внешний вид отдельных вентиляционных элементов квартиры приведен на рисунках 5.7 – 5.8.

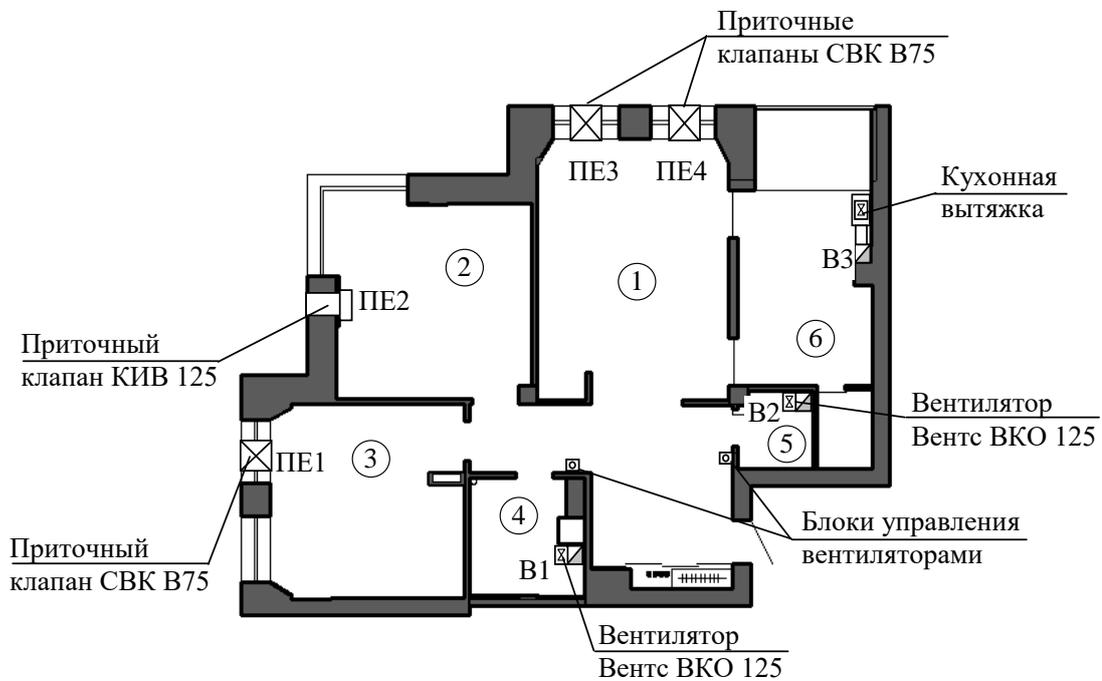


Рисунок 5.6 – План трехкомнатной квартиры шестнадцатизэтажного жилого дома

а



б



Рисунок 5.7 – Внешний вид приточных клапанов: а – СВК «В75»; б – КИВ 125

а



б



Рисунок 5.8 – Внешний вид блок управления вентилятором (а) и вытяжного вентилятора санузла (б)

5.2.2.2. Краткая характеристика методики исследований

Методика проведения натурных исследований включала:

- исследование работы системы вентиляции при включении – выключении одного или нескольких вентиляторов (при отсутствии и наличии обратных клапанов);
- исследование влияния регулирования скорости вращения вентиляторов на работу системы вентиляции квартиры;
- замеры фактических расходов воздуха через вытяжные каналы и приточные клапаны;
- сопоставление величин суммарных расходов приточного и удаляемого воздуха, определение невязки;
- определение перепадов давлений между квартирой и наружным воздухом.

Замеры расхода воздуха производились электронным крыльчатым анемометром марки Testo 417-2. Измерение перепадов давлений между внутренним и наружным воздухом производилось с помощью дифференциального цифрового манометра ДМЦ-01А. Общий вид отдельных вентиляционных элементов в процессе измерений представлен на рисунках 5.9 – 5.10.

Блоки управления вентиляторами были встроены в подрозеточную коробку на стадии ремонта квартиры (см. рисунок 5.4 а). Технические характеристики блоков управления представлены в приложении В.

Температура наружного воздуха в период проведения замеров: $-0,6 \div -1,2$ °С.

а



б



Рисунок 5.9 – Проведение замеров расхода воздуха через приточные клапаны КИВ 125 (а) и СВК В 75 (б)

а



б



Рисунок 5.10 – Определение расхода воздуха через вытяжной канал санузла (а) и замеры перепада давлений в квартире через приточный клапан КИВ 125 (б)

5.2.2.3. Результаты натурных исследований

Основные результаты проведенных экспериментов представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Результаты натурных испытаний

Дата: 24.03.2017; $t_{нар} = -0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{внут} = +24,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
1	Все вентиляторы выключены. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 0 %; №2 – 0 %; №3 – 0 %. Перепад давлений в клапане ПЕ2: $\Delta P = 17,5 \text{ Па}$.	В1	43,8	
		В2	41,0	
		В3	24,9	
		ПЕ1	37,0	
		ПЕ2	36,5	
		ПЕ3	29,4	
		ПЕ4	28,0	
		$\Sigma L_{прит.}$	130,8	
		$\Sigma L_{выт.}$	109,6	
		Невязка, %	16,2	

Дата: 24.03.2017; $t_{нар} = -0,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +24,6 \text{ }^\circ\text{C}$				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
2	Все вентиляторы включены. Кухонная вытяжка выключена. Установленная скорость вращения вентилятора: №1 – 100 %; №2 – 100 %; №3 – 0 %. Все приточные клапаны открыты. Перепад давлений в клапане ПЕ2: $\Delta P = 25,3 \text{ Па}$.	В1	109,4	
		В2	89,3	
		В3	0,0	
		ПЕ1	36,7	
		ПЕ2	38,4	
		ПЕ3	43,0	
		ПЕ4	36,7	
		$\Sigma L_{прит.}$	154,9	
		$\Sigma L_{выт.}$	198,7	
Невязка, %	28,3			
Дата: 24.03.2017; $t_{нар} = -0,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +24,6 \text{ }^\circ\text{C}$				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
3	Все вентиляторы включены. Кухонная вытяжка выключена. Установленная скорость вращения вентилятора: №1 – 50 %; №2 – 50 %; №3 – 0 %. Все приточные клапаны открыты. Перепад давлений в клапане ПЕ2: $\Delta P = 19,0 \text{ Па}$.	В1	75,7	
		В2	57,3	
		В3	0,0	
		ПЕ1	39,3	
		ПЕ2	38,2	
		ПЕ3	40,1	
		ПЕ4	32,0	
		$\Sigma L_{прит.}$	149,5	
		$\Sigma L_{выт.}$	130,0	
Невязка, %	13,0			

Дата: 24.03.2017; $t_{нар} = -0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +24,8 \text{ } ^\circ\text{C}$				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка замера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
4	Все вентиляторы выключены. Установленная скорость вращения вентилятора: №1 – 0 %; №2 – 0 %; №3 – 0 %. Все приточные клапаны закрыты. Перепад давлений в клапане ПЕ2: $\Delta P = 22,8 \text{ Па}$.	В1	27,7	
		В2	28,5	
		В3	9,9	
		ПЕ1	0,0	
		ПЕ2	2,8	
		ПЕ3	5,1	
		ПЕ4	0,0	
		$\Sigma L_{прит.}$	7,9	
		$\Sigma L_{выт.}$	66,1	
		Невязка, %	88,0	
Дата: 24.03.2017; $t_{нар} = -0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +24,8 \text{ } ^\circ\text{C}$				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка замера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
5	Все вентиляторы включены. Установленная скорость вращения вентилятора: №1 – 100 %; №2 – 100 %; №3 – 3 скорость. Все приточные клапаны открыты. $\Delta P = 56,9 \text{ Па}$.	В1	80,3	
		В2	64,2	
		В3	269,6	
		ПЕ1	54,0	
		ПЕ2	57,7	
		ПЕ3	52,3	
		ПЕ4	39,8	
		$\Sigma L_{прит.}$	203,8	
		$\Sigma L_{выт.}$	414,0	
		Невязка, %	50,8	

Дата: 24.03.2017; $t_{нар} = -0,6 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +24,8 \text{ } ^\circ\text{C}$				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
6	Все вентиляторы выключены. Кухонная вытяжка включена. Установленная скорость вращения вентилятора: №1 – 0 %; №2 – 0 %; №3 – 3 скорость. Все приточные клапаны открыты.	В1	– 20,1	
		В2	– 22,3	
		В3	283,2	
		ПЕ1	43,8	
		ПЕ2	43,8	
		ПЕ3	42,7	
		ПЕ4	34,5	
		$\Sigma L_{прит.}$	283,2	
		$\Sigma L_{выт.}$	207,1	
		Невязка, %	26,8	
Дата: 24.03.2017; $t_{нар} = -0,8 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +24,8 \text{ } ^\circ\text{C}$				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
7	Все вентиляторы выключены. Кухонная вытяжка включена. Установленная скорость вращения вентилятора: №1 – 0 %; №2 – 0 %; №3 – 1 скорость. Все приточные клапаны открыты.	В1	– 11,9	
		В2	– 11,0	
		В3	176,1	
		ПЕ1	–	
		ПЕ2	–	
		ПЕ3	–	
		ПЕ4	–	
		$\Sigma L_{прит.}$	–	
		$\Sigma L_{выт.}$	–	
		Невязка, %	–	

Дата: 24.03.2017; $t_{нар} = -0,8 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +24,8 \text{ } ^\circ\text{C}$				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка замера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
8	Вентилятор №1 включен, вентилятор №2 включен. Кухонная вытяжка включена. Установленная скорость вращения вентилятора: №1 – 100 %; №2 – 0 %; №3 – 1 скорость. Все приточные клапаны открыты.	В1	85,9	
		В2	– 48,9	
		В3	170,4	
		ПЕ1	–	
		ПЕ2	–	
		ПЕ3	–	
		ПЕ4	–	
		$\sum L_{прит.}$	–	
		$\sum L_{выт.}$	–	
		Невязка, %	–	

Анализ результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Система вентиляции с естественным побуждением движения воздуха в данной квартире обеспечивает требуемый воздухообмен помещений при температуре наружного воздуха минус 0,8 °С. Данные результаты обусловлены относительно низким сопротивлением воздуха на притоке (в квартире установлено 4 приточных клапана) и расположением квартиры на 8 этаже 16-ти этажного жилого многоквартирного дома (большой перепад высот между клапанами и устьями вытяжных шахт);

2. Включение вентиляторов на максимальную скорость значительно увеличивает расход удаляемого воздуха (до 200 м³/ч), при выключенной кухонной вытяжке;

3. Регулирование скоростей вращения вентиляторов с помощью блоков управления вентиляторов позволяет регулировать воздухообмен квартиры в целом;

4. Выключение одного из вентиляторов при отсутствии обратных клапанов может привести к опрокидыванию направления движения воздуха в вентиляционном канале, в котором был установлен данный вентилятор;

5. Включение кухонной вытяжки на третью скорость увеличивает воздухообмен квартиры до 414 м³/ч, что в три с лишним раза превышает нормируемый воздухообмен (110 м³/ч);

6. Включение кухонной вытяжки на первую скорость при выключении одного или сразу двух других вентиляторов приводит к опрокидыванию направления движения воздуха в канале с выключенным вентилятором.

5.2.3. Результаты натурных исследований системы вентиляции двухкомнатной квартиры девятиэтажного жилого дома

5.2.3.1. Общая характеристика объекта исследования

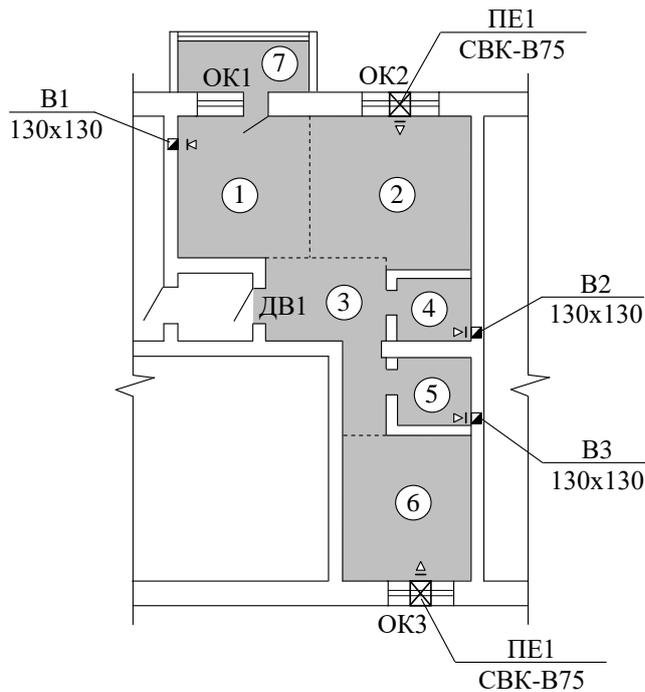
Объект исследований – система вентиляции двухкомнатной квартиры, расположенной на девятом этаже девятиэтажного жилого дома. Квартира состоит из кухни, двух жилых комнат, коридора, ванной, туалета и балкона. Приток воздуха предусмотрен с помощью подоконных стеновых вентиляционных клапанов СВК «В-75», расположенных в жилых комнатах. Удаление воздуха – через отдельные вытяжные вентиляционные каналы кухни, ванной и туалета.

Конструктивная схема здания – бескаркасная, с несущими продольными и поперечными стенами. Межэтажные перекрытия – сборные железобетонные толщиной 220 мм. Высота этажа в здании 3,15 м. Наружные стены – кирпичная кладка общей толщиной 770 мм. Крыша чердачная с холодным чердаком. Заполнение оконных проемов – оконные блоки из ПВХ-профилей с двухкамерными стеклопакетами из обычного стекла и заполнением межстекольного пространства воздухом. Входные двери – металлические, утепленные. Лестничная клетка – обычная, тип Л1.

Внешний вид здания приведен на рисунке 5.11. Схематичный план квартиры приведен на рисунке 5.12.



Рисунок 5.11 – Общий вид девятиэтажного жилого дома (объект №2)



Экспликация помещений

№ помещения	Наименование помещения	Площадь, м ²	Объем, м ³
1	Кухня	12,79	36,58
2	Жилая комната	17,6	50,34
3	Коридор	10,65	30,46
4	Ванная	3,48	9,95
5	Туалет	3,78	10,81
6	Жилая комната	13,63	38,98
7	Балкон	4,63	13,24

Примечания:

1. Суммарная площадь квартиры = 66,56 м²;

2. Высота помещений (от пола до потолка) h = 2,86 м.

Рисунок. 5.12 – Схематичный план двухкомнатной квартиры девятиэтажного жилого дома (объект №2)

Система вентиляции здания – естественная, с децентрализованным организованным притоком воздуха через приточные вентиляционные клапаны и удалением воздуха через вытяжные вентиляционные каналы кухонь и санузлов.

Вентиляционные каналы – индивидуальные, с непосредственным выходом на кровлю. Фактические сечения вентиляционных каналов – 130 x 130 мм, решеток приточных клапанов – 405 x 55 мм.

5.2.3.2. Краткая характеристика методики проведения исследований

До начала проведения исследований в систему вентиляции квартиры и некоторые ограждающие конструкции были внесены следующие изменения (см. рисунок 5.13):

- в вентиляционных каналах V1 – V3 установлены вентиляторы марки Вентс 100 S;
- подключение каждого вентилятора к сети выполнено через блок управления, регулирующего скорость вращения вентилятора;
- окна ОК1 – ОК3 заклеены полиэтиленовой пленкой, в центре которой вырезано отверстие диаметром 100 мм – с целью замеров расходов приточного воздуха, поступающего в помещение за счет инфильтрации через заполнение оконных проемов;
- входная дверь ДВ1 заклеена полиэтиленовой пленкой с целью исключения (уменьшения) перетекания воздуха между лестничной клеткой и квартирой;

– в наружных стенах помещений 2 и 6 просверлены отверстия и установлены трубки диаметром 6 мм – для замеров перепадов давлений воздуха.

Замеры расхода воздуха производились с помощью электронного крыльчатого анемометра марки Testo 417-2. Расход воздуха, поступающего через окна, определялся по результатам замеров скорости движения через отверстие диаметром 100 мм с помощью соединителя соответствующего диаметра.

Замеры расхода воздуха, поступающего через приточные устройства и удаляющегося через вентиляционные каналы, производился с помощью диффузоров.

Внешний вид приспособлений и приборов, при проведении замеров приведен на рисунках 5.14 – 5.16.

Измерение перепадов давлений между внутренним и наружным воздухом производилось с помощью дифференциального цифрового манометра ДМЦ-01А.

Технические характеристики блоков управления вентиляторами представлены в приложении В.

Проведение исследований включало:

– замеры расходов воздуха через вытяжные вентиляционные каналы, приточные клапаны, окна, замеры перепада давлений между внутренним объемом квартиры и наружным воздухом – при проектном режиме эксплуатации (вентиляторы выключены, окна и входные двери закрыты, приточные клапаны открыты);

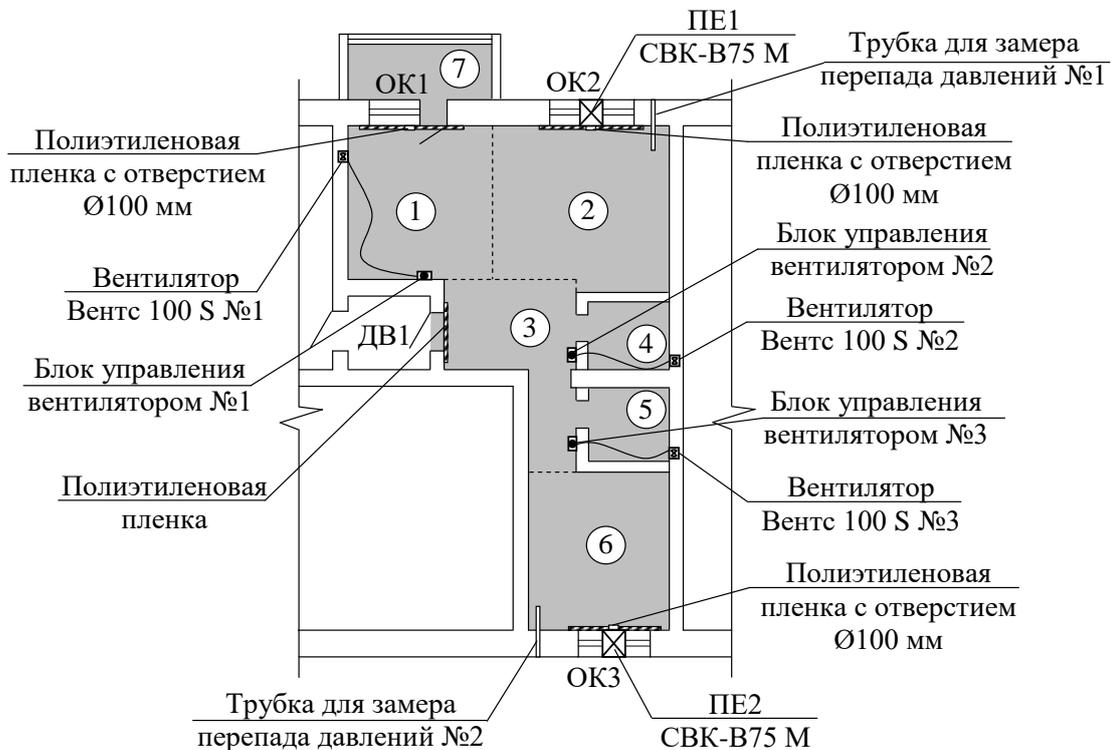


Рисунок 5.13 – Планировка квартиры с учетом произведенных изменений

а



б



Рисунок 5.14 – Общий вид оконного блока (а) и замеры расхода воздуха через оконный блок (б) в процессе испытаний

а



б



Рисунок 5.15 – Процесс замеров расхода воздуха через вытяжной канал (а) и приточный клапан (б)

а



б



Рисунок 5.16 – Замеры перепада давлений с помощью дифференциального цифрового манометра ДМЦ-01А (а) и регулирование скорости вращения вентилятора с помощью блока управления вентилятором (б)

- сопоставление величин суммарных расходов приточного и удаляемого воздуха в квартире, определение невязки (расхождения);
- замеры расходов воздуха, перепадов давлений при изменении режима работы приточных устройств;
- замеры расходов воздуха, перепадов давлений при изменении режима работы вытяжных вентиляторов («включении–выключении» одного или нескольких вентиляторов), регулирование скорости вращения вентиляторов.

5.2.3.3. Результаты натурных исследований

Основные результаты исследований приведены в таблице 5.2.

Температура внутреннего воздуха в период проведения замеров – $t_{\text{внут}} = +20,2 \div +20,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Температура наружного воздуха – от $t_{\text{нар}} = +23,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (20.05.2016) до $t_{\text{нар}} = +14,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (02.06.2016).

Таблица 5.2

Результаты натурных исследований

Дата: 20.05.2016; $t_{\text{нар}} = +23,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{внут}} = +20,8 \text{ }^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка замера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
1	Все вентиляторы выключены. Приточные клапаны открыты. Вентиляционный канал В1 работает на приток	В1	– 4,2	
		В2	0,0	
		В3	10,5	
		ОК1	0,0	
		ОК2	0,0	
		ОК3	0,0	
		ПЕ1	0,0	
		ПЕ2	0,0	
		Σ Lприт.	10,5	
		Σ Lвыт.	4,2	
		Невязка, %	59,5	

Дата: 20.05.2016; $t_{нар} = +23,6 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,8 \text{ } ^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
2	Все вентиляторы включены. Приточные клапаны открыты. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 100 %; №2 – 100 %; №3 – 100 %.	В1	39,8	
		В2	31,9	
		В3	39,3	
		ОК1	16,1	
		ОК2	17,8	
		ОК3	20,6	
		ПЕ1	22,0	
		ПЕ2	20,9	
		$\sum L_{прит.}$	97,5	
		$\sum L_{выт.}$	111,1	
		Невязка, %	12,2	
		Дата: 20.05.2016; $t_{нар} = +23,6 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,8 \text{ } ^\circ\text{C}$;		
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
3	Все вентиляторы включены. Приточные клапаны открыты. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 100 %; №2 – 65 %; №3 – 65 %.	В1	45,2	
		В2	23,5	
		В3	25,4	
		ОК1	12,7	
		ОК2	17,5	
		ОК3	15,3	
		ПЕ1	17,2	
		ПЕ2	16,7	
		$\sum L_{прит.}$	94,1	
		$\sum L_{выт.}$	79,4	
		Невязка, %	15,6	

Дата: 24.05.2016; $t_{нар} = +21,2 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,4 \text{ } ^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка замера	$L, \text{ м}^3/\text{ч}$	Поясняющий рисунок
6	Все вентиляторы включены. Приточные клапаны открыты. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 100 %; №2 – 80 %; №3 – 65%.	В1	45,8	
		В2	23,7	
		В3	27,1	
		ОК1	18,1	
		ОК2	13,3	
		ОК3	15,3	
		ПЕ1	18,9	
		ПЕ2	16,7	
		$\sum L_{прит.}$	96,6	
		$\sum L_{выт.}$	82,2	
		Невязка, %	15,0	
Дата: 24.05.2016; $t_{нар} = +21,2 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,4 \text{ } ^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка замера	$L, \text{ м}^3/\text{ч}$	Поясняющий рисунок
7	Вентилятор №1 выключен, вентиляторы №2 и №3 включены. Приточные клапаны открыты. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 0 %; №2 – 80 %; №3 – 65%.	В1	-19,8	
		В2	43,0	
		В3	39,3	
		ОК1	10,2	
		ОК2	8,8	
		ОК3	15,3	
		ПЕ1	15,8	
		ПЕ2	14,1	
		$\sum L_{прит.}$	82,2	
		$\sum L_{выт.}$	83,9	
		Невязка, %	2,02	

Дата: 24.05.2016; $t_{нар} = +21,2$ °C; $t_{внут} = +20,4$ °C;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
8	Вентилятор №2 выключен, вентиляторы №1 и №3 включены. Приточные клапаны открыты. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 100 %; №2 – 0 %; №3 – 65%.	В1	52,0	
		В2	-25,2	
		В3	36,5	
		ОК1	8,5	
		ОК2	9,3	
		ОК3	13,8	
		ПЕ1	19,5	
		ПЕ2	12,4	
		$\sum L_{прит.}$	88,5	
		$\sum L_{выт.}$	88,7	
		Невязка, %	0,32	
Дата: 24.05.2016; $t_{нар} = +21,2$ °C; $t_{внут} = +20,4$ °C;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
9	Вентилятор №3 выключен, вентиляторы №1 и №2 включены. Приточные клапаны открыты. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 100 %; №2 – 80 %; №3 – 0%.	В1	51,2	
		В2	39,8	
		В3	-24,0	
		ОК1	13,8	
		ОК2	15,0	
		ОК3	9,6	
		ПЕ1	13,8	
		ПЕ2	14,4	
		$\sum L_{прит.}$	91,0	
		$\sum L_{выт.}$	90,7	
		Невязка, %	0,31	

Дата: 24.05.2016; $t_{нар} = +21,2 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,4 \text{ } ^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
10	Все вентиляторы включены. В каждом вентканале установлен обратный клапан. Приточные клапаны открыты. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 100 %; №2 – 80 %; №3 – 65%.	В1	27,7	
		В2	16,4	
		В3	20,1	
		ОК1	9,3	
		ОК2	13,8	
		ОК3	6,8	
		ПЕ1	20,1	
		ПЕ2	8,5	
		$\sum L_{прит.}$	64,2	
		$\sum L_{выт.}$	58,5	
Невязка, %	8,8			
Дата: 24.05.2016; $t_{нар} = +21,2 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,4 \text{ } ^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
11	Вентилятор №1 выключен, вентиляторы №2 и №3 включены. В каждом вентканале установлен обратный клапан. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 0 %; №2 – 80 %; №3 – 65%.	В1	0,0	
		В2	20,9	
		В3	20,6	
		ОК1	7,6	
		ОК2	11,3	
		ОК3	10,7	
		ПЕ1	7,9	
		ПЕ2	10,5	
		$\sum L_{прит.}$	41,5	
		$\sum L_{выт.}$	48,0	
Невязка, %	13,5			

Дата: 24.05.2016; $t_{нар} = +21,2 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,4 \text{ } ^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
12	Вентилятор №3 выключен, вентиляторы №1 и №2 включены. В каждом вентканале установлен обратный клапан. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 100 %; №2 – 80 %; №3 – 0%.	В1	27,7	
		В2	17,2	
		В3	-4,2	
		ОК1	6,8	
		ОК2	9,0	
		ОК3	7,9	
		ПЕ1	8,2	
		ПЕ2	10,5	
		$\sum L_{прит.}$	44,9	
		$\sum L_{выт.}$	46,6	
Невязка, %	3,6			
Дата: 24.05.2016; $t_{нар} = +21,2 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,4 \text{ } ^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
13	Вентилятор №2 выключен, вентиляторы №1 и №3 включены. В каждом вентканале установлен обратный клапан. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 100 %; №2 – 0 %; №3 – 65%.	В1	26,0	
		В2	-4,2	
		В3	17,8	
		ОК1	6,5	
		ОК2	7,1	
		ОК3	10,7	
		ПЕ1	11,3	
		ПЕ2	11,6	
		$\sum L_{прит.}$	43,8	
		$\sum L_{выт.}$	51,4	
Невязка, %	14,8			

Дата: 02.06.2016; $t_{нар} = +14,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,2 \text{ }^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
14	Все вентиляторы выключены. В каждом вентканале установлен обратный клапан. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 0 %; №2 – 0 %; №3 – 0 %. Перепады давлений для помещений 2 и 6: $\Delta P_1 = 1,8 \text{ Па}$; $\Delta P_2 = -0,1 \text{ Па}$.	В1	12,2	
		В2	11,3	
		В3	11,8	
		ОК1	0,0	
		ОК2	11,3	
		ОК3	0,0	
		ПЕ1	12,4	
		ПЕ2	5,1	
		$\sum L_{прит.}$	35,3	
		$\sum L_{выт.}$	28,8	
Невязка, %	18,4			
Дата: 02.06.2016; $t_{нар} = +14,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,2 \text{ }^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка за-мера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
15	Все вентиляторы включены. В каждом вентканале установлен обратный клапан. Установленная скорость вращения вентиляторов: №1 – 100 %; №2 – 100 %; №3 – 100 %. Перепады давлений для помещений 2 и 6: $\Delta P_1 = 4,2 \text{ Па}$; $\Delta P_2 = 3,9 \text{ Па}$.	В1	35,3	
		В2	30,5	
		В3	32,5	
		ОК1	8,5	
		ОК2	20,3	
		ОК3	15,3	
		ПЕ1	20,1	
		ПЕ2	15,0	
		$\sum L_{прит.}$	98,3	
		$\sum L_{выт.}$	79,1	
Невязка, %	19,5			

Дата: 31.05.2016; $t_{нар} = +20,4 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,6 \text{ }^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка замера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
16	<p>Все вентиляторы выключены.</p> <p>В каждом вентканале установлен обратный клапан. Приточные клапаны закрыты.</p> <p>Установленная скорость вращения вентиляторов:</p> <p>№1 – 0 %;</p> <p>№2 – 0 %;</p> <p>№3 – 0 %.</p> <p>Перепады давлений для помещений 2 и 6:</p> <p>$\Delta P_1 = 2,3 \text{ Па}$;</p> <p>$\Delta P_2 = 0,2 \text{ Па}$.</p>	V1	9,6	
		V2	7,6	
		V3	8,5	
		OK1	4,0	
		OK2	8,2	
		OK3	6,2	
		ПЕ1	0,0	
		ПЕ2	0,0	
		$\sum L_{прит.}$	18,4	
		$\sum L_{выт.}$	25,7	
Невязка, %	28,6			
Дата: 02.06.2016; $t_{нар} = +14,6 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{внут} = +20,2 \text{ }^\circ\text{C}$;				
№ п/п	Условия проведения	Результаты эксперимента		
		Точка замера	L, м ³ /ч	Поясняющий рисунок
17	<p>Все вентиляторы включены.</p> <p>В каждом вентканале установлен обратный клапан. Приточные клапаны закрыты.</p> <p>Установленная скорость вращения вентиляторов:</p> <p>№1 – 100 %;</p> <p>№2 – 100 %;</p> <p>№3 – 100 %.</p> <p>Перепады давлений для помещений 2 и 6:</p> <p>$\Delta P_1 = 9,1 \text{ Па}$;</p> <p>$\Delta P_2 = 4,1 \text{ Па}$.</p>	V1	32,5	
		V2	32,5	
		V3	32,0	
		OK1	8,2	
		OK2	20,3	
		OK3	15,8	
		ПЕ1	0,0	
		ПЕ2	0,0	
		$\sum L_{прит.}$	96,9	
		$\sum L_{выт.}$	44,4	
Невязка, %	54,2			

Анализ результатов позволил сделать следующие выводы:

- установка вентиляторов в вентиляционных каналах значительно увеличивает воздухообмен помещений, том числе и при температурах наружного воздуха +20 °С и выше;
- выключение одного из вентиляторов при отсутствии обратных клапанов может привести к опрокидыванию направления движения воздуха в вентиляционном канале, в котором установлен данный вентилятор;
- установка обратных клапанов (Вентс КО 100) практически исключает возможность опрокидывания направления движения воздуха в вентиляционных каналах (расход поступающего при опрокидывании воздуха не более 5 м³/ч);
- регулирование скоростей вращения вентиляторов с помощью блоков управления вентиляторов позволяет регулировать воздухообмен помещений, в которых установлены вентиляторы, и управлять воздухообменом квартиры в целом.

Выводы по главе 5

1. Разработано устройство (блок управления вентилятором), позволяющее управлять работой вентилятора по скорости вращения (регулировать расход воздуха), времени (время до включения, выключения, продолжительность работы до перехода на следующий режим и т.д.), по датчикам различного типа (влажности и температуры, углекислого газа, движения и др.).

2. Разработанное устройство, за счет регулирования скорости вращения вентиляторов, позволяет изменять аэродинамические характеристики вентиляторов, что подтверждается результатами испытаний, проведенных для ряда вентиляторов.

3. Регулирование скорости вращения вентиляторов с помощью разработанного устройства позволяет управлять воздухообменом помещений по потребности и тем самым оптимизировать работу системы вентиляции.

Результаты натурных исследований показывают, что:

- системы вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами в состоянии обеспечить требуемый воздухообмен помещений как в холодный, так и в теплый периоды года;
- выключение одного из вентиляторов в ряде случаев приводит к опрокидыванию направления движения воздуха в вентиляционном канале, в котором установлен данный вентилятор;
- включение кухонных вытяжек значительно увеличивает воздухообмен квартир и может привести к опрокидыванию движения воздуха в других вентиляционных каналах даже при включенных вентиляторах;

- установка обратных клапанов позволяет повысить надежность работы системы вентиляции и практически исключает возможность опрокидывания направления движения воздуха в вентиляционных каналах (расход поступающего при опрокидывании воздуха не более 5 м³/ч);
- включение вентиляторов на максимальную скорость может значительно увеличить расход удаляемого воздуха, в связи с чем необходимо обеспечить возможность регулирования скорости вращения вентиляторов;
- установка разработанных блоков управления вентиляторами позволяет регулировать скорость вращения вентиляторов и воздухообмен квартир в целом.

6. 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 (открытия створок окон, регулирования приточных устройств, температуры наружного воздуха) и конструктивного решения (теплого или холодного чердака, взаимного расположения каналов, характеристик применяемых вентиляторов).

2. Разработана математическая модель, основанная на известной теории гидравлических цепей, предусматривающая численное описание воздушного режима зданий в виде системы нелинейных уравнений.

Предложены формулы, обеспечивающие универсальность подхода к формированию нелинейных уравнений и аппроксимацию с заданной точностью зависимостей «расход воздуха – перепад давлений» для всех элементов аэродинамической сети.

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

4. Оценка корректности использования разработанной математической модели осуществлена на лабораторном стенде и с помощью усовершенствованного графического метода расчета, позволяющего получать решение обратной задачи аэродинамического расчета вентиляционных каналов с одним или несколькими вентиляторами.

Сопоставление результатов теоретических расчетов с результатами лабораторных испытаний, выполненное на примере модели вентиляционного канала с вытяжными вентиляторами, показывает достаточно хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных и позволяет сделать вывод о правомерности применения разработанной математической модели для прогнозирования распределения потоков воздуха в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий.

5. По результатам математического моделирования распределения потоков воздуха в системах механической вытяжной вентиляции с индивидуальными вентиляторами, выявлен ряд недостатков данных систем, снижающими надежность и эффективность их работы:

– выключение вентиляторов в ряде случаев приводит к недостаточному воздухообмену (ниже требуемой величины) помещений; одна из основных причин – достаточно большое аэродинамическое сопротивление приточных устройств;

- включение вентиляторов в вытяжных каналах увеличивает воздухообмен, однако не все индивидуальные вентиляторы позволяют добиться требуемой величины воздухообмена; необходим подбор вентиляторов и увязка их аэродинамических характеристик с потерями давления в вытяжных вентиляционных каналах и приточных устройствах;

- включение вентиляторов на максимальную скорость может значительно увеличить расход удаляемого воздуха, в связи с чем необходимо обеспечить возможность регулирования скорости вращения вентиляторов;

- изменение проектного режима работы системы вентиляции, в частности выключение или изменение характеристик отдельных вентиляторов (например, подключение к вентканалам кухонных вытяжек) 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;

- при подключении к вытяжным каналам кухонных вытяжек, возможно перетекание воздуха в квартиры других этажей вследствие создания подпора в сборном канале; при этом второй вентиляционный канал данной квартиры (например, расположенный в санузле) может быть «опрокинут» даже при работающем вентиляторе;

- 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.

6. Моделирование распределения воздушных потоков в помещении с использованием методов вычислительной гидродинамики наиболее целесообразно методом решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (RANS) с применением $k-\varepsilon$ модели турбулентности.

7. По результатам моделирования распределения воздушных потоков в помещении выявлено, что:

- увеличение расхода приточного воздуха, связанное с включением вытяжных вентиляторов в системах механической вытяжной вентиляции с индивидуальными вентиляторами, может значительно снизить температуру внутреннего воздуха в помещении независимо от способа организации притока воздуха в помещения;

- проветривание помещений за счет открытия форточек может привести к значительному снижению температуры внутреннего воздуха помещений уже через 5 минут после открытия форточки и привести к переохлаждению помещения;

– наиболее эффективной является установка приточных клапанов непосредственно над отопительными приборами, однако в этом случае наблюдается значительное снижение температуры за отопительным прибором;

– регулирование воздухообмена помещений за счет управления работой вентиляторов позволяет повысить среднюю температуру воздуха в помещении и снизить теплопотери помещения за счет снижения затрат теплоты на подогрев приточного воздуха.

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

- клапанов постоянного расхода воздуха (воздушных балансировочных клапанов), устанавливаемых в вентиляционных каналах для ограничения расхода удаляемого воздуха;
- обратных клапанов, предотвращающих опрокидывание направления движения воздуха;
- регулирование производительности (скорости вращения) индивидуальных вытяжных вентиляторов с учетом режима эксплуатации помещений.

9. Разработано специальное техническое устройство (блок управления вентилятором), позволяющее программировать режим работы индивидуальных бытовых вентиляторов. Регулирование скорости вращения вентиляторов осуществляется по времени или по показаниям датчиков различного типа.

Изготовлены опытные образцы разработанных блоков управления вентиляторами и проведена их апробация в условиях эксплуатируемых зданий.

10. Разработанные технические решения позволяют повысить надежность и эффективность управления работой систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами. В частности:

- установка обратных клапанов практически исключает возможность опрокидывания направления движения воздуха в вентиляционных каналах (расход поступающего при опрокидывании воздуха не более $5 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- установка клапанов постоянного расхода воздуха позволяет повысить устойчивость работы системы при открытии створок окон или включении кухонных вытяжек. Установка клапанов постоянного расхода воздуха с требуемой характеристикой, не только повышает устойчивость работы систем вентиляции, но и создает незначительные потери давления при низких расходах;
- установка разработанных блоков управления вентиляторами позволяет регулировать скорость вращения вентиляторов и воздухообмен квартир по потребности, что позволяет повысить эффективность работу систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

11. Сопоставление результатов теоретических расчетов с результатами натурных исследований показывает достаточно хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных и позволяет сделать вывод о правомерности применения разработанной математической модели и эффективности применения разработанных технических решений в системах вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, И.В. Аэродинамический расчет систем вентиляции жилых зданий с децентрализованным механическим побуждением / И.В. Андреев, А.Д. Кривошеин // Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России: материалы 65-й научно-технической конференции / СибАДИ. в 3 ч. I. – Омск, 2011. – С. 238-243.
2. Аничхин, А.Г. Воздушный режим здания и отопительная «Система 3Т» / А.Г. Аничхин // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2010. – №6. – С. 60-63.
3. Беккер, А. Системы вентиляции / А. Беккер. – М.: Техносфера, Евроклимат, 2007. – 240 с. ISBN 978-5-94836-147-5
4. Бирюков, С. В. Разработка метода определения нормы потребления тепловой энергии системами отопления и вентиляции общественных зданий (на примере учебных корпусов ВУ-Зов) : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / С. В. Бирюков ; МГСУ. – Москва, 2002. – 198 с.
5. Бирюков, С.В. Совершенствование программы расчета воздушного режима здания / С.В. Бирюков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – №5. – С. 120-122.
6. Бобровицкий, И.И. Гибридная вентиляция в многоэтажных жилых зданиях / И.И. Бобровицкий, Н.В. Шилкин // АВОК. – 2010. – №3. – С. 16-23.
7. Богословский, В.Н. Отопление и вентиляция. Учебник для вузов. В 2 ч. Ч.2. Вентиляция / В.Н. Богословский, В.И. Новожилов, Б.Д. Симаков, В.П. Титов: Под ред. В.Н. Богословского. – М.: Стройиздат, 1976. – 439 с.
8. Бодров, М.В. Определение фактической производительности систем естественной вентиляции с вертикальным сборным коллектором многоквартирных жилых домов / М.В. Бодров, В.П. Болдин, В.Ю. Кузин, М.Н. Кучеренко // Приволжский научный журнал. – 2015. – №1 (33). – С. 54-59.
9. Бодров, М.В. Анализ режимов работы систем естественной вентиляции многоквартирных жилых домов в теплый период года / М.В. Бодров, В.Ю. Кузин // Приволжский научный журнал. – 2016. – №4 (40). – С. 26-32.
10. Бодров, М.В. Определение действительного класса энергосбережения многоквартирного жилого дома с естественной системой вентиляции / М.В. Бодров, В.Ю. Кузин, Д.Ю. Кузин, М.С. Морозов // Приволжский научный журнал. – 2017. – №2 (42). – С. 68-73.
11. Бодров, М.В. Режимы работы естественной приточно-вытяжной вентиляции многоквартирных жилых домов / М.В. Бодров, В.Ю. Кузин // Приволжский научный журнал. – 2014. – №1 (29). – С. 51-56.

12. Бороздин, Е.Г. Математическое описание работы вентиляторов в составе механических приточных устройств / Е.Г. Бороздин // Вестник СибАДИ. – 2015. – №4 (44). – С. 115-119.
13. Бутаков, С. Е., Аэродинамика систем промышленной вентиляции / С. Е. Бутаков. – М.: Профиздат, 1949. – 270 с.
14. Бутцев, Б.И. Гигрорегулируемая вентиляция «Аэрэко» – инструмент комфорта и энергосбережения в жилых домах / Б.И. Бутцев // Жилищное строительство. – 2011. – №3. – С. 71-72.
15. Бутцев, Б.И. Техническое обоснование применения вентиляционных устройств «АЭРЭКО» на российском строительном рынке / Б.И. Бутцев. – М.: АО «АЭРЭКО», 2008. – 104 с.
16. Варапаев, В.Н. Численное моделирование стационарного воздушно-теплого режима многоэтажных зданий с естественной системой вентиляции / В.Н. Варапаев, Е.Х. Китайцева, И.В. Шабашвили // Вестник МГСУ. – 2011. – №8 (33). – С. 122-128.
17. Вахвахов Г.Г. Работа вентиляторов в сети / Г. Г. Вахвахов. – М.: Стройиздат, 1975. – 101 с.
18. Вахвахов Г.Г. Энергосбережение и надежность вентиляционных установок. Серия: Экономия топлива и электроэнергии / Г.Г. Вахвахов. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.
19. Вишневский, Е.П. Новые европейские стандарты в области ОВК / Е.П. Вишневский, Г.В. Чепурин, М.Ю. Салин // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2010. – №2(98). – С. 72-78.
20. Волов, Г.Я. Устойчивость работы систем естественной вентиляции многоквартирных жилых зданий / Г.Я. Волов // АВОК. – 2014. – №1. – С. 30-37.
21. Галдин, В.Д. Вентиляторы и компрессоры. Электронный ресурс: учебное пособие. 2-е издание, деривативное / В.Д. Галдин, М. А. Кривошеин, С.В. Грушичев // СибАДИ. – 2017.
22. Галдин, В.Д. 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.
23. Гинзбург, Э.Я. Расчет отопительно-вентиляционных систем с помощью ЭВМ / Э.Я. Гинзбург. – М., Стройиздат, 1979. – 182 с.
24. Грудзинский, М.М. Отопительно-вентиляционные системы зданий повышенной этажности. Серия: Экономия топлива и электроэнергии / М.М. Грудзинский, В.И. Ливчак, М.Я. Поз. – М.: Стройиздат, 1982. – 256 с.
25. ГОСТ 8.586.1-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования.

26. ГОСТ 10921-90. Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний. М.: Госстандарт, 1992.
27. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: Стандартинформ, 2013.
28. Дацюк, Т.А. Новая технология проектирования систем обеспечения микроклимата зданий / Т.А. Дацюк, В.Ф. Васильев, В.В. Дерюгин, Ю.П. Ивлев // Вестник гражданских инженеров. – 2005. – №3. – С. 57-62.
29. Дацюк, Т.А. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов / Т.А. Дацюк, Ю.П. Ивлев, В.А. Пухкал // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №6 (41). – С. 12-21.
30. Дацюк, Т.А. Качество воздуха в зданиях с естественной вентиляцией / Т.А. Дацюк // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2016. – №1 (169). – С. 78-81.
31. Дацюк, Т.А. Оценка эффективности естественной вентиляции жилых зданий / Т.А. Дацюк // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – №1 (145). – С. 112-115.
32. Дацюк, Т.А. Моделирование процессов вентиляции / Т.А. Дацюк, А.В. Сауц, Б.Н. Юрманов, В.Р. Таурит // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №5. – С. 78.
33. Дацюк, Т.А. Моделирование микроклимата жилых помещений / Т.А. Дацюк, В.Р. Таурит // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – №4 (33). – С. 196-198.
34. Дуболазова, Л.В. Системы кондиционирования воздуха: история, типы, принцип работы / Л.В. Дуболазова // Научные труды дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. – 2009. – №21. – С. 353-360.
35. Иванов, В. Ф. История строительной техники. Под ред. В. Ф. Иванова. – Ленинград: Госстройиздат, 1962. – 557 с.
36. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672с.
37. Инженерное оборудование высотных зданий / Под общ. ред. М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. – 320 с. – 400 экз. – ISBN 978-5-98267-028-1.
38. Каменев, П.Н., Динамика потоков промышленной вентиляции: учеб. / П.Н. Каменев. – М.: Стройиздат, 1938. – 480 с.
39. Каменев, П.Н. Вентиляция. Учебное пособие. / П.Н. Каменев, Е.И. Тертичник – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 624 с.
40. Караджи, В.Г. Некоторые особенности эффективного использования вентиляционно-отопительного оборудования. Руководство / В.Г. Караджи, Ю.Г. Московко. – М.: ООО «Инновент», 2004. – 139 с.

41. Карелин, В.Я. Насосы и насосные станции: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Карелин В.Я., Минаев А.В. – М.: Стройиздат, 1986. – 320 с.
42. Китайцева, Е.Х. Алгоритм решения задачи о воздушном режиме многоэтажных зданий / Е.Х. Китайцева // Проблемы математики и прикладной геометрии в строительстве. Сб. трудов. – Москва, 1982. – № 172. – С. 5-9.
43. Китайцева, Е.Х. Естественная вентиляция жилых зданий / Е.Х. Китайцева, Е.Г. Малявина // АВОК. – 1999. – №3. – С. 35-40.
44. Китайцева, Е.Х. Обобщенные методы расчета воздушного режима здания и факторов, влияющих на качество внутреннего воздуха: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Е.Х. Китайцева; МГСУ. – Москва, 1995. – 18 с.
45. Колубков, А.Н. Реализация энергосберегающих мероприятий в инженерных системах многоквартирных жилых домов/ Н.В Шилкин, А.Н. Колубков // АВОК. – 2011. – №7. – С. 12-19.
46. Константинова, В.Е. Воздушно-тепловой режим в жилых зданиях повышенной этажности / В.Е. Константинова. – М.: Стройиздат, 1969. – 135 с.
47. Константинова, В.Е. Использование электроаналоговой установки ЭМВС-6 для расчета воздухообмена и систем отопления зданий / В.Е. Константинова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1968. – №3.
48. Константинова, В.Е. Расчет воздухообмена в жилых и общественных зданиях / В.Е. Константинова. – М.: Стройиздат, 1964. – 156 с.
49. Константинова, В.Е. Расчет воздухообмена методом гидравлической аналогии / В.Е. Константинова // Водоснабжение и санитарная техника. – 1961. – №11.
50. Константинова, В.Е. Исследование воздухообмена в 26-этажном жилом здании для застройки Проспекта Калинина (Москва) зданий / В.Е. Константинова, Т.Л. Сумбатьянц, К.С. Светлов // Отопление и вентиляция жилых, общественных, промышленных и производственных сельскохозяйственных зданий. Сборник №23. – М.: Стройиздат, 1967. – С. 110-121.
51. Костенко, В.А. Европейские, американские и российские нормативные требования к вентиляции и кондиционированию / В.А. Костенко // Техника. Технологии. Инженерия. – 2017. – №2(4). – С. 6-10.
52. Крашенинникова, Т.С. Анализ параметров микроклимата в здании с атриумом в заданных климатических условиях с использованием программы Ansys Fluent / Т.С. Крашенинникова, А.В. Гришкова // Вестник ПНИПУ. – 2016. – №4 (24). – С. 46-61.
53. Кривошеин, А.Д. Исследование процессов распределения воздуха в гибридных системах вентиляции жилых зданий / А.Д. Кривошеин, И.В. Андреев // Вестник СибАДИ. – 2013. – №5 (33). – С. 63-69.

54. Кривошеин, А.Д. Особенности проектирования систем естественной вентиляции с вертикальными сборными каналами / А.Д. Кривошеин, И. В. Андреев // Проектирование и строительство в Сибири. – 2008. – № 6. – С. 50-55.

55. Кривошеин, А.Д. И снова о вентиляции / А.Д. Кривошеин // Светопрозрачные конструкции. – 2008. – №3(59).

56. Кривошеин, А.Д. Прогнозирование работы систем естественной вентиляции жилых зданий с организованным притоком воздуха / А.Д. Кривошеин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2011. – №4. – С. 43-52.

57. 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.

58. 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.

59. 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.

60. 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.

61. Кузин, В.Ю. Методы круглогодичного обеспечения воздушно-теплого режима многоквартирных жилых домов: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / В.Ю. Кузин ; ННГАСУ. – Нижний Новгород, 2016. – 219 с.

62. Кузин, В.Ю. Режимы работы естественной вентиляции с горизонтальным сборным коллектором в многоквартирных жилых домах / В.Ю. Кузин // Приволжский научный журнал. – 2014. – №4 (32). – С. 162-168.

63. Ланда, Ю.И. Децентрализованная рекуперативная вентиляция квартир / Ю.И. Ланда // Спецвыпуск журнала Энергосбережение. – 2012. – С. 40-43.

64. Ланда, Ю.И. Энергосберегающие вентиляционные приборы для квартир / Ю.И. Ланда // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2011. – №6 (114). – С. 67-69.

65. Латышенков, М.А. Разработка методов расчета и исследования воздушного режима жилых и общественных зданий повышенной этажности: дис. ... канд. техн. наук / М.А. Латышенков. – М., 1970. – 187 с.

66. Ливчак, В.И. Последовательность в исполнении требований повышения энергоэффективности многоквартирных домов / В.И. Ливчак // Энергосбережение. – 2010. – №6. – С. 14-23.

67. Ливчак, И.Ф. Вентиляция многоэтажных жилых домов / И.Ф. Ливчак. – М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1951. – 172 с.
68. Ливчак, И.Ф. Вентиляция многоэтажных жилых зданий / И.Ф. Ливчак, А.Л. Наумов. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. – 134 с.
69. Ливчак, И.Ф. Регулируемая вентиляция жилых многоэтажных зданий / И.Ф. Ливчак, А.Л. Наумов // АВОК. – 1999. – №3. – С. 35-40.
70. Львов, Н.А. Русская пиростатика, или Употребление испытанных уже печей и каминов... Т. I. СПб, 1793
71. Любимцев, И.А. Краткая история английской архитектуры: [учеб. пособие] / И.А. Любимцев, В.Н. Алехин // Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 140 с.
72. Любимцев, И.А. Взлеты и падения римских архитектурно-строительных традиций в Британии / И.А. Любимцев, В.В. Букша, В.В. Бесов // International forum for multiple academic disciplines. – Dresden, Germany, 2017. – С. 96-106.
73. Лялькина, Г.Б. Из истории безопасного отопления / Г.Б. Лялькина // Вестник ПНИПУ. Безопасность и управление рисками. – 2016. – №4. – С. 138-146.
74. Малахов, М.А. Опыт проектирования естественно-механической вентиляции в жилых зданиях с теплыми чердаками / М.А. Малахов, А.Е. Савенков // АВОК. – 2008. – №6. – С. 20-32.;
75. Малахов, М.А. Системы естественно-механической вентиляции в жилых зданиях с теплыми чердаками / М.А. Малахов // АВОК. – 2006. – №7. – С. 8.
76. Малявина, Е.Г. Воздушный режим высотного жилого здания в течение года. Часть 1: воздушный режим при естественной вытяжной вентиляции / Е.Г. Малявина, С.В. Бирюков, С.Н. Дианов // АВОК. – 2004. – №8. – С. 6-12.
77. Малявина, Е.Г. Воздушный режим высотного жилого здания в течение года. Часть 2: воздушный режим при механической вытяжной вентиляции / Е.Г. Малявина, С.В. Бирюков, С.Н. Дианов // АВОК. – 2005. – №1. – С. 26.
78. Малявина, Е.Г. Воздушный режим жилых зданий. Учет влияния воздушного режима на работу системы вентиляции жилых зданий / Е.Г. Малявина, С.В. Бирюков, С.Н. Дианов // АВОК. – 2003. – №6. – С. 14-21.
79. Малявина, Е.Г. Расчет воздушного режима многоэтажных зданий с различной температурой воздуха в помещениях / Е.Г. Малявина, С.В. Бирюков // АВОК. – 2008. – №2. – С. 40-44.
80. Меренков, А.П. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 294 с.
81. Мировые тенденции в области ОВК: мнения экспертов // АВОК. – 2014. – №8. – С. 4-12.

82. Наумов, А.Л. Квартирные утилизаторы теплоты вытяжного воздуха / А.Л. Наумов, С.Ф. Серов, А.О. Будза // АВОК. – 2012. – №1. – С. 20-25.
83. Наумов, А.Л. Концепция и технические решения многоэтажных жилых зданий с низким энергопотреблением / А.Л. Наумов, Ю.А. Табунщиков, А.Ю. Милованов // АВОК. – 2013. – №4. – С. 12-21.
84. Немова, Д.В. Системы вентиляции в жилых зданиях как средство повышения энергоэффективности / Д.В. Немова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2012. – №3. – С. 83-86.
85. Новосельцев, Б.П. Общеобменная и местная вытяжная вентиляция в жилых многоэтажных домах / Б.П. Новосельцев // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2016. – №2 (170). – С. 72-73.
86. Орлов, А.И. Русская отопительно-вентиляционная техника / А.И. Орлов. – М.: Госстройиздат, 1950. – 224 с.
87. Позин, Г.М. К вопросу применения моделей турбулентности при численном моделировании вентиляционных процессов / Г.М. Позин, В.М. Уляшева, И.Д. Киборт // Известия вузов. Строительство. – 2013. – №10. – С.48-56.
88. Позин, Г.М. Численное моделирование тепловоздушных процессов в помещениях с источниками теплоты / Г.М. Позин, В.М. Уляшева // Вестник гражданских инженеров. – 2010. – №1. – С.147-151.
89. Поляков, В.В. Насосы и вентиляторы: учеб. для вузов / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. – М.: Стройиздат, 1990. – 336 с.
90. Понамарев, С.В. Краткая история вентиляции / С.В. Понамарев // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – №10 (154). – С.77-80.
91. Применение систем механической вентиляции в жилых зданиях // АВОК. – 2015. – №8. – С. 22-31.
92. Пухкал, В.А. Анализ теплотребления жилых зданий на отопление и вентиляцию по данным приборов учета тепловой энергии / В.А. Пухкал // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – №3. – С. 184-188.
93. Пухкал, В.А. Теплотребление жилых зданий на отопление и вентиляцию / В.А. Пухкал // Вестник гражданских инженеров. – 2008. – №2. – С. 75-77.
94. Р НП «АВОК» 5.2-2012. Технические рекомендации по организации воздухообмена в квартирах жилых зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2012. – 26 с.
95. Разумов, Н.Н. Определения воздухообменов в зданиях графоаналитическим методом / Н.Н. Разумов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1963. – № 12. – С. 5-12.

96. Рекомендации по применению алюминиевых литых секционных радиаторов «EXTRA THERM SERIR», «EXTRA THERM/80», «SEVEN 97 S», «SEVEN S/80» и «BIG 97 S». – М.: ОАО «НИИсантехники», 2007. – 39 с.

97. Самарин, О.Д. О методах расчета воздушного режима зданий / О.Д. Самарин // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2011. – №3 (111). – С.78-79.

98. Светлов, К.С. О применении ЭЦВМ для расчета воздухообмена жилых зданий. В сб.: «Методы математического моделирования в энергетике». Восточно-Сибирское книжное издательство – 1966.

99. Светлов, К.С. Расчет воздухообмена в многоэтажных зданиях с использованием электронно-вычислительных машин / К.С. Светлов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1966. – №11. – С. 28-31.

100. Сеппанен, О. Требования к энергоэффективности зданий в странах ЕС / О. Сеппанен // Энергосбережение. – 2010. – № 7.

101. Серов, С.Ф. Поквартирная система вентиляции с утилизаторами теплоты / С.Ф. Серов, А.Ю. Милованов // АВОК. – 2013. – №2. – С. 18-23.

102. Сизенко, О.А. Совершенствование методики расчета систем естественной вентиляции жилых зданий с теплыми чердаками: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / О.А. Сизенко ; ВГТУ. – Тольятти, 2009. – 156 с.

103. СНиП II-В.10-58. Жилые здания. Нормы проектирования. – М.: Издательство литературы по строительству, 1958.

104. СНиП II-Л.1-62. Жилые здания. Нормы проектирования. – М.: Издательство литературы по строительству, 1963.

105. СНиП II-Л.1-71* Жилые здания. Нормы проектирования. – М.: Издательство литературы по строительству, 1964.

106. СНиП 2.08.01-85. Жилые здания / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 16 с.

107. СНиП 2.08.01-89* Жилые здания / Госстрой СССР. – М.: ГУП ЦПП, 1999. – 14 с.

108. СНиП 31-01-2003. Здания жилые многоквартирные. – М.: Госстрой России, 2004.

109. СП 54.13330.2016. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003. – М.: Минрегион России, 2017. – 42 с.

110. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. – М.: ФАУ «ФЦС», 2017. – 78 с.

111. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. (Изд. 4-е переработанное и дополненное) Книга 2-я. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Р.В. Щекин [и др.] ; под ред. Р.В. Щекина. – Киев: Будивельник, 1976. – 352 с.

112. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. В 2 ч. Ч. 2. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Под ред. И.Г. Староверова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1977. – 502 с.
113. Стефанов, Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Е.Ф. Стефанов. – Санкт-Петербург: Издательство «АВОК Северо-Запад», 2005. – 400 с.
114. СТО 81004623-003-2015 Стандарт организации. Проектные решения узлов монтажа стеновых вентиляционных клапанов СВК «В-75» в наружных стенах различного конструктивного решения. Материалы для проектирования и рабочие чертежи узлов. – Омск: ООО «НПФ СЕВЕР», ФГБОУ ВПО «СИБАДИ», 2015. – 63 с.
115. СТО НП «АВОК» 2.1–2017 «Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена». – Москва, 2017. – 2 с.
116. СТО НП «АВОК» 2.2.4–2015 Рекомендации по повышению энергетической эффективности систем вентиляции и кондиционирования воздуха. – Москва, 2015. – 24 с.
117. СТО СРО НП СПАС-05-2013 Стандарт организации. Энергосбережение в зданиях. Расчет и проектирование систем вентиляции жилых многоквартирных зданий. – Омск, 2014. – 76 с.
118. Табунщиков, Ю.А. АВОК – 15 лет творческой напряженной работы / Ю.А. Табунщиков // АВОК. – 2005. – №1. – С. 6.
119. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий (2-е издание, исправленное и дополненное) / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК. – 2012. – 204 с.
120. Табунщиков, Ю.А., Нормативные требования по проветриванию и вентиляции квартир / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин // АВОК. – 2017. – №7. – С. 66-73.
121. Табунщиков, Ю.А. Основные принципы оценки экономической эффективности средств энергосбережения зданий / Ю.А. Табунщиков, И.Н. Ковалев, Е.О. Гегуева // Энергосбережение. – 2004. – №5. – С. 26-33.
122. Табунщиков, Ю.А. Малозатратные оперативные мероприятия по экономии энергии / Ю.А. Табунщиков // Энергосбережение. – 2012. – №7. – С. 4-7.
123. Табунщиков, Ю.А. Механическая вентиляция – путь к комфорту и энергосбережению / Ю.А. Табунщиков, Е.Г. Малявина, С.Н. Дианов // Энергосбережение. – 2000. – №3. – С. 5.
124. Табунщиков, Ю.А. Микроклимат и энергосбережение: пора понять приоритеты / Ю.А. Табунщиков // АВОК. – 2008. – №5. – С. 4-11.
125. Табунщиков, Ю.А. Новый век ОВК: проблемы и перспективы / Ю.А. Табунщиков // АВОК. – 2000. – №3. – С. 10-13.

126. Табунщиков, Ю.А. Методы и результаты оценки эффективности энергосберегающих решений / Ю.А. Табунщиков, Н.В. Шилкин, Ю.В. Миллер // АВОК. – 2008. – №5. – С. 4-11.
127. Табунщиков, Ю.А. Энергоэффективные здания: мировой и отечественный опыт / Ю.А. Табунщиков // Энергия: экономика, техника, экология. – 2004. – №10. – С. 20-27.
128. Табунщиков, Ю.А. Энергоэффективные здания: мировой и отечественный опыт / Ю.А. Табунщиков // Энергия: экономика, техника, экология. – 2004. – №11. – С. 26-29.
129. Талиев, В.Н. Расчет местных сопротивлений тройников / В.Н. Талиев. – М.: Госстройиздат, 1952. – 35 с.
130. Тертичник, Е.И. Использование программы Mathcad при решении задач воздушного режима здания / Е.И. Тертичник, К.М. Агаханова // Научное обозрение. – 2016. – №12. – С. 27-32.
131. Тертичник, Е.И. О методике расчета фильтрационных потоков воздуха в квартирах секции многоэтажного жилого здания / Е.И. Тертичник, К.М. Агаханова // Научное обозрение. – 2017. – №11. – С. 19-24.
132. Технологии DCV в системах вентиляции // Мир климата. – 2007. – №43. – С. 70-93.
133. Типы систем вентиляции в странах Европейского союза // АВОК. – 2012. – №3. – С. 44-41.
134. Титов, В.П. Курсовое и дипломное проектирование по вентиляции гражданских и промышленных зданий / В.П. Титов, Э.В. Сазонов, Ю.С. Краснов, В.И. Новожилов. – М.: Стройиздат, 1985. – 208 с.
135. ТР АВОК-4-2004 Технические рекомендации по организации воздухообмена в квартирах многоэтажного жилого дома. – Москва, 2004.
136. ТР АВОК-4-2008 Технические рекомендации по организации воздухообмена в квартирах многоэтажного жилого дома. – Москва, 2008.
137. Уляшева, В.М. О корректности численного моделирования вентиляционных процессов / В.М. Уляшева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2012. – №11-12 (647). – С. 79-83.
138. Харитонов, В.П. Естественная вентиляция с побуждением / В.П. Харитонов // АВОК. – 2006. – №3. – С. 46.
139. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учеб. для теплоэнергетических вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 500 с.
140. Черняков, Е. В. Повышение энергоэффективности систем подготовки и распределения воздуха чистых помещений: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Е. В. Черняков ; СКФУ. – СПб., 2014. – 165 с.

141. Шилкин, Н.В. Возможности энергосбережения в системах с регулируемой естественной вентиляцией / Н.В. Шилкин, Н.А. Шонина, Ю.В. Миллер // Энергосбережение. – 2018. – №2. – С. 16-23.
142. Юн, А. А. Теория и практика моделирования турбулентных течений. Монография / А.А. Юн. – М.: Либроком, 2009. – 272 с.
143. Acred, A. Multiple flow regimes in stack ventilation of multi-storey atrium buildings / A. Acred, G. R. Hunt // International Journal of Ventilation. – 2013. – №12(1). – P. 31-40.
144. Acred, A. A simplified mathematical approach for modelling stack ventilation in multi-compartment buildings / A. Acred, G. R. Hunt // Building and Environment. – 2014. – №71. – P. 121-130.
145. Acred, A. Stack ventilation in multi-storey atrium buildings: a dimensionless design approach / A. Acred, G. R. Hunt // Building and Environment. – 2014. – №72. – P. 44-52.
146. Acred, A. Natural ventilation in multi-storey buildings: a preliminary design approach. PhD Thesis / A. Acred. – Imperial College London. – 2014. – 228 p.
147. ANSI/ASHRAE Standard 55 – 2013 Thermal environmental conditions for human occupancy.
148. Ansys FLUENT 16.0 Documentation. – USA: ANSYS, Inc., 2014. – 72 p.
149. ASHRAE/ANSI Standard 62.1 – 2016 Ventilation for acceptable indoor air quality.
150. Billings, J.S. Ventilation and heating. The Engineering Record, London, 1896.
151. Brelih, N. Требования к вентиляции и качеству внутреннего воздуха в национальных нормативах стран Европы / N. Brelih // АВОК. – 2011. – №3. – С. 22-31.
152. Connick, O. The Fluid Mechanics of Hybrid Ventilation. PhD Thesis / O. Connick. – Imperial College London. – 2013. – 213 p.
153. Cook, M. J. CFD modelling of buoyancy-driven natural ventilation. CIBSE Natural Ventilation and Building Modelling groups seminar / M. J. Cook. – University College London. – 2014. – 35 p.
154. CR1752:1998 Ventilation for buildings design criteria for the indoor environment.
155. Economidou, M. 2010 Transient buoyancy-driven flows in multi-storey buildings the fluid mechanics of linked vessels. PhD Thesis / M. Economidou. – Imperial College London. – 2010. – 215 p.
156. Emmerich, S. J. LoopDA: A natural ventilation system design and analysis tool. Proceedings of the 8th Conference of International Building Performance Simulation Association / S. J. Emmerich, S. W. Dols. – Eindhoven. – 2003. – P. 291-298.
157. EN 13779:2007 Ventilation for non-residential buildings. Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.

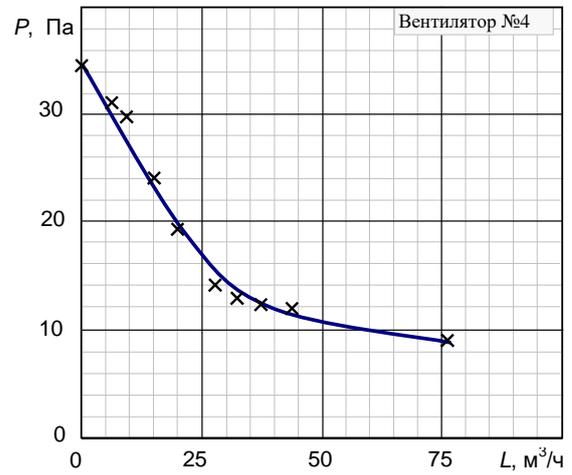
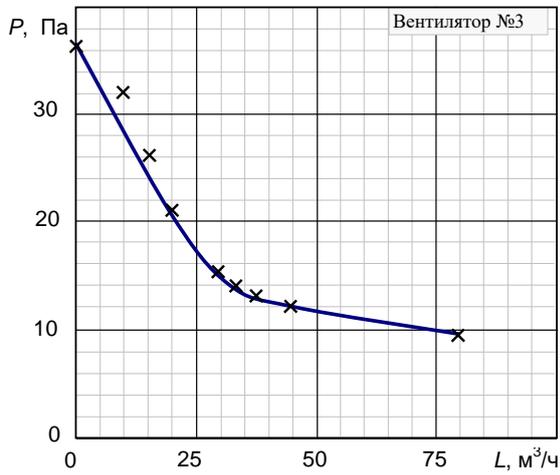
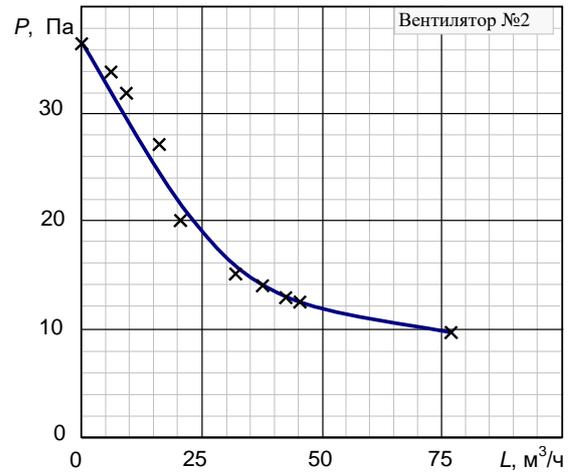
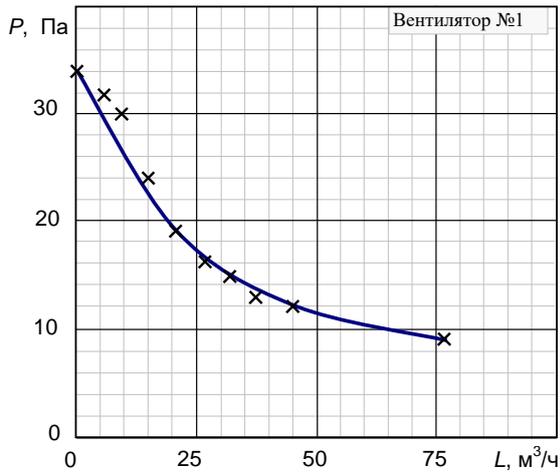
158. EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings.
159. Etheridge, D. W. A note on crack flow equations for ventilation modelling / D. W. Etheridge // *Building and Environment*. – 1998. – №33(5). – P. 325-328.
160. Etheridge, D. W. *Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design*. / D. W. Etheridge. – John Wiley & Sons. Chichester, UK, – 2012. – 428 p.
161. Ferziger, J. H. *Computational Methods for Fluid Dynamics* / J. H. Ferziger, M. Peric. Berlin: Springer, 2002. – 426 p.
162. Fox, R. W. *Introduction to fluid mechanics (6th ed.)* / R. W. Fox, A. T. McDonald, Phillip J Pritchard. – USA: John Wiley and Sons, 2004. – 348 p.
163. Janssen, J.E. The History of Ventilation and Temperature Control / J.E. Janssen // *ASHRAE Journal*. – 1999. – P. 47-52, October.
164. Jones, B. M., Cook M. J., Fitzgerald S. D., Iddon C. R. A review of ventilation opening area terminology / B. M. Jones, M. J. Cook, S. D. Fitzgerald, C. R. Iddon // *Building and Environment*. – 2016. – №118. – P. 249-258.
165. Ji, Y. 2004 CFD modelling of atrium-assisted natural ventilation In ROOMVENT / Y. Ji, Cook M. J., G. R. Hunt, // *The 9th international conference on air distribution in rooms*. – Coimbra, Portugal. – 2004. – P. 147-158.
166. Hirsch, C. *Numerical Computation of Internal and External Flows. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, 2nd edn.* / C. Hirsch. – Butterworth-Heinemann, Oxford, – 2007. – 696 p.
167. Klauss, A.K. History of Changing Concepts of Ventilation Requirements. / J.E. Janssen, R.H. Tull, L.M. Roots, J.R. Pfafflin // *ASHRAE Journal*. – 1970. – 12(6).
168. Litiu, A. Ventilation system types in some EU countries / A. Litiu // *REHVA Journal*. – 2012. – № 1 (49). – P. 18-23.
169. Olesen, B. Стандарты вентиляции и качества воздуха: Европа и США / B. Olesen // *ABOK*. – 2011. – №5. – С. 18-25.
170. Peterman, F. Der Verlust in schiefwinkligen Rohrverzweigungen // *Mitteilungen des Hydraulischen Instituts der Technischen Hochschule. Munchen*. 1929. Heft 3. S. 100-120.
171. Vogel, C. Untersuchungen uber den Verlust in rechtwinkligen Rohrverzweigungen // *Mitteilungen des Hydraulischen Instituts der Technischen Hochschule. Munchen*. 1926. Heft 1, 1928. Heft 2. S. 85-105.

Приложение А

Результаты аэродинамических испытаний вентиляторов «Домовент 100»

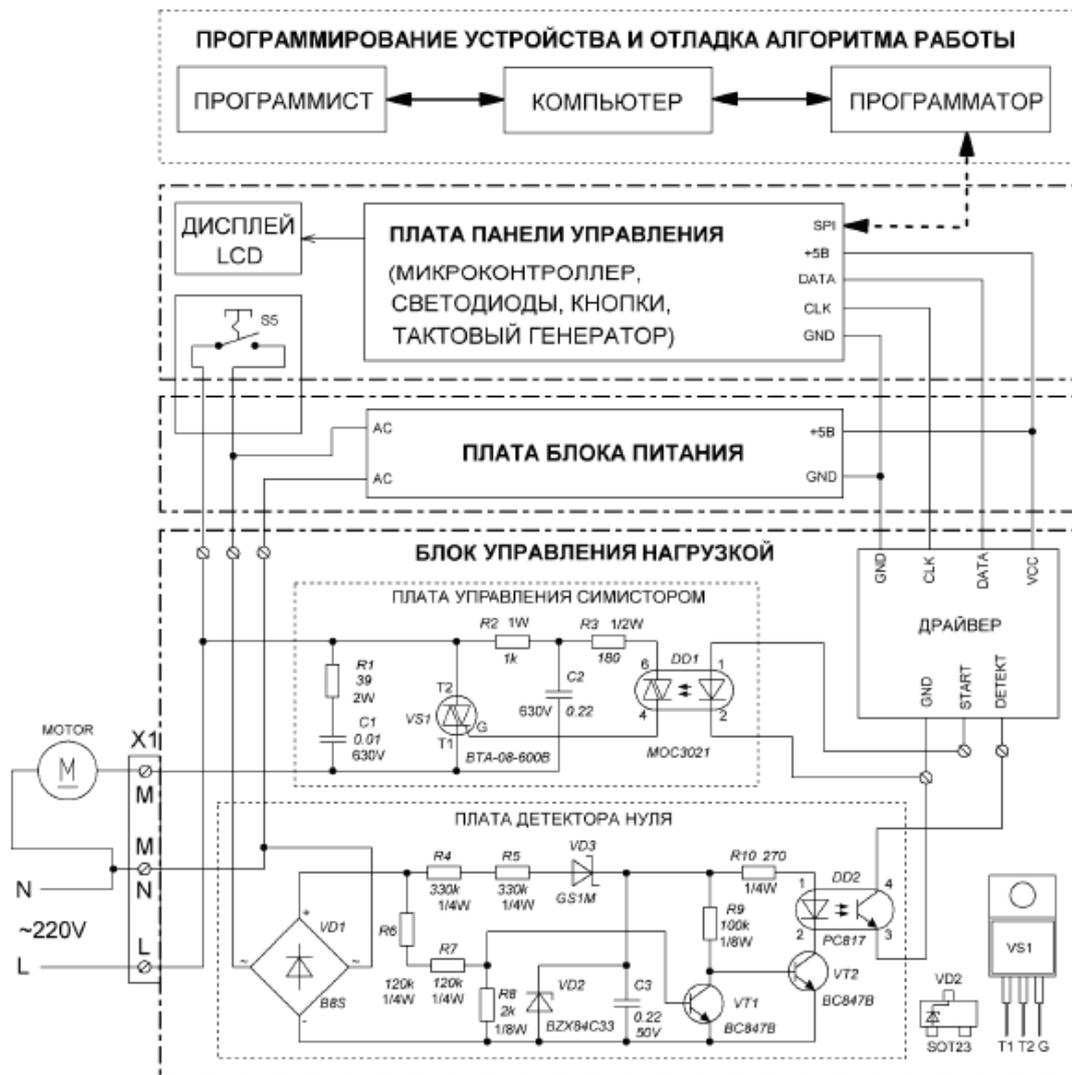
Аэродинамические характеристики вентиляторов Домовент 100 были получены на испытательном стенде лаборатории ИЦ «Стройтест-СибАДИ».

Испытательный стенд собран по типу В в соответствии с требованиями ГОСТ 10921-90 «Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний».



Приложение Б

Общая электрическая схема опытного образца блока управления вентилятором

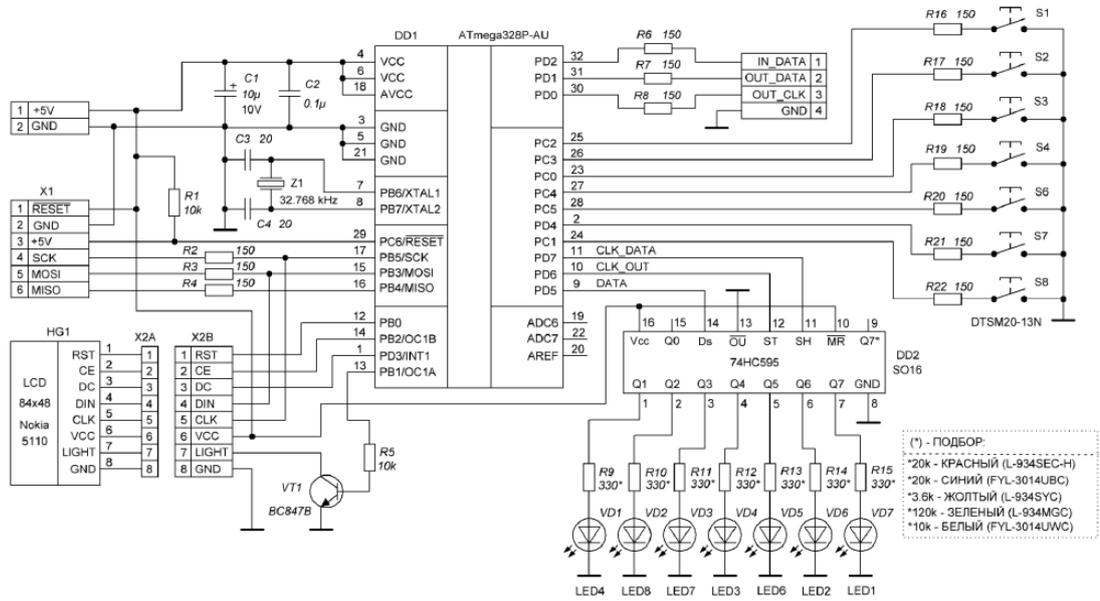


В соответствии с общей электрической схемой устройство состоит из трех блоков:

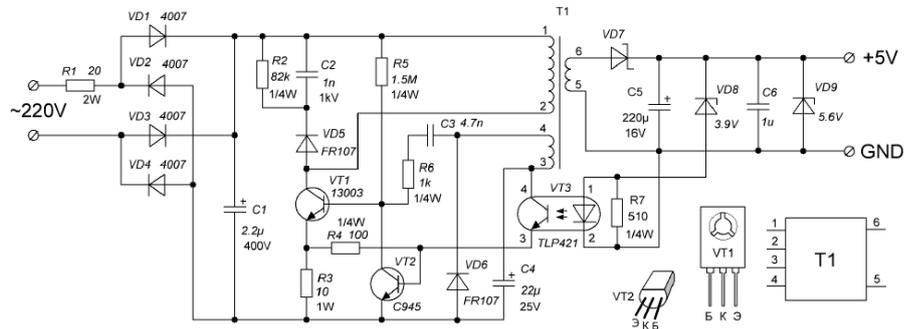
- панель управления;
- блок питания;
- блок управления нагрузкой.

Приложение В

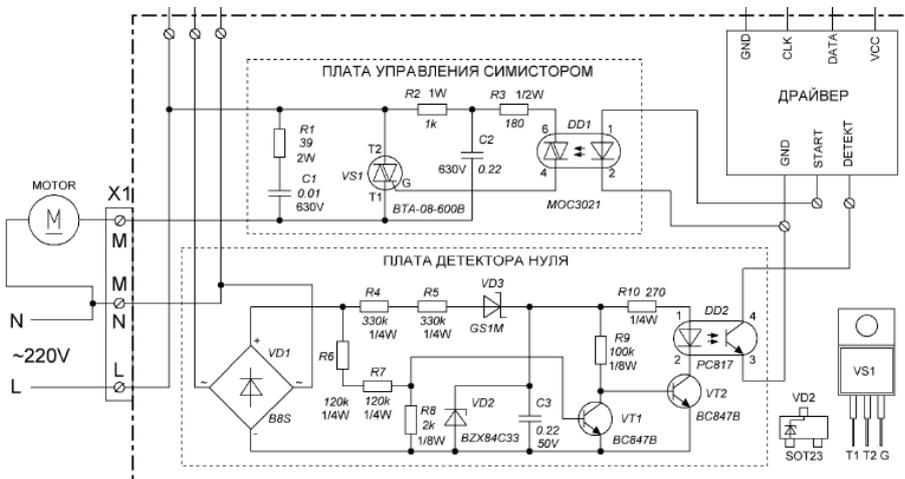
Электрические схемы панели управления, блока питания и блока управления нагрузкой
 опытного образца блока управления вентилятором



Электрическая схема панели управления



Электрическая схема блока питания



Электрическая схема блока управления нагрузкой

Приложение Г

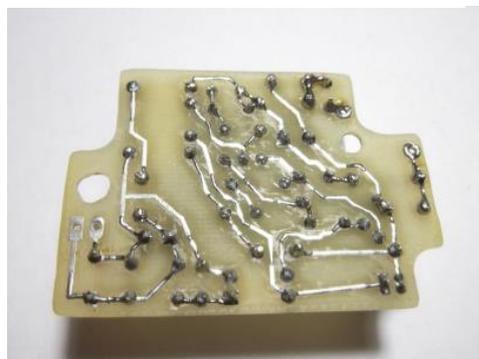
Внешний вид плат панели управления, блока питания и блока управления нагрузкой опытного образца блока управления вентилятором



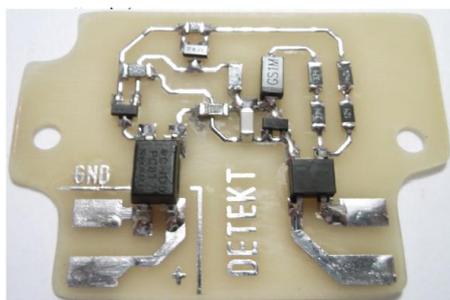
Внешний вид первой платы панели управления (лицевая и обратная сторона)



Внешний вид второй платы панели управления (лицевая и обратная сторона)



Внешний вид платы блока питания (лицевая и обратная сторона)



Внешний вид платы детектора нуля (слева) и платы блока управления нагрузкой (справа)

Приложение Д

Основные характеристики опытного образца блока управления вентилятором

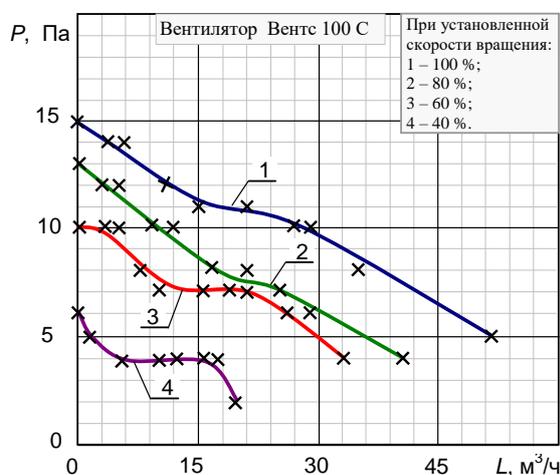
№ п/п	Наименование	Значение
1	Габаритные размеры, мм (<i>hxbxl</i>)	48x70x75
2	Напряжение, В	230 при 50/60 Гц
3	Мощность, кВт	$\leq 1,0$
4	Максимальный рабочий ток, А	10
5	Дискретность регулирования скорости вращения, %	5
6	Максимальное количество подключаемых датчиков, шт	10
7	Частота обновления информации с датчиков, сек	1
8	Напряжение в линии связи с датчиками, В	≤ 12
9	Частота радиоканала пульта ДУ, ГГц	2,4

Приложение Е

Результаты аэродинамических испытаний вентиляторов при регулировании скорости их вращения с помощью опытного образца блока управления вентилятором

С целью определения влияния регулирования вентиляторов с помощью опытного образца блока управления вентилятором была проведена серия испытаний вентиляторов различных марок на испытательном стенде лаборатории ИЦ «Стройтест-СибАДИ».

Характеристики измерялись при изменении скорости вращения вентиляторов за счет опытного образца блока управления вентилятором. Задаваемая скорость вращения: 20 %, 40%, 60% и 100%.

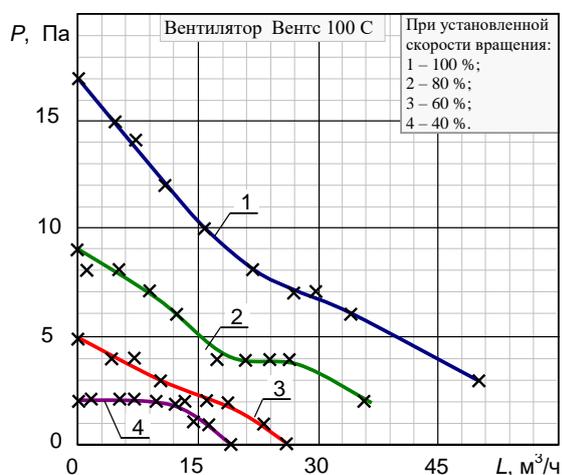


Аэродинамическая характеристика вентилятора Вентс 100 С №1

Результаты испытания вентилятора Вентс 100 С №1

Скорость вращения колеса вентилятора, %							
100		60		40		20	
P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч
5	52,0	4	39,9	4	32,8	2	21,2
8	35,3	6	28,5	6	24,6	4	17,0
10	31,1	7	25,7	7	22,0	4	15,5
10	27,4	8	22,6	7	19,2	4	12,7
11	22,6	8	19,8	7	15,5	4	11,0
11	15,0	10	12,7	7	10,7	4	7,63
12	11,0	10	9,61	8	8,20	4	5,93
14	7,91	12	7,35	10	5,37	5	1,98
14	4,80	12	3,96	10	4,52	6	0,57
15	0,00	13	0,57	10	0,82	6	0,00

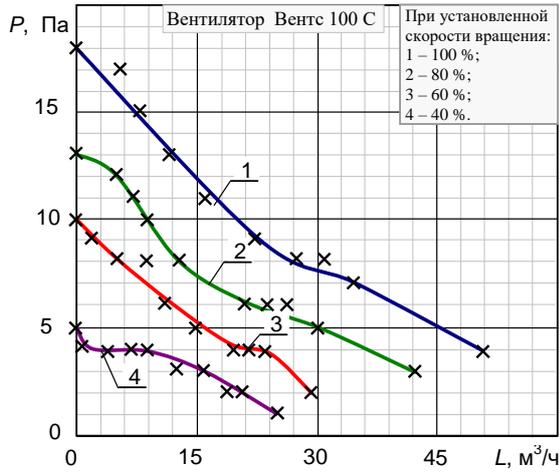
Результаты испытания вентилятора Вентс 100 С №2



Аэродинамическая характеристика вентилятора Вентс 100 С №2

Скорость вращения колеса вентилятора, %							
100		80		60		40	
P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч
3	50,0	2	36,7	0	26,0	0	19,2
6	34,2	4	26,9	1	20,4	1	15,5
7	30,8	4	24,3	2	18,9	1	14,4
7	27,1	4	21,5	2	16,7	2	12,7
8	22,3	4	17,8	2	13,9	2	10,7
10	15,5	6	12,2	3	9,33	2	7,63
12	11,6	7	9,04	4	7,35	2	5,65
14	7,35	8	5,93	4	4,80	2	1,70
15	5,09	8	0,85	5	0,00	2	0,00
17	0,00	9	0,00	5	0,00	2	0,00

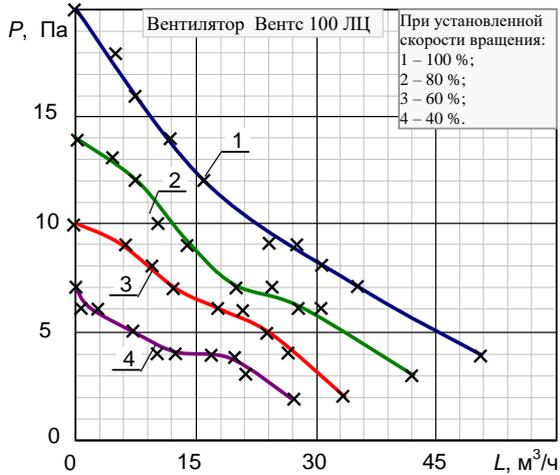
Результаты испытания вентилятора
Вентс 100 С №3



Аэродинамическая характеристика
вентилятора Вентс 100 С №3

Скорость вращения колеса вентилятора, %							
100		80		60		40	
P , Па	L , м³/ч	P , Па	L , м³/ч	P , Па	L , м³/ч	P , Па	L , м³/ч
4	51,2	3	41,3	2	29,4	1	25,7
7	34,8	5	29,4	4	23,5	2	20,4
8	31,1	6	26,6	4	21,5	2	18,4
8	27,1	6	23,5	4	18,9	3	15,5
9	22,6	6	19,8	5	16,4	3	12,7
11	15,8	8	13,6	6	11,0	4	8,8
13	11,9	10	10,2	8	9,04	4	7,07
15	7,63	11	6,50	8	5,65	4	3,96
17	5,93	12	5,37	9	1,98	4	0,57
18	0,00	13	0,00	10	0,00	5	0,00

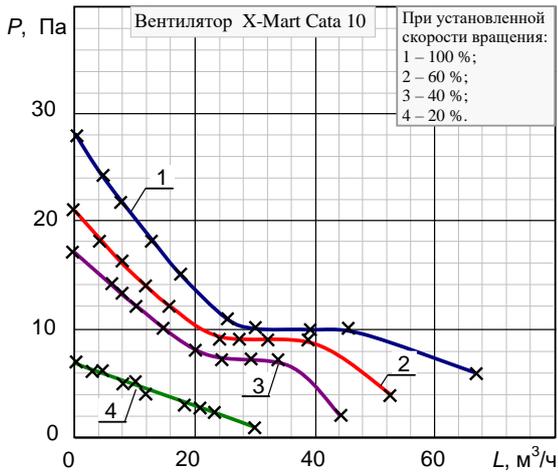
Результаты испытания вентилятора
Вентс 100 ЛЦ



Аэродинамическая характеристика
вентилятора Вентс 100 ЛЦ

Скорость вращения колеса вентилятора, %							
100		80		60		40	
P , Па	L , м³/ч	P , Па	L , м³/ч	P , Па	L , м³/ч	P , Па	L , м³/ч
4	51,2	3	42,7	2	34,8	2	27,4
7	35,0	6	30,8	4	26,3	3	21,5
8	31,4	6	27,7	5	24,3	4	19,5
9	27,7	7	24,3	6	21,5	4	17,0
9	22,9	7	20,4	6	18,1	4	14,4
12	16,1	9	14,1	7	12,2	4	9,89
14	12,2	10	10,7	8	9,33	5	7,63
16	7,63	12	7,07	9	6,50	6	5,65
18	5,37	13	5,09	10	0,85	6	0,00
20	0,00	14	0,00	10	0,00	7	0,00

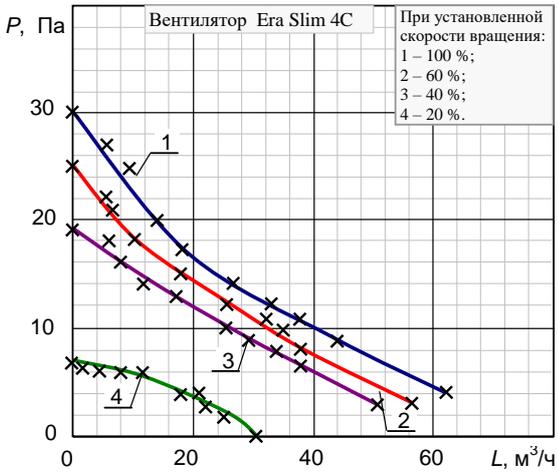
Результаты испытания вентилятора
X-Mart Cata 10



Аэродинамическая характеристика
вентилятора X-Mart Cata 10

Скорость вращения колеса вентилятора, %							
100		60		40		20	
P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч
6	67,8	4	53,1	2	44,4	1	29,7
10	45,5	9	39,9	7	34,8	2	23,7
10	39,0	9	32,2	7	29,7	3	21,5
10	30,0	9	27,1	7	25,4	3	18,7
11	24,9	9	22,9	8	21,8	4	16,4
15	17,8	12	16,1	10	15,0	5	11,0
18	13,3	14	11,9	12	11,3	5	8,48
22	8,20	16	7,63	13	7,35	6	5,93
24	5,65	18	4,80	14	5,65	6	3,11
28	0,00	21	0,00	17	0,00	7	0,00

Результаты испытания вентилятора
Era Slim 4C



Аэродинамическая характеристика
вентилятора Era Slim 4C

Скорость вращения колеса вентилятора, %							
100		60		40		20	
P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч	P, Па	L, м³/ч
4	62,5	3	57,1	3	51,2	0	30,8
9	43,2	8	40,7	7	37,3	2	24,6
11	38,7	10	36,2	8	33,4	3	22,6
12	33,1	11	31,9	9	29,4	4	20,6
14	28,5	12	27,1	10	25,2	4	18,1
17	19,5	15	18,7	13	17,0	6	12,2
20	14,7	18	13,9	14	12,4	6	8,76
25	9,33	21	8,76	16	7,91	6	5,65
27	6,50	22	6,50	18	5,93	6	1,70
30	0,00	25	0,00	19	0,00	7	0,00

Приложение Ж

Справка об использовании результатов диссертационной работы



Саморегулируемая организация Ассоциация
«Межрегиональный союз проектировщиков и архитекторов Сибири»
 (СРО СПАС)

ул. Учебная, дом 79, оф.301, Омск, 644024
 Тел./факс (3812) 308-264, 308-265
 e-mail: omsk-spas@mail.ru

ИНН 5504136056 КПП 550401001
 ОГРН 1085500001938
 Р/с 40703810945000000070
 в Омском отделении СБ России, г. Омск

Омск
 11.03.2019г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Кривошеина М.А.
 на тему «Совершенствование систем вентиляции жилых многоквартирных зданий
 с индивидуальными вытяжными вентиляторами»

Методика расчета систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами и технические решения, разработанные Кривошеиным М.А. в диссертационной работе «Совершенствование систем вентиляции жилых многоквартирных зданий с индивидуальными вытяжными вентиляторами», использованы при разработке стандарта СТО СРО НП СПАС-05-2013 «Энергосбережение в зданиях. Расчет и проектирование систем вентиляции жилых многоквартирных зданий».

Стандарт утвержден и введен в действие 27 марта 2014 года.

Председатель Правления
 СРО НП СПАС



Ю.М. Мосенкис

