

На правах рукописи



Аншукова Екатерина Аркадьевна

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОГО
РЕЖИМА ТЕПЛЫХ ЧЕРДАКОВ
МНОГОЭТАЖНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ
НА СОСТОЯНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ
КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Дацюк Тамара Александровна.

Официальные оппоненты: **Умнякова Нина Павловна,**
доктор технических наук, доцент,
ФГБУ «НИИСФ РААСН»,
заместитель директора;

Малявина Елена Георгиевна,
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет»,
кафедра «Теплогазоснабжение
и вентиляция», профессор.

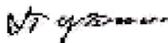
Ведущая организация **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет».**

Защита диссертации состоится «15» декабря 2021 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета **24.2.380.03** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, аудитория 220, тел./факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru.

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

Автореферат диссертации разослан «25» октября 2021 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В. А. Пухчал

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время широко распространено строительство многоэтажных жилых зданий с теплым чердаком. Такой вариант устройства систем вентиляции отвечает требованиям по энергосбережению и повышает долговечность кровли. Работа систем естественной вентиляции, состояние и долговечность ограждающих конструкций зависят от характеристик температурно-влажностного режима теплого чердака, и должны рассматриваться как комплексная задача с учетом воздухопроницаемости ограждающих конструкций и ветрового режима застройки. В действующих рекомендациях по проектированию систем естественной вентиляции многоэтажных жилых зданий с теплым чердаком не учитывается весь комплекс влияющих факторов.

Вопросам устройства теплых чердаков, особенностям работы системы естественной вентиляции многоэтажных жилых зданий с теплым чердаком посвящено немало исследований, в которых решены конкретные задачи, направленные в основном на повышение эффективности работы систем вентиляции.

Опыт эксплуатации многоэтажных жилых зданий с теплым чердаком выявил ряд нерешенных на сегодняшний день проблем, которые связаны не только с ошибками проектирования, но и отсутствием количественной информации о закономерностях формирования температурно-влажностного режима в объеме теплого чердака и его влиянии на ограждающие конструкции.

В связи с отмеченным выше, целесообразно проведение дополнительных исследований, направленных на выявление условий формирования и влияния тепловлажностного режима теплого чердака на эффективность работы систем естественной вентиляции и состояние наружных ограждающих конструкций теплого чердака с учетом климатических условий.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической основой исследования послужили работы ряда отечественных и зарубежных ученых: И.И. Старовой, Е. Г. Малявиной, А. П. Прохоренко, Н.И. Ватина. Известны исследования, в которых теплый чердак отдельной секции здания выделен как отдельный объем, воздух из которого удаляется в атмосферу через одну общую шахту, проведенные авторами О. А. Сизенко, М. Н. Курченко и др.

Цель исследования заключается в изучении условий формирования и влияния тепловлажностного режима теплого чердака на эффективность работы систем естественной вентиляции и состояние наружных ограждающих конструкций теплого чердака с учетом климатических условий.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих рекомендаций по проектированию систем естественной вентиляции многоэтажных жилых зданий с теплым чердаком.

2. Провести натурное обследование состояния ограждающих конструкций и тепловлажностного режима теплых чердаков в переходный период года и в отопительный сезон;

3. Разработать численные модели:

– для расчета теплотехнических характеристик ограждающих конструкций;

– для исследования условий формирования и распределения параметров микроклимата в объеме теплого чердака.

4. Оценить влияние температуры и воздухопроницаемости ограждающих конструкций на формирование тепловлажностного режима теплых чердаков и эффективность работы системы вентиляции.

5. Выявить причину деструкции наружных стен теплых чердаков многоэтажных жилых зданий.

6. Разработать рекомендации по результатам исследований для проведения комплексных натурных обследований и проектирования систем вентиляции жилых зданий с теплым чердаком.

Объектом исследования являются теплые чердаки многоэтажных жилых зданий с естественной вентиляцией.

Предметом исследования является тепловлажностный режим теплых чердаков и ограждающие конструкции.

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

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.3. (05.23.03) «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», а именно п.5 5. «Тепловой, воздушный и влажностный режимы зданий различного назначения, тепломассообмен в ограждениях и разработка методов расчета энергосбережения в зданиях».

Научная новизна исследования:

1. Разработана комплексная методика натурного эксперимента для определения тепловлажностных характеристик воздушной среды и состояния ограждающих конструкций в помещениях теплых чердаков.

2. Разработана численная модель для расчета теплотехнических характеристик ограждающих конструкций.

3. Разработана численная модель тепловлажностного режима теплых чердаков многоэтажных жилых зданий с учетом влияния внешних условий.

4. Выявлены физические факторы, определяющие условия формирования тепловлажностного режима теплых чердаков и состояния наружных ограждающих конструкций.

Теоретическая значимость работы состоит в анализе тепловлажностного режима теплых чердаков многоэтажных жилых зданий, исследовании распределения параметров микроклимата в объеме теплого чердака,

выявления комплексной причины деструкции наружных ограждающих конструкций.

Практическая значимость работы состоит в разработке методики комплексного натурного обследования и организации мониторинга тепловлажностного режима в теплом чердаке многоэтажного жилого дома; разработке рекомендаций по выбору ограждающих конструкций, планировке теплого чердака и выбора места расположения вентиляционной шахты, полученных при изучении условий формирования тепловлажностного режима теплых чердаков многоэтажных жилых зданий.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждается сходимостью результатов, полученных численным моделированием и натурными исследованиями.

Основные результаты диссертации были представлены на следующих конференциях: на 1-й международной научно-технической конференции «Инженерные системы и энергоэффективность в строительстве, природообустройстве» (АСиА, 2018) 74-й научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства» (СПбГАСУ, 2020), 18-й Всероссийской научно-технической конференции, посвященной столетию МИСИ-МГСУ «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции» (НИУ МГСУ, 2020).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах, в том числе 3 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы 197 страниц, в том числе: 120 страниц – основной текст, содержащий 18 таблиц, 88 рисунков, список литературы из 132 наименований на 13 страницах; 8 приложений на 62 страницах.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи, осуществляется выбор предмета и объекта исследования. Формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено устройство систем естественной вентиляции с теплыми чердаками; описаны принципы работы, а также условия, влияющие на её эффективность; рассмотрены методы расчета систем вентиляции при наличии теплого чердака; выполнен обзор и анализ нормативных требований для проектирования систем естественной вентиляции с теплым чердаком; описано влияние параметров микроклимата теплых чердаков на ограждающие конструкции.

Во второй главе проведен анализ существующих проблем при эксплуатации многоэтажных жилых зданий с теплым чердаком; приведены результаты обследования наружных конструкций чердака; приведены

и проанализированы результаты натурального обследования тепловлажностных характеристик в объеме теплого чердака многоэтажных жилых зданий, а также тепловизионной диагностики.

В третьей главе разработана численная модель для расчета теплотехнических характеристик ограждающих конструкций теплого чердака; приведены результаты расчета теплотехнических характеристик; представлены результаты расчета температурных полей в ограждающих конструкциях.

В четвертой главе разработана численная модель для исследования условий формирования и распределения параметров микроклимата в объеме чердака; представлены результаты отдельных серий расчета.

В пятой главе разработана методика комплексного натурального обследования и организации мониторинга тепловлажностного режима в теплом чердаке многоэтажного жилого дома.

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

1. Результаты натурального обследования тепловлажностного режима и ограждающих конструкций теплых чердаков многоэтажных жилых зданий.

Исследование параметров микроклимата теплого чердака проводилось для ряда многоэтажных жилых зданий с выявленной проблемой разрушения наружного слоя стен теплого чердака. На рисунке 1 приведен пример характерных дефектов, выявленных при обследовании комплекса зданий, расположенных по адресу: Ленинградская область, Всеволожский район, поселок Мурино, ул. Новая, д.7, корпуса 1–3.

По результатам обследования выявлены обширные области разрушения наружного слоя керамического пустотного кирпича стен. Отслоение наружного слоя кирпича зафиксировано также на вентиляционных шахтах, расположенных на кровле. Степень деструкции зависит от ориентации стен, более интенсивная деструкция имеет место для стен корпусов, выходящих на юг, юго-запад и юго-восток.

Испытания отобранных образцов кирпича, проведенные в аккредитованном ИЦ СПбГАСУ, показало, что кирпич соответствует требованиям ГОСТ 530-2012, так как имеет водопоглощение не менее 6,0%, прочность М-150 (протокол испытаний № 4388-01 от 17 октября 2018 г.). Влагосодержание поверхностного слоя кирпича достигает 11% (водопоглощение кирпича – 12%), то есть содержание влаги в кирпиче практически соответствует водопоглощению, в то время как в соответствии с СП 28.13330.2012 «Защита строительных конструкций от коррозии», приложение Ч предельное значение влажности кирпича не должно превышать 2%.

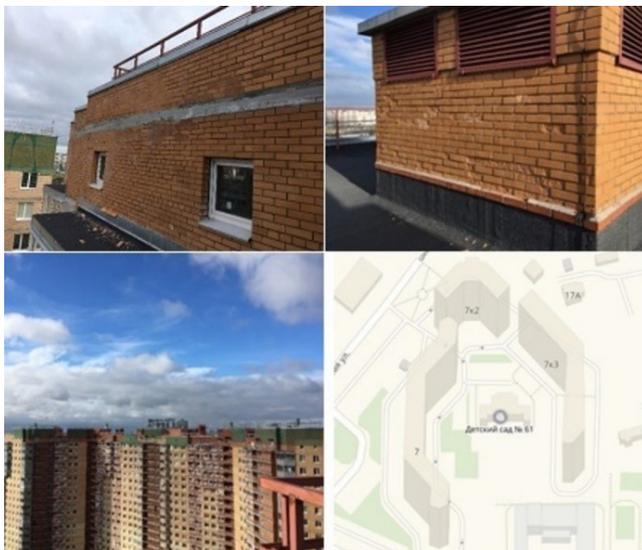


Рисунок 1 – Деструкция наружных стен теплых чердаков и поверхности вентиляхты

При проведении натуральных обследований использовались приборы:

- комбинированный прибор «Testo 425» № 01387490, свидетельство о поверке С-СП/27-05-2021/66580132 до 26.05.2022 г. Пределы измерения минус 20 °С до +70 °С, разрешение 0,1 °С (измерение температуры и скорости воздуха);
- термогигрометр – «Testo 610» № 210-9901, свидетельство о поверке СП/04-06-2021/68762668 до 03.06.2022 г. Пределы измерения 0 % – 100 %;
- термометр контактный, ТК-5.01П № 941739, свидетельство о поверке №19117-ПЗ до 12.11.2021 г.;
- влагомер «Testo 606-2» №38725666/007 свидетельство о поверке № 1662 КЗ/21 до 11.02.2022 г.;
- анемометр с крыльчаткой «Testo 410-2» №38584667/006, свидетельство о поверке 14291/ F до 02.11.2021 г.;
- тепловизор «Testo 882» свидетельство о поверке СП/26-05-2021/66368422 до 26. 05.22 г.

Обследование внутренней поверхности стен теплого чердака (газобетонных блоков) не выявило существенных дефектов. Отмечены локальные разрушения швов газобетонных блоков. Влагосодержание поверхностного слоя газобетона на внутренних поверхностях в переходный период (влагомер «Testo 606-2») составляло 20-22%, что в 1,5–1,8 раз выше нормируемых величин.

Выявленные дефекты наружных стен локализованы только в зоне расположения теплого чердака всех корпусов и вероятнее всего, связаны с тепловлажностным режимом чердаков. Мониторинг параметров микроклимата проводился в переходный период года и в отопительный период.

Первое обследование было выполнено в период с 05.10.2018 по 26.10.2018 г. При проведении обследования температура внутри помещения чердака изменялась от 1,6 °С до 15,8 °С, влажность воздуха – от 40% до 85%. Наружная температура воздуха изменялась от минус 2 °С до +18 °С, относительная влажность воздуха изменялась в диапазоне 81-90 %. Графически изменение температуры воздуха в помещении чердака приведено на рисунке 2.

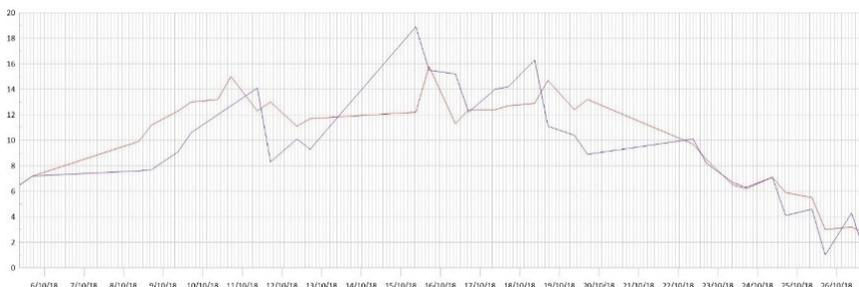


Рисунок 2 – Температура воздуха в помещении чердака (красная линия) и наружная температура (синяя линия) в переходный период

Измерение скорости выхода вентиляционного воздуха из вентиляционных каналов в чердачное пространство в секциях 3-5 показало, что в переходный период скорости варьировались в диапазоне 0,5–0,8 м/с, что соответствовало эффективности работы вентиляции 35-55% от нормативных воздухообменов.

Скорость выхода воздуха из вентиляционных шахт, расположенных на кровле, в переходный период составляла 0,2–0,5 м/с.

Вторая серия измерений проводилась в помещении теплого чердака в отопительный период с 05.03.2019 по 16.06.2019 г. Датчики температуры и влажности воздуха были установлены в местах расположения вентканалов, удаляющих воздух из жилых помещений, а также у внутренней поверхности наружной стены чердака, на которой происходили деструктивные процессы. Для регистрации параметров микроклимата использовался «Измерительный компьютерный комплекс iButton Data Logger Revisor» (iBDLR). В результате проведения натурных исследований был получен массив данных по изменению температуры и относительной влажности внутри помещения теплого чердака. При проведении обследования в отопительный период температура внутри помещения чердака разных секций изменялась от +12 °С до +25 °С, влажность воздуха изменялась от 24 до 60 % (таблица 1).

Таблица 1 – Значения средней температуры и влажности воздуха в отопительный период

| Рассматриваемый период | Температура воздуха у наружной стены, °С | Влажность воздуха у наружной стены, % | Температура воздуха у вентканала, °С | Влажность воздуха у вентканала, % |
|------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Октябрь 2019 | 10 | 49 | | |
| Март 2020 | 19,0 | 45 | 21,5 | 37 |
| Апрель | 22,0 | 36 | 22,8 | 35 |
| Май | 22,8 | 38 | 23,2 | 39 |
| Июнь | 22,5 | 48 | 22,4 | 48 |

В качестве примера на рисунках 3 и 4 приведено изменение температуры и влажности воздуха в помещении чердака для марта 2020 года, а также наружного воздуха.

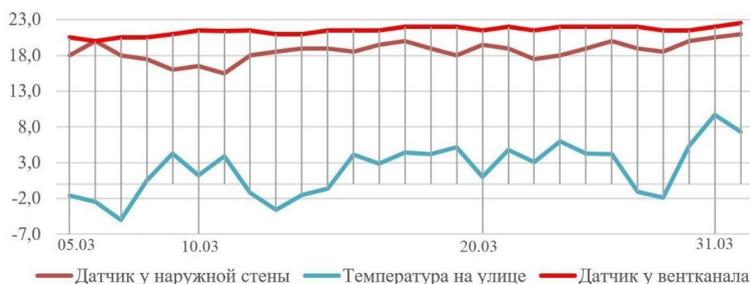


Рисунок 3 – Изменение температуры внутреннего и наружного воздуха в марте

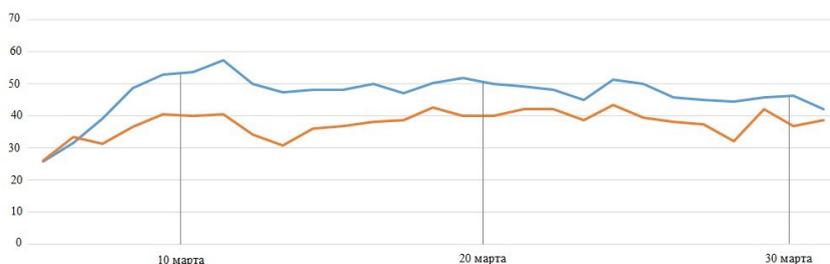


Рисунок 4 – Изменение влажности воздуха в марте. Синяя линия – датчик, расположенный у вентканала, красный – у наружной стены

В отопительный период производилась тепловизионная диагностика. При обследовании конструкций теплого чердака были выявлены следующие дефекты:

- кирпичной кладки;
- швов и стыков газобетонных блоков;
- инфильтрация через неплотности оконных блоков.

Пример характерных дефектов в местах сопряжения конструкций, выявленных по результатам тепловизионного обследования приведен на рисунке 5.

Покрытие – температура +14°C, пол – температура +16°C

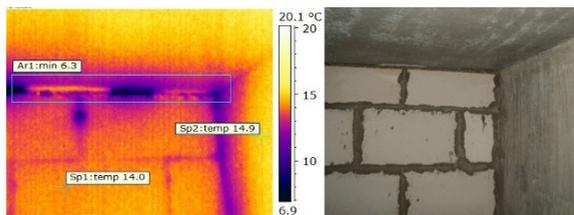


Рисунок 5 – Термограмма стыка наружной стены и покрытия

Анализ данных, полученных при натурном обследовании, показал, что:

- температура и влажность воздуха в помещении теплого чердака в переходный период изменялись в широком диапазоне: температура от +2 до +15°C, влажность в пределах 80–40 %;

- влажность воздуха в помещении теплого чердака в отопительный период находилась в пределах, допустимых значений для чердака 40-60%;

- температура в помещении теплого чердака в отопительный период превышала рекомендуемый диапазон и составляла 18-25°C;

- на внутренней поверхности газобетонных блоков отсутствует штукатурка;

- в помещении чердака много перегородок, что препятствует свободному распределению воздуха по всему объему чердака, и может приводить к образованию застойных зон с повышенной влажностью.

Для выявления условий формирования тепловлажностного режима в объеме чердака при влиянии различных факторов и возникновения причин деструкции наружных стен выполнен теплотехнический расчет с использованием СП 50.13330.2012 и метода численного моделирования с учетом данных натурных экспериментов.

2. Результаты теплотехнического расчета ограждающих конструкций теплого чердака с использованием численной модели.

Теплотехнический расчет, выполненный по СП 50.13330.2012, показал, что:

- сопротивления теплопередаче наружной стены $R_0 = 2,24$ (м²°C/Вт);

- плоскость конденсации располагается в зимний период в замкнутой воздушной прослойке.

Проектные значения сопротивления теплопередаче наружных стен и перекрытия соответствуют требованиям по тепловой защите при нормативной влажности строительных материалов.

Воздухопроницаемость стен выше нормативных значений, в объем теплого чердака поступает в 6 раз больше инфильтрационного воздуха, чем по нормативным требованиям, что составляет 5,6 % от нормативного объема удаляемого воздуха из квартир одной секции (нормативный воздухообмен 8250 м³/ч).

Численный расчет температурных полей конструкций (наружная стена, перекрытие) и узел сопряжения наружных стен и перекрытия выполнен в программном комплексе «STAR-CCM+» для условий отопительного периода. В процессе моделирования получено распределение температуры на поверхностях и в объеме конструкции. Расчет основан на решении уравнения теплопроводности

$$\rho A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, λ – теплопроводность

Граничные условия:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = q_w(x, y, z, t),$$

План секции, для которой проводился численный эксперимент, приведен на рисунке 6.

В отопительный период температура на внутренней поверхности стен была чердака выше точки росы, однако, имеют место локальные зоны пониженной температуры в наружных углах. В качестве примера на рисунке 7 приведено полученное при расчете температурное поле в перекрытии, а на рисунках 8–10 результаты расчета в формате 3 D температурных полей.

Расчет проводился для наиболее удаленного внешнего угла, расположенного в осях И-74 (рисунок 6). Температура наружного воздуха принята равной минус 24 °С. Температура внутреннего воздуха – +20 °С, температура точки росы +10,8 °С (при 55 %). Модель конструктивного элемента здания, для которого выполнен расчет в формате 3D, выполнена в программе Solidworks.

С целью определения зоны выпадения конденсата построена изоповерхность по температуре точки росы 10,8 °С (рисунок 9). Тепловые потоки через конструкцию приведены на рисунке 10.

Выполненные расчеты показали, что температура на внутренней поверхности наружных стен 1 и 2 отличаются на 2 °С (рисунок 8). Средняя температура поверхности стены 1 –13,14 °С. Средняя температура

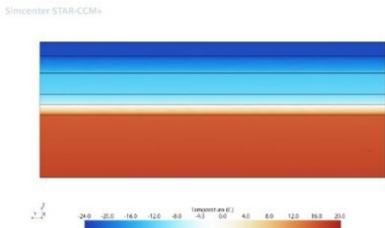


Рисунок 7 – Температурное поле в перекрытии

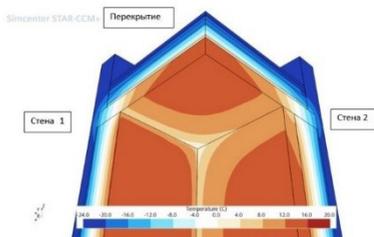


Рисунок 8 – Температурное поле в наружном угле в осях И-74

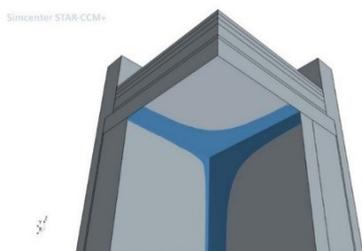


Рисунок 9 – Исоповерхность по температуре 10,8 °С по наружному углу в осях И-74

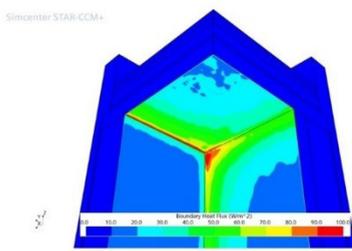


Рисунок 10 – Тепловые потоки в месте сопряжения конструкций

Толщина слоя резких колебаний температуры (приблизительно 9–10 см) располагается в кирпичной кладке. Различие теплофизических свойств пустотного кирпича и раствора приводит к возникновению тепло-влажностных деформаций, которые также способствуют разрушению пустотного кирпича с высоким значением влагосодержания.

3. Результаты исследования условий формирования тепловлажностного режима теплого чердака (влияние температуры воздуха, воздухопроницаемости ограждающих конструкций и климатических факторов) с использованием численной модели.

При расчетах рассматривается одна секция теплого чердака как отдельный объем, в который поступает воздух, удаляемый из 75 квартир. Воздух в пространство теплого чердака поступает из квартир через вентблоки по два вентблока на квартиру. По нормативным требованиям объем воздуха, который должен удаляться из квартир составляет 8250 м³/ч. Воздух удаляется через 6 вентканалов сечением 0,4×0,65 м. Скорость выхода воздуха из вентканалов согласно нормативным требованиям составляет 1,47 м/с. Из санузлов вытяжка 50 м³/ч и из кухни – 60 м³/ч. При расчетах был принят средний объем – 55 м³/ч. При расчетах скорость выхода воздуха варьировалась от 0,5 м/с до 1,5 м/с, что соответствовало эффективности работы вентиляции 34–100% по отношению к нормативным воздухообменам.

Над теплым чердаком устроена вытяжная шахта размерами 1,8×1,8 м и высотой 2,5 м над кровлей.

Инструментом исследования является гидродинамический вычислительный комплекс «STAR-CCM+», основанный на численном решении трехмерных дифференциальных уравнений сохранения.

Уравнение сохранения массы

$$\frac{d\rho}{dt} = \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0; \quad (2)$$

уравнение сохранения импульса

$$\frac{d\rho \vec{V}}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}} + \bar{\tau}_t) + \rho \vec{g}; \quad (3)$$

тензор вязких напряжений определен с помощью реологического закона Ньютона

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu (\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \bar{I}; \quad (4)$$

тензор турбулентных напряжений в соответствии с обобщенной гипотезой Буссинеска

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu_t (\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3} \mu_t \nabla \cdot \vec{V} \bar{I} - \frac{2}{3} \rho k \bar{I}; \quad (5)$$

уравнение сохранения энергии

$$\frac{d\rho E}{dt} + \nabla \cdot (\vec{V} [\rho E + p]) = \nabla \cdot (\vec{V} \cdot [\bar{\bar{\tau}} + \bar{\tau}_t] - \nabla \cdot (\vec{q} + \vec{q}_t)). \quad (6)$$

Для замыкания уравнения принята модель турбулентности k-ε.

Расчетная модель чердака приведена на рисунках 11, 12.

Для оценки влияния разных факторов на тепловлажностный режим помещения теплого чердака проводились отдельные серии расчетов.

1. Расчет полей скорости, температуры и влажности воздуха в объеме чердака для переходного периода года при фиксированных значениях температуры наружного воздуха 5 °С и влажности наружного воздуха 60 % для условий полной герметичности объема чердака.

2. Расчет полей скорости, температуры и влажности воздуха в объеме чердака для отопительного периода года (температура наружного воздуха минус 24 °С, влажность 60 %) для условий полной герметичности объема чердака.

3. Влияние скорости выхода удаляемого из квартир воздуха, которая изменялась в диапазоне 0,5–1,5 м/с при полной герметичности объема чердака.

4. Влияние расчетной воздухопроницаемости наружных конструкций (стен и окон), согласно проекту обследуемого здания.

5. Влияние скорости ветра на условия выхода воздуха из вентшахты.



Рисунок 11 – Модель теплого чердака, устроенного над одной секцией жилого здания

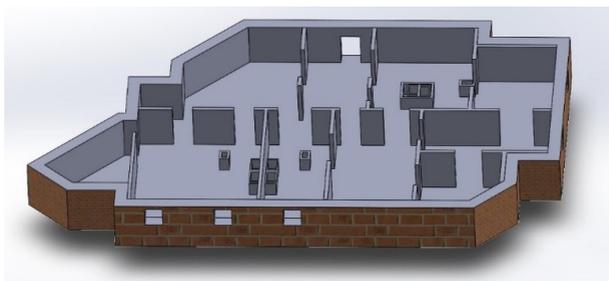


Рисунок 12 – Горизонтальное сечение модели чердака

На рисунке 13 приведен план секции теплого чердака, принятый при расчете, с указанием сечений, которые использованы для иллюстрации характеристик потока в объеме чердака.

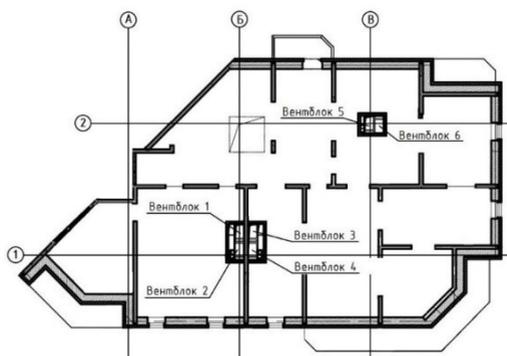


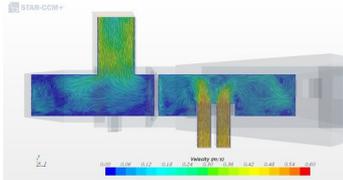
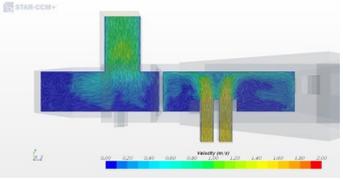
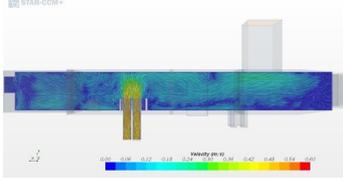
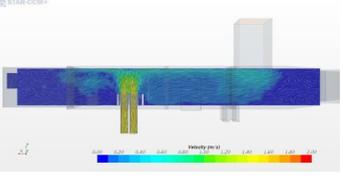
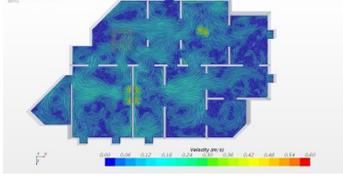
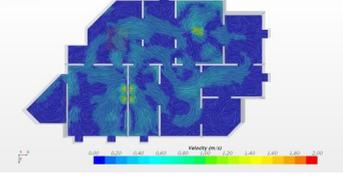
Рисунок 13 – План секции теплого чердака с указанием выбранных сечений для иллюстрации характеристик потока

Таблица 2 – Исходные данные для численных расчетов модели

| Раздел | Режимы для расчета модели | Скорость выхода воздуха из вентиляторов | Температура внутреннего воздуха | Температура наружного воздуха | Влажность внутреннего воздуха | Результаты расчета |
|-------------|--|---|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|
| 4.2.1–4.2.4 | Переходный период года (условие герметичности чердака) | 0,5 м/с | 20 | 5 °С | 60 % | Поля скорости, температуры и влажности воздуха |
| | | 1,0 м/с | | | | |
| | | 1,5 м/с | | | | |
| 4.3 | Отопительный период (условие герметичности чердака) | 0,5 м/с | 20 | –24 °С | 60 % | Поля скорости, температуры, влажности воздуха |
| | | 1,0 м/с | | | | |
| | | 1,5 м/с | | | | |
| 4.4.1–4.4.2 | Отопительный период. Расчетная воздухопроницаемость | 0,5 м/с | 20 | –24 °С | 60 % | Поля скорости |
| | | 1,0 м/с | | | | |
| | | 1,5 м/с | | | | |

Полученные в результате расчета поля скорости, которые формируются в объеме теплового чердака в переходный период при скорости выхода воздуха из вентканалов, (эффективность работы вентиляции 34 и 68 %) приведены в таблице 3.

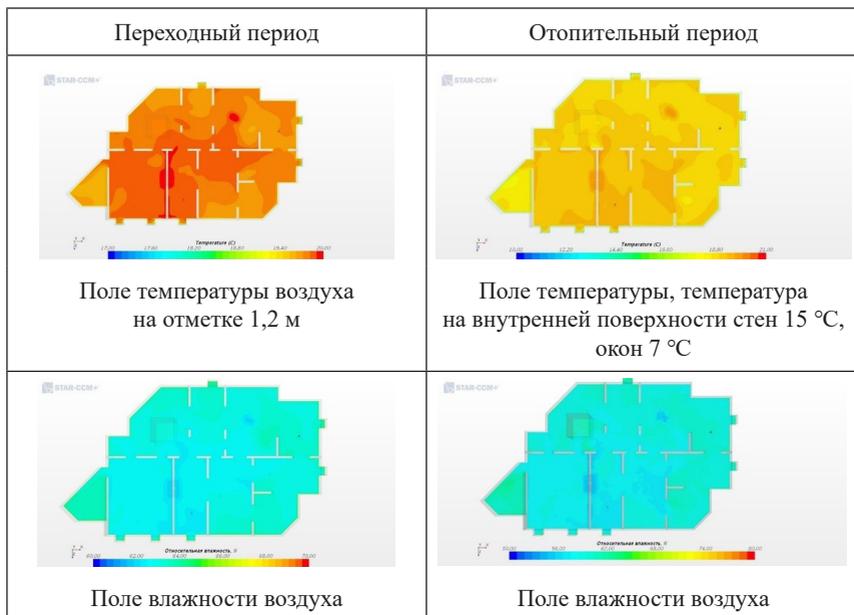
Таблица 3 – Результаты расчета численной модели для скоростей выхода воздуха из вентблоков $v = 0,5$ м/с и $v = 1$ м/с (переходный, полная герметичность чердака)

| | |
|--|--|
|  <p>Поля скорости воздуха в вертикальной плоскости при условии полной герметичности чердака, скорость выхода воздуха из вентблоков $v = 0,5$ м/с, сечение Б, вентблоки 1 и 2</p> |  <p>Поля скорости воздуха в вертикальной плоскости при условии полной герметичности чердака, скорость выхода воздуха из вентблоков $v = 1,5$ м/с, сечение Б, вентблоки 1 и 2</p> |
|  <p>Поля скорости воздуха в вертикальной плоскости при условии полной герметичности чердака, скорость выхода воздуха из вентблоков $v = 0,5$ м/с, сечение Б, вентблоки 6 и 5</p> |  <p>Поля скорости воздуха в вертикальной плоскости при условии полной герметичности чердака, скорость выхода воздуха из вентблоков $v = 1,5$ м/с, сечение Б, вентблоки 6 и 5</p> |
|  <p>Поле скорости воздуха при условии полной герметичности чердака, скорость выхода воздуха из вентблоков $v = 0,5$ м/с. Сечение на отметке 1,2 м</p> |  <p>Поле скорости воздуха при условии полной герметичности чердака, скорость выхода воздуха из вентблоков $v = 1,5$ м/с. Сечение на отметке 1,2 м</p> |

Характер распределения скорости движения воздуха в объеме теплого чердака при условии полной герметичности в целом сохраняется при скоростях выхода воздуха из вентиляционных каналов 0,5 м/с, 1,0 м/с и 1,5 м/с, что соответствует эффективности работы системы естественной вентиляции 34, 68 и 100 %. При скоростях выхода воздуха из вентиляционных каналов 1,5 м/с подвижность воздуха в объеме чердака повышается в 1,8 раза. В объеме теплого чердака выявлены застойные зоны, где подвижность воздуха 0,1 м/с, которые, в основном, локализованы вблизи наружных углов чердака. Для этих зон характерна более низкая температура и повышенная относительная влажность воздуха.

При расчете получены поля температуры и влажности воздуха в объеме теплого чердака для переходного и отопительного периодов при скоростях выхода воздуха из вентканалов $v = 0,5-1,5$ м/с. Как пример, в таблице 4 дано сравнение распределения параметров микроклимата для переходного и отопительного периодов при скорости выхода воздуха из вентканалов $v = 1$ м/с (эффективность работы вентиляции 68%, полная герметичность чердака).

Таблица 4 – Результаты расчета полей температуры и влажности на численной модели для переходного и отопительного периодов при условии полной герметичности чердака, скорость выхода воздуха из вентблоков $v = 1$ м/с, горизонтальное сечение на отметке 1,2 м



Анализ полей температуры в объеме чердака для переходного и отопительного периодов показал, что средняя температура воздуха в пространстве чердака составила 15-20 °С. Влажность воздуха – 62–65%. Планировку чердачного пространства для исследуемого здания нельзя признать удачной, т.к. имеется большое количество перегородок, которые препятствуют свободному распространению вентиляционных выбросов из вентканалов и равномерному распределению их по объему чердака.

При условии полной герметичности чердака скорости выхода в атмосферу через общую вентиляционную шахту приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Скорости выхода воздуха из вентиляционной шахты в атмосферу

| Скорость выхода, м/с | | Объем удаляемого из квартир воздуха, м ³ /ч | Эффективность вентиляции, % |
|----------------------|----------|--|-----------------------------|
| из вентканала | из шахты | | |
| 0,5 | 0,24 | 2808 | 34 |
| 1 | 0,48 | 5616 | 68 |
| 1,5 | 0,72 | 8424 | 100 |

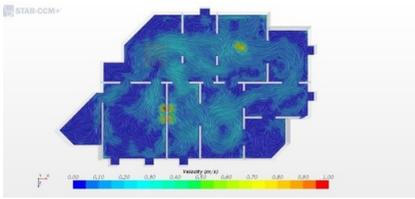
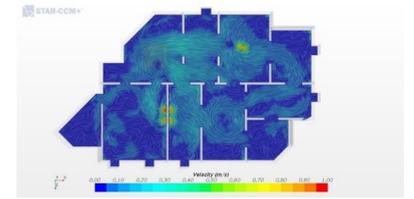
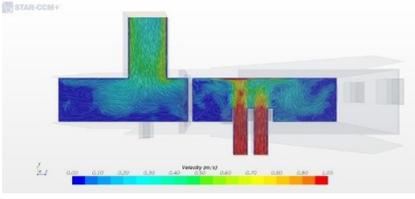
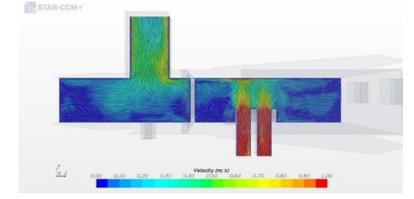
Результаты расчета численной модели с учетом расчетной величины воздухопроницаемости приведены в таблице 6. Так как воздухопроницаемость наружных стен не соответствует нормативным требованиям, то в помещение теплого чердака поступает в 6 раз больший объем инфильтрационного воздуха. Это, в свою очередь, увеличивает теплопотери здания и снижает эффективность работы системы вентиляции.

Количество воздуха, поступающее в пространство теплого чердака через стены и окна 478 м³/ч, что составляет 5,8 % от общего объема удаляемого воздуха из квартир.

Влияние воздухопроницаемости наружных конструкций на теплолажностные характеристики в объеме теплого чердака зависит от объемов воздуха, удаляемого из квартир. Увеличиваются площади застойных зон в наружных углах.

Снижаются скорости в факеле выхода струи из вентканалов, что приводит к более неравномерному распределению параметров микроклимата. Объем инфильтрационного воздуха по выполненным расчетам (464 м³/ч), поступающий в пространство теплого чердака, снижает эффективность работы системы естественной вентиляции на 5–8 %. Увеличение объемов инфильтрационного воздуха (открытые окна и др.) приведет к большему снижению эффективности вентиляции.

Таблица 6 – Сравнение результатов расчета численной модели для условий полной герметичности чердака и расчетной воздухопроницаемости

| Условие полной герметичности | Условие расчетной воздухопроницаемости |
|---|--|
|  <p data-bbox="240 526 492 614">Поле скорости. План на уровне 1,2 м от пола теплого чердака</p> |  <p data-bbox="666 526 918 614">Поле скорости. План на уровне 1,2 м от пола теплого чердака</p> |
|  <p data-bbox="196 869 532 1133">Поле скорости. Сечение вдоль оси Б, условие герметичности чердака. Скорость выхода воздуха из вентблоков $v = 1$ м/с, скорость выхода воздуха из шахты $V = 0,48$ м/с. Объем удаляемого воздуха из вентблоков – 5616 м³/ч</p> |  <p data-bbox="604 869 980 1189">Поле скорости. Сечение по оси Б, условия расчетной воздухопроницаемости. Скорость выхода воздуха из вентблоков $v = 0,94$ м/с, скорость выхода воздуха из шахты – $V = 0,50$ м/с. Объем воздуха через окна 22 м³/ч, через – стены 456 м³/ч. Объем воздуха удаляемого из вентблоков – 5323 м³/ч</p> |

В таблице 7 приведено выборочное сравнение экспериментальных и расчетных значений температуры и влажности воздуха для отопительного периода. Расчетные значения соответствуют температуре внутреннего воздуха $+22$ °С и влажности 50 %. Данные мониторинга соответствуют фиксированным в натуральных условиях значениям с 15 по 24 марта.

Таблица 7 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений температуры и влажности воздуха для отопительного периода сравнения принят период (15–24 марта)

| № значения | Температура у вентблока № 3, °С | | Влажность у вентблока № 3, % | |
|------------------|------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|
| | Эксперимент | Расчет | Эксперимент | Расчет |
| 1 | 21,5 | 20,0 | 42 | 48,5 |
| 2 | 21,5 | 22,7 | 41 | 45 |
| 3 | 22,0 | 22,1 | 47 | 46 |
| 4 | 22,0 | 20,5 | 48 | 49 |
| 5 | 21,5 | 22,6 | 48 | 48,5 |
| 6 | 22,0 | 22,2 | 45 | 41,5 |
| 7 | 21,5 | 21,5 | 41 | 42 |
| 8 | 22,0 | 22,8 | 47 | 35,2 |
| 9 | 21,5 | 20,6 | 44 | 50 |
| 10 | 22,0 | 20,5 | 44 | 45,5 |
| Среднее значение | 21,8 | 21,6 | 44,7 | 48,5 |

4. Рекомендации для проектирования теплых чердаков систем естественной вентиляции многоэтажных жилых зданий, разработанные по результатам исследования.

Для устранения выявленных дефектов ограждающих конструкций теплового чердака рекомендуется:

- обеспечить нормативные требования по воздухопроницаемости наружных стен за счет оштукатуривания внутренней поверхности стен цементно-песчаным раствором;

- для сокращения инфильтрационных теплопотерь рекомендуется установка стеклоблоков или оконных блоков, обеспечив их геометичность;

- при условии нормативного влагосодержания строительных материалов наружных стен (газобетона и кирпича) рекомендуется пропитка внутренней поверхности стен гидрофобизатором или окрасу масляной краской с целью предотвращения проникновения влаги в газобетонные блоки;

- для более равномерного распределения параметров микроклимата по объему теплового чердака рекомендуется минимально возможное количество перегородок.

5. Методика комплексного натурального обследования и организация мониторинга тепловлажностного режима в теплом чердаке многоэтажного жилого дома.

Методика комплексного натурального обследования разработана с учетом результатов натурального обследования ряда высотных многоквартирных жилых домов с естественной вентиляцией и теплым чердаком. Рекомендации по определению параметров микроклимата в объеме теплого чердака и места расположения датчиков мониторинга тепловлажностных характеристик предложены на основании численного моделирования и анализа полученных результатов.

Методика устанавливает порядок организации обследования состояния ограждающих конструкций и мониторинга тепловлажностного режима теплых чердаков в течение всего периода эксплуатации.

Перечень работ по натурному обследованию включает:

- визуальные осмотры состояния ограждающих конструкций, определение наличия дефектов конструкций и узлов примыкания стен и кровли;
- инструментальное обследование температуры внутренних поверхностей и перекрытий теплого чердака, влагосодержания строительных материалов внутреннего слоя наружных стен и перекрытий; при проведении инструментального контроля рекомендуется использовать метод тепловизионного обследования.

Для утепленных конструкций подвергаются контролю следующие теплофизические характеристики утеплителя:

- влагосодержание;
- коэффициент теплопроводности;
- плотность.

Методика включает порядок обследования тепловлажностного режима помещений теплых чердаков с контролем температуры и влажности внутреннего воздуха, температуры на поверхностях оконных блоков, наружных стен и перекрытий, а также скорости выхода воздуха из вентканалов и движения (подвижности) воздуха в объеме теплого чердака.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Выполнен анализ проблем, связанных с работой систем вентиляции с теплым чердаком, который выявил следующие характерные дефекты, снижающие эффективность ее работы.

2. Собран большой объем натуральных наблюдений, результаты которого показали, что температура и влажность воздуха в помещении теплого чердака не соответствуют требуемым величинам; не обеспечивается нормативная кратность воздухообмена жилых помещений; не обеспечивается герметичность чердачного пространства; расчет систем вентиляции

не учитывает пространственное распределение параметров микроклимата по объему открытого чердака; ограждающие конструкции теплых чердаков эксплуатируются в условиях повышенного влагосодержания воздуха, что снижает их долговечность; наличие перегородок в помещении теплого чердака препятствует свободному распределению воздуха по всему объему чердака и приводит к образованию застойных зон с повышенной влажностью.

3. Получены результаты исследования материалов ограждающих конструкций.

4. Проведен расчет теплотехнических характеристик конструкций, который показал, что:

- теплозащитные свойства наружных ограждающих конструкций соответствуют нормативным требованиям;

- воздухопроницаемость стен выше нормативных значений в 6 раз;

- в отопительный период температура на внутренней поверхности стен чердака выше точки росы, однако, имеют место локальные зоны пониженной температуры в местах соединения конструкций, что подтвердил численный расчет температурных полей;

- деструкция наружных стен теплых чердаков происходит вследствие того, что эксплуатационная влажность материалов наружных стены выше нормируемых значений в связи с резкими колебаниями температуры и влажности воздуха в помещении чердака в переходный период года, а также увлажнения газобетонных блоков, которое происходит вследствие сорбции и диффузии водяных паров в холодный период года, а также увлажнения атмосферной влагой.

5. Разработаны рекомендации для устранения дефектов ограждающих конструкций теплого чердака и обеспечения нормативных требований по воздухопроницаемости наружных стен.

6. Разработаны численные модели для исследования условий формирования тепловлажностного режима теплого чердака. Проанализированы результаты расчета полей скорости, температуры и относительной влажности воздуха.

7. По результатам расчета температурных полей в ограждающих конструкциях в формате 3D для отопительного периода показано, что в местах стыков наружных стен наблюдается пониженная температура ниже точки росы, средняя температура воздуха в пространстве чердака составила 15–20 °С.

8. Определено, что планировка теплого чердака также оказывает влияние на распределение тепловлажностных параметров. Выявлено наличие нескольких застойных зон, связанное с большим количеством перегородок.

9. Разработана методика комплексного натурного обследования и организации мониторинга тепловлажностного режима в теплом чердаке

многоэтажного жилого дома для оценки их влияния на ограждающие конструкции. Рекомендации по определению параметров микроклимата в объеме теплого чердака и места расположения датчиков мониторинга тепловлажностных характеристик предложены на основании численного моделирования и анализа полученных результатов.

10. Установленные в МЖД герметичные оконные блоки не обеспечивают нормативы по объемам приточного воздуха. Соответственно количество удаляемого из квартир воздуха с температурой 20–25 °С при эффективности вентиляции менее 34 % (скорости выхода из вентканалов $v = 0,5$ м/с) с учетом компенсации теплопотерь через наружные конструкции может не обеспечить для чердака рекомендуемые параметры микроклимата. Это, в свою очередь, приведет к неблагоприятным условиям для эксплуатации ограждающих конструкций.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИСЛЕДОВАНИЯ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Аншукова, Е.А., Дацюк Т.А. Влияние тепловлажностного режима теплых чердаков на состояние ограждающих конструкций / Е.А. Аншукова, Т.А. Дацюк // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 5(76). – С. 160–165 (0,38 п.л.).

2. Дацюк, Т.А., Аншукова, Е.А., Гримитлин, А.М. Оценка показателей энергоэффективности зданий /Т.А. Дацюк, Е.А. Аншукова, А.М. Гримитлин // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 5(70). – С. 141–145 (0,31 п.л.).

3. Аншукова, Е.А. Определение скоростей истечения воздуха из вентшахты теплого чердака многоэтажного жилого здания при разных начальных условиях / Е.А. Аншукова // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 5(88). (0,38 п.л.).

Публикации в других изданиях

4. Дацюк, Т.А., Аншукова, Е.А. Оценка энергетической эффективности здания на стадии проектирования / Т. А. Дацюк, Е.А. Аншукова, // Актуальные проблемы строительства: материалы 71-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов, СПбГАСУ. – 2018. – С. 105–108 (0,25 п.л.).

5. Аншукова, Е.А., Дацюк, Т.А. Проблемы эксплуатации зданий с теплым чердаком / Е.А. Аншукова, Т. А. Дацюк // 18-ая Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная столетию МИСИ-МГСУ

«Теоретические основы теплогаснабжения и вентиляции», 2020, С. 10–13 (0,25 п.л.).

6. Datciuk, T.A., Anshukova, E.A., Taurit, V.R. Natural ventilation in multi-storey residential buildings with warm attics / T.A. Datciuk, E.A Anshukova, V.R. Taurit // Actual problems of renewable power engineering, construction and environmental engineering, V International Scientific-Technical Conference, Poland, Warsaw, 3–5 June 2021, P. 135–139 (0,25 п.л.)

7. Дацюк, Т.А., Аншукова, Е.А. Энергосбережение и экологическая безопасность зданий при проектировании / Т.А. Дацюк, Е.А. Аншукова // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air quality and environment. Материалы XVIII Международной научной конференции. Волгоградский государственный медицинский университет Волгоград, 2020, С. 268–273 (0,38 п.л.).

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 11.10.2021. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 97.

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

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

