

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 692.23:697.12:697.137

КРУТИЛИН
Антон Борисович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО
РАСЧЕТА И КОНСТРУКЦИЙ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДНЫХ
СИСТЕМ ЗДАНИЙ СО СПЛОШНЫМИ ЭКРАНАМИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Минск, 2022

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель **ПРОТАСЕВИЧ Анатолий Михайлович**,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **ДАНИЛЕВСКИЙ Леонид Николаевич**,
доктор технических наук, доцент, главный
научный сотрудник Государственного пред-
приятия «Институт жилища – НИПТИС
им. Атаева С. С.»;

НОВОСЕЛЬЦЕВ Владимир Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент, заведу-
ющий кафедрой «Теплогазоснабжение и вен-
тиляция» Брестского государственного тех-
нического университета

Оппонирующая Учреждение образования «Полоцкий госу-
организация дарственный университет»

Защита состоится «18» марта 2022 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.10 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202; тел. ученого секретаря (+375 17) 292-76-22.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «__» февраля 2022 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций Д 02.05.10,
доктор технических наук, профессор



П. И. Дячек

© Крутилин А. Б., 2022
© Белорусский национальный
технический университет, 2022

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей современной строительной отрасли в Республике Беларусь является уменьшение потребления энергии на эксплуатацию зданий и сооружений различного назначения. Одним из основных направлений решения указанной задачи является снижение расхода теплоты на поддержание микроклимата в помещениях, в том числе и за счет уменьшения потерь теплоты через наружные стены зданий.

Снижение теплопотерь и повышение уровня теплозащиты наружных стен зданий возможно устройством систем утепления с применением эффективных теплоизоляционных материалов. При выполнении утепления стен зданий с наружной стороны теплоизоляционные материалы укрываются либо штукатурными слоями (штукатурные системы утепления), либо защитными экранами на отnose, т. н. вентилируемыми фасадными системами (ВФС) утепления.

Результаты обследований показали, что штукатурные системы теплоизоляции многих зданий на территории Республики Беларусь уже после 10-ти лет эксплуатации требуют ремонта штукатурного слоя и последующей окраски фасадов. По данным немецких исследователей, основанных на натуральных обследованиях, межремонтный срок эксплуатации данных систем теплоизоляции составляет в среднем 20 лет. При обследовании состояния наружных стен зданий с вентилируемыми системами утепления по истечению 10-ти и более лет значительных повреждений не выявлено.

Развитие строительства высотных зданий, ужесточение требований к архитектурному облику городов диктует более широкое использование ВФС утепления наружных стен. Сдерживающими факторами являются: более высокая стоимость в сравнении с легкими штукатурными системами утепления, недостатки методик аэродинамического расчета воздушных вентилируемых прослоек, необходимость специальных конструктивных решений по уменьшению влияния теплопроводных включений, а также защите слоя теплоизоляции от фильтрации воздуха.

В связи с вышеизложенным на сегодняшний день актуальной задачей исследований является усовершенствование метода теплотехнического расчета наружных стен с ВФС утепления, а также их конструктивных решений с целью снижения материалоемкости и увеличения уровня теплозащиты, что будет способствовать массовому использованию данных конструкций при новом строительстве, а также при ремонте, модернизации и реконструкции зданий в Республике Беларусь.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема работы соответствует программам «Энергетика и энергоэффективность, атомная энергетика: энергобезопасность и энергосбережение» (пункт 1) и «Промышленные и строительные технологии и производство: перспективные строительные технологии, конструкции, материалы» (пункт 3) приоритетных направлений научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь № 166 от 22.04.2015 г.

Результаты работы использованы в РУП «Институт БелНИИС» в рамках исследований по теме «Произвести мониторинг эксплуатируемых жилых зданий с поэтажно опертыми стенами из ячеистого бетона и разработать корректирующие мероприятия по дальнейшему совершенствованию конструктивных решений ограждающих конструкций» (№ 20122910 государственной регистрации), а также при разработке рекомендаций по проектированию поэтажно опертых стен и перегородок из эффективных мелкоштучных стеновых материалов (изменение № 1 Р 5.02.088.11, № 088/01 от 10.01.2013 г. реестра учетной регистрации), выполненных по заданию Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь.

Цель и задачи исследования

Цель работы – повышение теплозащиты, снижение материалоемкости и усовершенствование метода расчета температурно-влажностного режима наружных стен с вентилируемыми фасадными системами утепления.

Задачи исследования:

- выполнить экспериментальные исследования аэродинамического режима воздушных вентилируемых прослоек (ВВП) и температурно-влажностного режима наружных стен эксплуатируемых зданий с вентилируемыми фасадными системами утепления;
- разработать физико-математическую модель температурно-влажностного режима наружных стен с ВФС утепления и алгоритм ее численного решения;
- провести численные исследования влияния геометрических размеров ВВП на их аэродинамический режим, а также температурно-влажностного режима современных конструкций наружных стен зданий с вентилируемыми фасадными системами утепления;
- разработать конструктивные решения ВФС утепления для уменьшения негативного влияния теплопроводных включений и обеспечения нормативного уровня теплозащиты;
- разработать инженерную методику аэродинамического расчета ВВП вентилируемых фасадных систем утепления со сплошными экранами.

Научная новизна работы:

1. Получены новые экспериментальные данные по температурно-влажностному режиму наружных стен зданий с ВФС утепления, эксплуатируемых в умеренных климатических условиях. Установлены расчетные аэродинамические режимы воздушных вентилируемых прослоек и условия влагопереноса через наружные стены с ВФС утепления.

2. Разработана физико-математическая модель температурно-влажностного режима наружных стен с ВФС утепления для нестационарных условий, отличающаяся от известных учетом условий тепло- и влагообмена поверхностей воздушной вентилируемой прослойки с воздухом в зависимости от температуры наружного и внутреннего воздуха и скорости движения воздуха в прослойке.

3. Проведены численные исследования влажностного режима и получены новые данные по распределению массовой влажности по толщине наружных стен с ВФС утепления, получивших распространение в Республике Беларусь. Накопления влаги в толще стен не установлено, а полученные средние значения влажности материалов не превышают нормативных величин.

4. Исследованы конструктивные решения по повышению уровня теплозащиты наружных стен с ВФС утепления с использованием кронштейнов из нержавеющей аустенитной стали и установкой паронитовых прокладок за их пяткой. Получены новые данные по коэффициентам теплотехнической однородности наружных стен с ВФС утепления с использованием предлагаемых решений, что позволяет обеспечить снижение материалоемкости систем.

5. Разработана инженерная методика аэродинамического расчета воздушных вентилируемых прослоек, отличающаяся от известных методик определением допустимой относительной влажности воздуха в прослойке, при которой не будет конденсации водяного пара на внутренней поверхности защитного экрана.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новые результаты экспериментальных исследований температурно-влажностного режима наружных стен, а также аэродинамического режима воздушных вентилируемых прослоек эксплуатируемых зданий с конструкциями вентилируемых фасадных систем утепления получившими распространение в Республике Беларусь.

2. Физико-математическая модель температурно-влажностного режима наружных стен с вентилируемыми фасадными системами утепления и алгоритм ее численного решения с доказательством адекватности модели объекту исследований.

3. Совокупность результатов численных исследований теплозащитных характеристик наружных стен с вентилируемыми фасадными системами утепления, включая исследования влажностного режима наружных стен, позволившие выбрать конструктивные решения и обеспечивающие при принятом уровне теплозащиты стен снижение материалоемкости систем.

4. Инженерная методика аэродинамического расчета воздушных вентилируемых прослоек наружных стен с вентилируемыми фасадными системами утепления.

Личный вклад соискателя

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете под руководством кандидата технических наук, доцента А. М. Протасевича.

Личный вклад соискателя заключается в анализе научной литературы, проведении экспериментальных исследований, обработке данных, разработке физико-математической модели и алгоритма ее численного решения, разработке методики аэродинамического расчета воздушных вентилируемых прослоек, обобщении результатов исследований, подготовке научных публикаций.

Экспериментальные исследования проведены совместно с сотрудниками Научно-исследовательской и испытательной лаборатории строительной теплофизики и инженерных систем зданий Белорусского национального технического университета Л. С. Калининой, Д. Д. Якимовичем, В. В. Лешкевичем.

Диссертационная работа представляет собой самостоятельный труд соискателя. Научный руководитель осуществлял руководство, организовывал выполнение экспериментальных исследований на эксплуатируемых зданиях, определял направления исследований и оценку полученных результатов работы.

Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на научных конференциях и семинарах:

– Международная научно-техническая конференция «Современные фасадные системы: эффективность и долговечность», Москва, 21 ноября 2008 г.;

– VIII Международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономика», Минск, 2010 г.;

– VI Международная научно-практическая конференция «Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения», Минск, 26–28 мая 2010 г.;

– 2-я практическая конференция «Современный фасад в Республике Беларусь», Минск, 20–21 мая 2010 г.;

– 4-я международная практическая конференция «Окна и фасады 2011», Минск, 3 марта 2011 г.;

– научно-практическая конференция «Современное производство автоклавного газобетона», Санкт-Петербург, 16–18 ноября 2011 г.;

– 3-rd International Conference «ADVANCED CONSTRUCTION», Kaunas, 18–19 October 2012 г.

Опубликование результатов диссертации

– пять статей в научных изданиях, соответствующих перечню ВАК Республики Беларусь (2,87 печатных листов);

– пять статей в научных изданиях, соответствующих перечню ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (2,25 печатных листов);

– семь публикаций в сборниках материалов и тезисов по результатам научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертации составляет 160 страниц. Основная часть содержит 48 рисунков и 21 таблицу. Список использованных литературных источников имеет 189 позиций.

Структурно-логическая схема работы представлена на рисунке 1.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературы по теме диссертации и определены задачи исследований.

Во второй главе приведены результаты и анализ экспериментальных исследований температурно-влажностного и аэродинамического режимов воздушных вентилируемых прослоек наружных стен зданий с ВФС утепления.

В третьей главе представлена физико-математическая модель температурно-влажностного режима в наружных стенах с ВФС, а также алгоритм ее численного решения.

В четвертой главе приводятся результаты численных исследований температурно-влажностного режима наружных стен с ВФС утепления, распространенных на территории Республики Беларусь. Определены коэффициенты теплотехнической однородности четырех типов наружных стен с ВФС утепления с использованием предложенных конструктивных решений по повышению их уровня теплозащиты. Приведена разработанная инженерная методика аэродинамического расчета вентилируемых воздушных прослоек ВФС утепления со сплошными экранами.

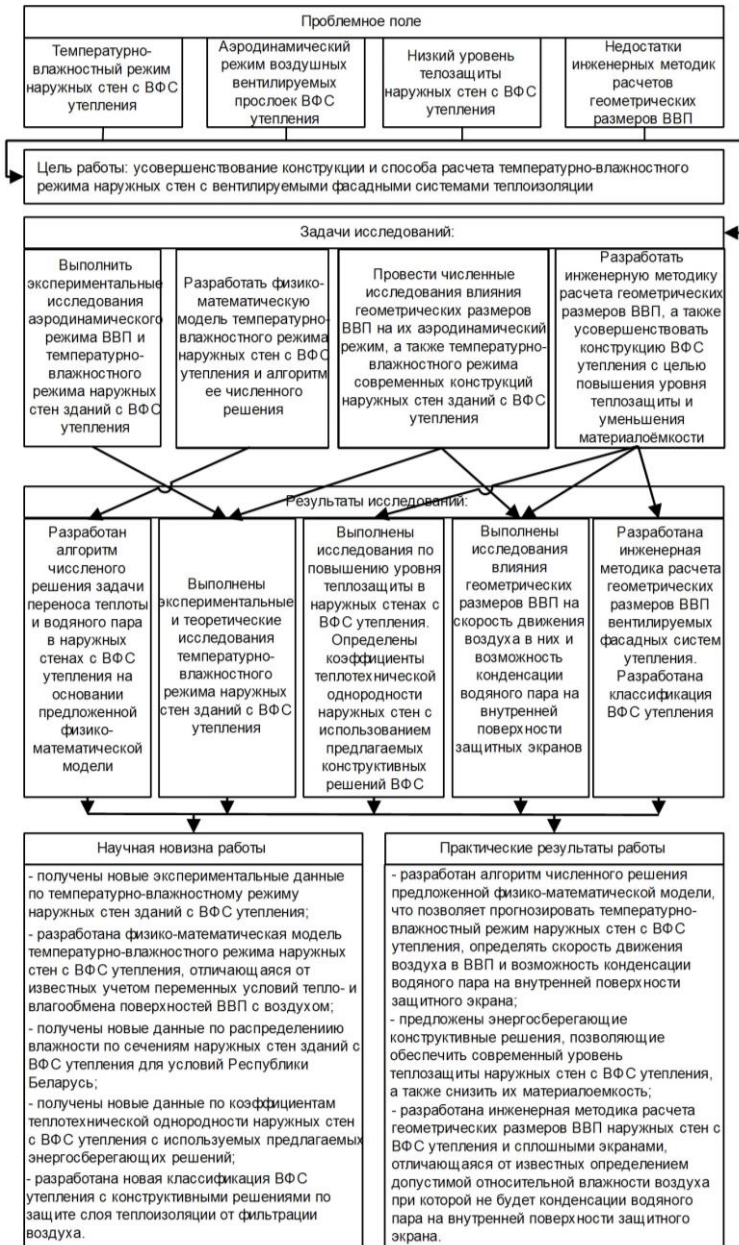


Рисунок 1. – Структурно-логическая схема работы

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** диссертации выполнен обзор литературных источников, конструктивных решений и методов теплотехнического и аэродинамического расчета наружных стен с ВФС утепления. Рассмотрены работы, К. Ф. Фокина, В. Н. Богословского, А. Ф. Хомутова, А. В. Лыкова, В. И. Лукьянова, В. Г. Гагарина, Н. П. Умняковой, В. В. Козлова, В. А. Езерского, В. С. Беляева, С. В. Корниенко, Л. Н. Данилевского (СССР, Россия и Республика Беларусь); J. Straube, E. Burnett, H. Hens, A. Endriukaityte (Канада и страны Евросоюза).

По результатам анализа литературных источников выявлены недостатки существующих методов расчета температурно-влажностного и аэродинамического режимов воздушных вентилируемых прослоек наружных стен с ВФС утепления. В них имеются противоречия по величинам коэффициентов теплотехнической однородности, учитывающих влияние кронштейнов крепления защитных экранов, а также по величинам скорости движения воздуха в ВВП. Приводимые в литературе рекомендации по увеличению уровня теплозащиты наружных стен с ВФС утепления немногочисленны и требуют проверки.

По результатам анализа конструктивных решений наружных стен ВФС утепления и методов их теплотехнического расчета сформулированы задачи исследований в диссертационной работе.

Во **второй главе** диссертации представлены результаты экспериментальных исследований температурно-влажностного режима наружных стен с ВФС утепления и аэродинамического режима воздушных вентилируемых прослоек семи эксплуатируемых зданий. Определены аэродинамические режимы ВВП, массовые влажности материалов стен, а также величины сопротивления теплопередаче наружных стен с ВФС утепления. Полученные результаты использованы при разработке модели температурно-влажностного режима наружных стен с ВФС утепления.

Исследованиями установлено, что при отсутствии ветрового воздействия на здания, скорости движения воздуха в прослойках не превышали 0,22 м/с. Полученные значения значительно ниже величин, приведенных в литературных источниках. Неблагоприятным режимом эксплуатации ВВП для условий удаления водяного пара следует считать движение воздуха в них за счет естественной конвекции при отсутствии ветрового воздействия на здания.

Исследованиями установлено, что влажности материалов стен зданий после устройства на них ВФС утепления снижаются. Их значения не превышали показателей равновесной сорбционной влажности материалов при относительной влажности воздуха 75 %.

Экспериментальные исследования показали, что сопротивление теплопередаче наружных стен с ВФС утепления на зданиях после тепловой модернизации близки к значениям их сопротивления теплопередаче, рассчитанным без влияния теплопроводных включений. Это обусловлено низкой влажностью материалов наружных стен, за счет чего нивелируется снижение уровня теплозащиты за счет влияния теплопроводных включений. На трех объектах нового строительства значения сопротивления теплопередаче наружных стен получены близкими к расчетным, определенным с учетом влияния теплопроводных включений. На одном объекте сопротивление теплопередаче наружной стены с ВФС утепления получено значительно ниже расчетной величины вследствие поступления воздуха в зазоры и щели в местах стыков плит теплоизоляции из-за их некачественного монтажа. Наличие продольной фильтрации воздуха в условиях проведения экспериментальных исследований на всех объектах выявлено не было.

В **третьей главе** диссертации представлена физико-математическая модель температурно-влажностного режима наружных стен с ВФС утепления, а также алгоритм ее численного решения.

Перенос теплоты и водяного пара в пределах от внутренней поверхности наружной стены до поверхности слоя, обращенного в воздушную вентилируемую прослойку, принят для нестационарных условий. Движение воздуха в ВВП на основании результатов экспериментальных исследований предложено для условий естественной конвекции.

Рассматриваемые уравнения имеют вид:

$$c_T \cdot \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, \tau) \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\zeta \cdot \rho}{E} \cdot \frac{\partial e}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{3600} \mu(x, \tau) \frac{\partial e}{\partial x} \right), \quad (2)$$

с граничными условиями III-рода на внутренней поверхности стены и поверхности стены, обращенной в воздушную вентилируемую прослойку:

$$\alpha_B (t_B(\tau) - t_1(\tau)) = \lambda \frac{\partial t}{\partial x_{x=0}}, \quad (3)$$

$$\overline{\alpha_{T.П.}} (t_n(\tau) - t_{B.П.}^{CP}(\tau)) = \lambda \frac{\partial t}{\partial x_{x=n}}, \quad (4)$$

$$\beta_B (e_B(\tau) - e_1(\tau)) = \mu \frac{\partial e}{\partial x_{x=0}}, \quad (5)$$

$$\overline{\beta_{B.П.}} (e_n(\tau) - e_{B.П.}^{CP}(\tau)) = \mu \frac{\partial e}{\partial x_{x=n}}, \quad (6)$$

где x – координата, по направлению потока водяного пара, от внутренней поверхности к поверхности ограждающей конструкции обращенной в воздушную вентилируемую прослойку, м;

c_T – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°C);

ρ – плотность материала, кг/м³;

t – температура материала, °C;

τ – время, с;

$\lambda(x, \tau)$ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°C);

e – парциальное давление водяного пара в порах материала, Па;

E – максимальное парциальное давление водяного пара в порах материала при данной температуре воздуха, Па;

$\mu(x, \tau)$ – коэффициент паропроницаемости материала, мг/(м·ч·Па);

ζ – относительная пароемкость материала, мг/кг;

n – положение координаты x в направлении потока водяного пара, совпадающей с поверхностью наружной стены, обращенной в ВВП;

α_B – коэффициент теплообмена внутренней поверхности наружной стены, Вт/(м²·°C);

$t_B(\tau)$ – температура внутреннего воздуха, °C;

$t_I(\tau)$ – температура на внутренней поверхности стены, °C;

$\overline{\alpha_{T.П.}}$ – средний по высоте ВВП коэффициент теплообмена поверхности материала, обращенного в прослойку, Вт/(м²·°C);

$t_n(\tau)$ – температура на поверхности стены обращенной к воздуху воздушной вентилируемой прослойки, °C;

$t_{B.П.}^{CP}(\tau)$ – средняя по высоте ВВП температура воздуха в прослойке, °C;

β_B – коэффициент массообмена внутренней поверхности стены с внутренним воздухом в помещении, мг/(м²·ч·Па);

$e_B(\tau)$ – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па;

$e_I(\tau)$ – парциальное давление водяного пара на внутренней поверхности стены, Па;

$\overline{\beta_{B.П.}}$ – средний по высоте ВВП коэффициент массообмена поверхности материала стены, обращенной в прослойку, с воздухом в прослойке, мг/(м²·ч·Па);

$e_n(\tau)$ – парциальное давление водяного пара на поверхности стены, обращенной к воздуху ВВП, Па;

$e_{B.П.}^{CP}(\tau)$ – среднее по высоте воздушной вентилируемой прослойки парциальное давление водяного пара, Па.

Уравнения (1–6) дополнены уравнениями баланса переноса теплоты и водяного пара в ВВП:

$$0,28 \cdot c_B \cdot \rho_{B.П.}^{CP} \cdot Ldt = b \cdot \overline{\alpha_{T.П.}^K} (t_n - t_{B.П.}) dh - b \cdot \overline{\alpha_{X.П.}^K} (t_{B.П.} - t_{ЭК}) dh, \quad (7)$$

$$\rho_{B.П.}^{CP} \cdot LdD = b \cdot \overline{\beta_{B.П.}} (e_n - e_{B.П.}) dh, \quad (8)$$

где c_B – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C);

$\rho_{B.П.}^{CP}$ – средняя по высоте ВВП плотность воздуха в прослойке, кг/м³;

L – расход воздуха, проходящего через ВВП, м³/ч;

b – ширина ВВП, м;

$\overline{\alpha_{T.П.}^K}$ – средний по высоте ВВП коэффициент конвективного теплообмена на поверхности материала, обращенного в прослойку, Вт/(м²·°C);

$\overline{\alpha_{X.П.}^K}$ – средний по высоте ВВП коэффициент конвективного теплообмена поверхности защитного экрана, обращенного в прослойку, Вт/(м²·°C);

$t_{B.П.}$ – температура воздуха в ВВП на расстоянии от входного отверстия (в месте расположения рассматриваемого сечения), °C;

$t_{ЭК}$ – температура на внутренней поверхности защитного экрана, °C;

h – высота ВВП, м;

D – влагосодержание воздуха, мг/кг с.в.;

$e_{B.П.}$ – парциальное давление водяного пара на расстоянии от входного отверстия (в месте расположения рассматриваемого сечения), Па.

Численное решение уравнений (1–6) выполнено на основании метода конечных разностей по неявной схеме. Решением уравнения (7) получены зависимости температуры воздуха на выходе из ВВП (9) и средней температуры воздуха по высоте ВВП (10):

$$t_{B.П.}^h = t_h - (t_h - t_H) \cdot \exp\left(-\frac{h \cdot b \cdot (\overline{\alpha_{T.П.}^K} + \overline{\alpha_{X.П.}^K})}{0,28 \cdot c_B \cdot \rho_{B.П.}^{CP} \cdot L}\right), \quad (9)$$

$$t_{B.П.}^{CP} = t_h - \frac{(t_h - t_H) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h \cdot b \cdot (\overline{\alpha_{T.П.}^K} + \overline{\alpha_{X.П.}^K})}{0,28 \cdot c_B \cdot \rho_{B.П.}^{CP} \cdot L}\right)\right]}{h \cdot \frac{b \cdot (\overline{\alpha_{T.П.}^K} + \overline{\alpha_{X.П.}^K})}{0,28 \cdot c_B \cdot \rho_{B.П.}^{CP} \cdot L}}, \quad (10)$$

где $t_h = \frac{t_B \cdot R_{НАР} + t_H \cdot R_{ВН}}{R_{НАР} + R_{ВН}}$, °C;

$t_{B.П.}^h$, t_H , t_B – температуры, соответственно, воздуха на выходе из ВВП, наружного и внутреннего воздуха, °C;

$R_{НАР}$, $R_{ВН}$ – условные сопротивления теплопередачи наружной и внутренней частей наружной стены с ВФС, м²·°C/Вт.

Решением уравнения (8) определены парциальное давление водяного пара на выходе из ВВП (11) и среднее парциальное давление воздуха по высоте ВВП (12):

$$e_{B.П.}^h = e_n - (e_n - e_H) \cdot \exp\left(-\frac{b \cdot h \cdot \overline{\beta_{B.П.}}}{\rho_{B.П.}^{CP} \cdot L \cdot 0,16}\right), \quad (11)$$

$$e_{В.П.}^{CP} = e_n - \frac{(e_n - e_H) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{b \cdot h \cdot \overline{\beta_{В.П.}}}{\rho_{В.П.}^{CP} \cdot L \cdot 0,16} \right) \right)}{\frac{b \cdot h \cdot \overline{\beta_{В.П.}}}{\rho_{В.П.}^{CP} \cdot L \cdot 0,16}}. \quad (12)$$

Коэффициент влагообмена поверхности стены с воздухом в ВВП принят в зависимости от скорости движения воздуха по результатам исследований А. Г. Перехоженцева.

Гравитационное давление воздуха в ВВП рассчитано по формуле:

$$\Delta P_{ГР} = g \cdot h \cdot (\rho_H - \rho_{В.П.}^{CP}), \quad (13)$$

где ρ_H – плотность наружного воздуха, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с².

Потери давления при движении воздуха в ВВП определены как:

$$\Delta P = R_h + R_S = R_h + \sum_{k=1}^n \xi_k \cdot \frac{\rho_{В.П.} \cdot v_{ПР}^2}{2}, \quad (14)$$

где R_h – потери давления на трение по высоте прослойки ($R_h = R_l \cdot h$), Па;

R_S – потери давления в местных сопротивлениях, Па;

$v_{ПР}$ – скорость движение воздуха в ВВП, м/с;

$\sum \xi_k$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений ($k = 1 \dots n$) в количестве n .

Удельные потери давления на трение в зависимости от скорости движения воздуха в прослойках у ВФС с металлическими экранами на основании данных экспериментальных исследований [2] рассчитывали по эмпирической формуле:

$$R_l = v_{ПР} \cdot (k_1 - k_2 \cdot \delta_{В.П.}), \quad (15)$$

где $\delta_{В.П.}$ – толщина ВВП, м;

k_1 и k_2 – коэффициенты, $k_1 = 1,27$ кг/(м³·с), $k_2 = 0,012$ кг/(м⁴·с).

Оценку принятых геометрических размеров воздушной вентилируемой прослойки производили по наличию или отсутствию конденсации водяного пара на внутренней поверхности защитного экрана. Для этого по ГОСТ 8.524-85 рассчитывали максимальную допустимую относительную влажность воздуха в прослойке, при которой не будет конденсации водяного пара на внутренней поверхности экрана:

$$\varphi_{В.П.}^{ДОП} = 100 \cdot \frac{(t_{В.П.}^h + 273,15)^{5,3627}}{(t_{ЭКР} + 273,15)^{5,3627}} \cdot \exp\left(6888,2 \cdot \left(\frac{1}{(t_{В.П.}^h + 273,15)} - \frac{1}{(t_{ЭКР} + 273,15)} \right) \right). \quad (16)$$

Температуру на внутренней поверхности металлических экранов определяли по формуле:

$$t_{\text{ЭКР}} = t_{\text{В.П.}}^{\text{СР}} - \frac{t_{\text{В.П.}}^{\text{СР}} - t_{\text{Н}}}{\frac{\alpha_{\text{Х.П.}}}{\alpha_{\text{Н}}} + 1}, \quad (17)$$

где $\overline{\alpha_{\text{Х.П.}}}$ – средний по высоте ВВП коэффициент теплообмена поверхности защитного экрана, обращенного в прослойку, Вт/(м²·°С);

$\alpha_{\text{Н}}$ – коэффициент теплообмена наружной поверхности защитного экрана наружной стены с ВФС, Вт/(м²·°С).

Скорость движения воздуха в ВВП определялась для условий его движения за счет естественной конвекции методом последовательного приближения. Критерием сходимости принята температура на внутренней поверхности защитного экрана, т. к. на ее величину влияют все пересчитываемые в циклах итерации параметры.

На основании предложенной математической модели переноса теплоты и водяного пара для наружных стен с ВФС составлена программа на языке программирования Object Pascal. Выполнена верификация численного решения предложенной математической модели и ее валидация. По результатам сравнения данных экспериментальных исследований и результатов расчетов по предложенной математической модели установлено, что модель адекватна объекту исследований.

В четвертой главе диссертации представлены результаты численных исследований температурно-влажностного и аэродинамического режимов, а также уровня теплозащиты наружных стен зданий с ВФС утепления.

Исследования температурно-влажностного режима наиболее распространенных на территории Республики Беларусь наружных стен с ВФС утепления при новом строительстве и тепловой модернизации показали, что они выходят на квазистационарный влажностный режим на второй год эксплуатации.

На рисунке 2 показано распределение значений массовых влажностей по толщине наружной кирпичной стены жилого дома с ВФС утепления, полученное по результатам расчетов. Массовые влажности материалов стены получены значительно меньшими расчетных массовых влажностей материалов (для кирпича кладки – более чем в 10 раз), приведенных в СП 2.04.01-2020.

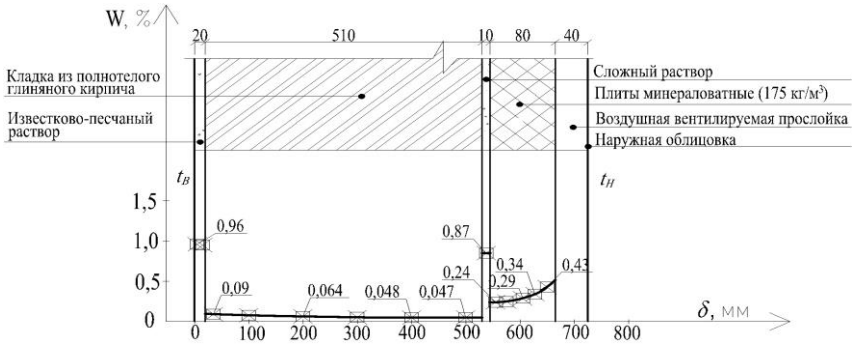


Рисунок 2. – Распределение массовой влажности по толщине наружной кирпичной стены с ВФС утепления (январь, 2 год эксплуатации здания)

На рисунке 3 показано распределение массовых влажностей наружной стены жилого дома из ячеистобетонных блоков (плотность кладки 500 кг/м³) с ВФС утепления (новое строительство). Средняя влажность ячеистого бетона составила $W = 1,03$ % по массе, что более чем в 4 раза ниже расчетного массового отношения для условий эксплуатации «Б», приведенного в СП 2.04.01-2020.

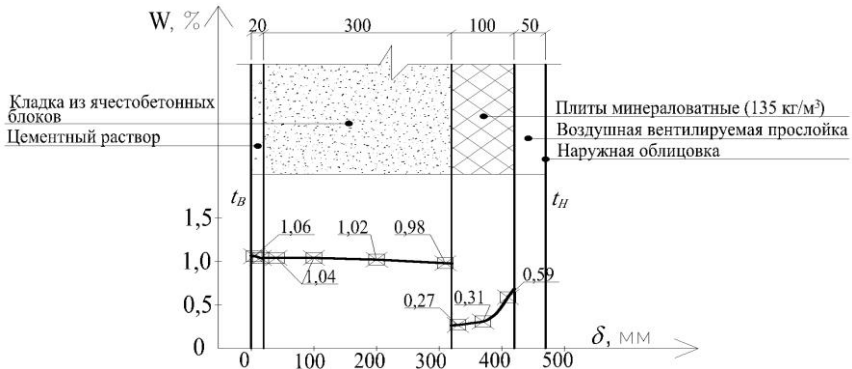


Рисунок 3. – Распределение массовой влажности по толщине наружной стены из ячеистобетонных блоков с ВФС (январь, 2 год эксплуатации здания)

Результаты расчетов наиболее распространенных типов стен показали, что накопление влаги в их толще за многолетний период не наблюдается. Влажности материалов изменяются – увеличиваясь в холодный период года и уменьшаясь в теплый. Результаты расчетов распределения массовой влажности по толщине стен с ВФС утепления удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Металлические элементы крепления защитного экрана и слоя теплоизоляции являются теплопроводными включениями и снижают величину приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен с ВФС утепления. Снижение сопротивления теплопередаче стен из-за влияния теплопроводных включений оценено на основании расчетов коэффициентов теплотехнической однородности. Сопротивление теплопередаче фрагментов наружных стен с учетом влияния теплопроводных включений рассчитывалось по распределению температуры для трехмерной области численным решением дифференциального уравнения теплопроводности.

Влияние кронштейнов крепления защитного экрана определено для глухого участка наружной железобетонной стены с двумя типами ВФС утепления. На рисунке 4 показана расчетная схема фрагмента наружной железобетонной стены с ВФС утепления одного из производителей с кронштейном и направляющей. Кронштейны выполнены из оцинкованной стали; слой теплоизоляции принят из минераловатных плит с коэффициентом теплопроводности $0,042 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

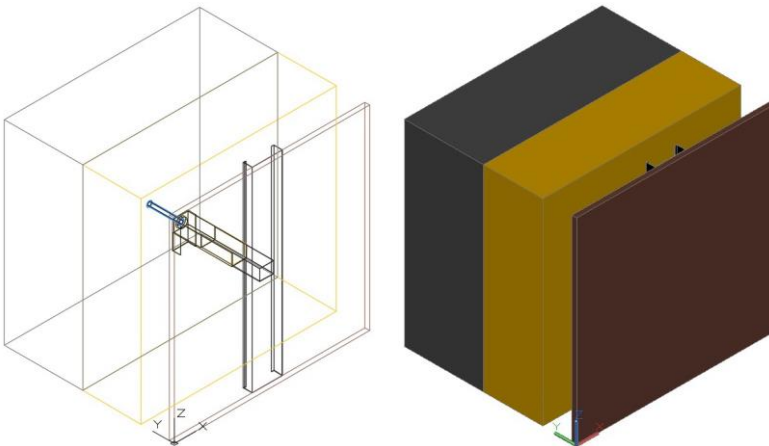
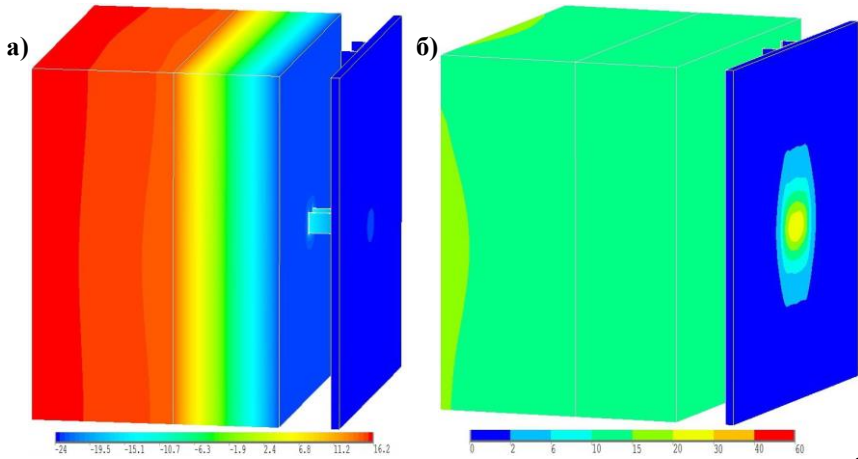


Рисунок 4. – Расчетная схема наружной железобетонной стены с ВФС утепления

На рисунке 5 показано распределение температуры и плотности теплового потока по поверхностям расчетного фрагмента наружной железобетонной стены с ВФС утепления и толщиной теплоизоляционного слоя 150 мм. По результатам расчетов коэффициенты теплотехнической однородности получены в пределах $r = 0,689...0,899$ при количестве кронштейнов от 1 до 4 на 1 м^2 поверхности стены.



а) распределение температуры, °С; б) распределение плотности теплового потока, Вт/м²
Рисунок 5. – Распределение температуры и плотности теплового потока по поверхностям расчетного фрагмента наружной стены с ВФС утепления

Результаты расчетов ВФС утепления различных производителей показали, что снижение значения сопротивления теплопередаче за счет влияния кронштейнов крепления защитного экрана может достигать даже до 50 % и зависит от конструкций систем утепления.

Для повышения теплозащиты наружных стен с ВФС утепления определялись коэффициенты теплотехнической однородности в зависимости от вида стены и толщины слоя теплоизоляции для трех вариантов:

- при установке паронитовых прокладок за пятой кронштейнов;
- при установке кронштейнов из аустенитной стали марки AISI 304 с коэффициентом теплопроводности 15 Вт/(м·°С);
- при использовании обоих вариантов.

Установлено, что паронитовые прокладки, установленные за пятой кронштейнов, дают прирост в уровне теплозащиты наружных стен с ВФС утепления до 3 %. Наибольшее влияние на коэффициент теплотехнической однородности оказывает установка кронштейнов из аустенитной нержавеющей стали, что позволяет повысить сопротивление теплопередаче стен независимо от вида ВФС утепления. При использовании обоих решений для ВФС утепления, с конструкцией приведенной на рисунке 4, коэффициенты теплотехнической однородности для наружной железобетонной стены получены в пределах $r = 0,862...0,969$ при количестве кронштейнов от 1 до 4 на 1 м² поверхности стены и толщине слоя теплоизоляции, в пределах 100...200 мм.

Дюбели с металлическими сердечниками крепления слоя теплоизоляции в количестве до 8 шт. на 1 м^2 площади стены снижают величину сопротивления теплопередаче до 10 % в зависимости от конструкции наружных стен с ВФС.

Определены коэффициенты теплотехнической однородности четырех наиболее распространенных в Республике Беларусь стен с ВФС утепления с использованием предлагаемых конструктивных решений.

На примере наружной глухой железобетонной стены с ВФС утепления показано, что при количестве кронштейнов 3 шт. на 1 м^2 и количестве дюбелей с металлическими сердечниками 6 шт. на 1 м^2 площади стены использование предложенных конструктивных решений позволяет уменьшить толщину слоя теплоизоляции на 40 мм. При этом достигается экономия металла 0,14 кг на 1 м^2 площади наружной стены.

Исследования влияния геометрических размеров ВВП на скорость движения воздуха в них и возможность конденсации водяного пара на их поверхностях выполнены для двух типов наружных стен с ВФС утепления:

- тип №1 – кладка из ячеистобетонных блоков ($\rho = 500 \text{ кг/м}^3$) на тонкослойном растворе толщиной 300 мм с внутренней штукатуркой цементным раствором и слоем теплоизоляции минераловатными плитами (плотность 135 кг/м^3) толщиной 100 мм (жилые здания; приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены не менее $3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$);

- тип №2 – керамзитобетонные стеновые панели, толщиной 250 мм и слоем теплоизоляции минераловатными плитами (плотность 135 кг/м^3) толщиной 100 мм (производственные здания; приведенное сопротивление теплопередаче наружной стены не менее $2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$).

Исследования показали, что независимо от толщины прослойки и типа наружной стены температура воздуха в ней на определенном расстоянии от входного отверстия и выше практически не меняется, что согласуется с данными экспериментальных исследований. Чем меньше толщина ВВП, тем короче начальный участок с резким изменением температуры воздуха в прослойке. С увеличением толщины ВВП в пределах от 10 мм до 100 мм скорость движения воздуха в ней для наружной стены типа № 1 составила, в пределах, $v_{\text{пр}} = 0,113 \dots 0,140 \text{ м/с}$ при температуре наружного воздуха $t_{\text{н}} = -5,9 \text{ °C}$.

Сравнение двух типов наружных стен с одинаковыми конструкциями ВФС утепления и одинаковыми расчетными условиями, показало, что в одной возможна конденсация водяного пара на внутренней поверхности защитного экрана, а в другой – нет. Конденсация водяного пара на внутренней поверхности защитного экрана из металлических профилированных листов возникает при относительной влажности воздуха в ВВП менее 90 %, зависящей от конструктивного решения наружной стены с ВФС утепления и являющейся искомой величиной. Это указывает на то, что

критерий «превышение максимального парциального давления водяного пара воздуха на выходе из ВВП над величиной его действительного парциального давления водяного пара» не может быть использован в качестве оценочного для принятия геометрических размеров прослоек.

На рисунке 6 показаны зависимости фактической и допустимой относительной влажности воздуха в ВВП от толщины прослойки при ее высоте 6 м для наружной стены типа № 1. Видно, что при толщине прослойки 50 мм и более, фактическая относительная влажность воздуха меньше допустимой, т. е. для принятой конструкции ВФС утепления высотой 6 метров толщина ВВП должна быть не менее 50 мм.

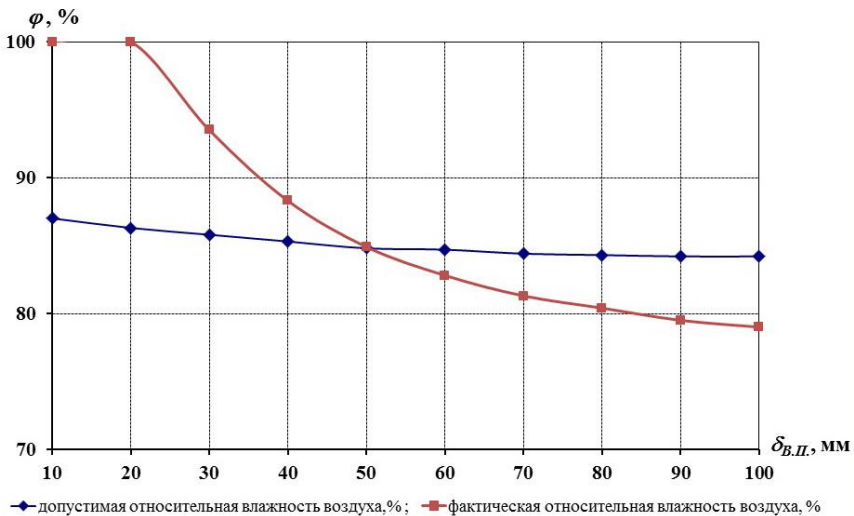


Рисунок 6. – Зависимости допустимой и фактической относительной влажности воздуха в ВВП от толщины прослойки высотой 6 м

Для наружной стены типа № 2 рассчитаны скорости движения воздуха, потери давления на трение и потери давления в местных сопротивлениях в зависимости от суммы коэффициентов местных сопротивлений ВФС утепления. Толщина ВВП принята равной 50 мм, высота – 15 м. Результаты расчетов показали, что при сумме коэффициентов местных сопротивлений в диапазоне $\sum \xi_k = 1...3$ скорость движения воздуха в ВВП находится в пределах $u_{лр} = 0,127...0,128$ м/с при температуре наружного воздуха равной $t_H = -5,9$ °С.

Из общей величины потерь давления при движении воздуха в ВВП потери давления на трение более чем в 50 раз выше потерь давления в местных сопротивлениях. В то же время в нормах СП 3.02.01-2020 потери давления на трение при движении воздуха в ВВП не учитываются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведены экспериментальные исследования температурно-влажностного режима наружных стен эксплуатируемых зданий с ВФС утепления. Определены распределения значений массовой влажности по толщине материалов стен и скорости движения воздуха в воздушных вентилируемых прослойках. Установлены расчетные аэродинамические режимы воздушных вентилируемых прослоек и особенности влагопередачи через наружные стены с ВФС утепления [2, 3, 8, 13].

2. Разработана физико-математическая модель температурно-влажностного режима наружных стен с ВФС утепления, алгоритм ее численного решения и программа в среде объектно-ориентированного программирования. Доказана адекватность предложенной физико-математической модели объекту исследований [4, 9, 18].

Получены новые данные по распределению массовой влажности по толщине стен для условий умеренного климата на основании численных исследований влажностного режима наружных стен с ВФС утепления [7, 9, 10, 15, 16, 17]. Установлено, что при устройстве ВФС утепления накопления влаги в толще наружных стен не наблюдается, а полученные средние значения массовой влажности материалов меньше расчетных нормативных величин [9, 10].

3. Элементы крепления защитного экрана ВФС утепления снижают величину сопротивления теплопередаче наружных стен [1, 6, 12]. Показано, что наиболее эффективным из рассмотренных решений по повышению уровня теплозащиты наружных стен с ВФС утепления является замена кронштейнов из оцинкованной стали на кронштейны из аустенитной нержавеющей стали, что позволяет увеличить сопротивление теплопередаче стен на величину до 20 %. Устройство тонких паронитовых прокладок за пятой кронштейнов обеспечивает увеличение сопротивления теплопередаче стен на величину до 3 %. Приведенные решения являются универсальными, позволяют добиться снижения материалоемкости систем и увеличивают коэффициент теплотехнической однородности наружных стен с ВФС утепления [10].

4. Предложена новая инженерная методика аэродинамического расчета воздушных вентилируемых прослоек ВФС утепления со сплошными экранами [18, 19], отличающаяся от известных методик определением допустимой относительной влажности воздуха в прослойке, при которой не будет конденсации водяного пара на внутренней поверхности защитного экрана.

Установлено, что допустимая относительная влажность воздуха на выходе из ВВП наружных стен с ВФС утепления и сплошными металличе-

скими экранами не превышает 90 %. Для таких условий критерий «превышение максимального парциального давления водяного пара воздуха на выходе из ВВП над величиной его действительного парциального давления водяного пара», используемый в известных инженерных методиках расчетов, не может быть использован в качестве оценочного при поверочных расчетах геометрических размеров прослоек [5, 10, 14].

Показано, что величина аэродинамических потерь давления на трение значительно больше потерь давления в местных сопротивлениях при движении воздуха в воздушных вентилируемых прослойках [5, 10], что учтено в разработанной методике расчета.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанная инженерная методика аэродинамического расчета для определения геометрических размеров воздушных вентилируемых прослоек ВФС утепления использовалась автором при выполнении работ в отделе ограждающих конструкций РУП «Институт БелНИИС» и вошла в рекомендации по проектированию поэтажно опертых стен и перегородок из эффективных мелкоштучных стеновых материалов (изменение № 1 Р5.02.088.11, № 088/01 от 10.01.2013 г. реестра учетной регистрации), выполненных по заданию Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь.

Получены данные о фактическом влажностном состоянии материалов наружных стен с вентилируемыми фасадными системами для условий умеренного климата, а также разработаны конструктивные решения по повышению уровня теплозащиты наружных стен зданий с ВФС утепления, что позволяет более рационально конструировать новые ограждения. Решения использовались при определении коэффициентов теплотехнической однородности вентилируемых фасадных систем типа «ФПС-1» и «ФПС-2» ООО «ФасадПроектСистем» (справка об использовании результатов исследований приведена в Приложении Б к диссертации).

На основании предложенного численного решения физико-математической модели разработана компьютерная программа для прогнозирования температуры и влажности в многолетнем цикле эксплуатации и внедрена при разработке одного из вариантов повышения уровня теплозащиты промышленного холодильника (акт о практическом использовании результатов исследований приведен в Приложении Б к диссертации).

Совокупность полученных результатов позволяет добиться снижения материалоемкости независимо от типа вентилируемой фасадной системы утепления и может быть использована при проектировании наружных стен зданий и сооружений.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в изданиях, включенных в перечни научных изданий Республики Беларусь и Российской Федерации для опубликования результатов диссертационных исследований

1. Протасевич, А. М. Сопротивление теплопередаче наружных стен зданий теплоизолированных по системе вентилируемый фасад / А. М. Протасевич, Л. С. Калинина, А. Б. Крутилин // Энергоэффективность. – 2002. – № 10. – С. 7–8.

2. Протасевич, А. М. Теплоизоляция наружных стен зданий по системе «вентилируемый фасад»/ А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин, Д. Д. Якимович // Жилищное строительство. – 2006. – № 2. – С. 8–13.

3. Протасевич, А. М. Тепловой режим вентилируемых воздушных прослоек фасадных систем / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Строительные материалы. – 2007. – № 6. – С. 13–15.

4. Протасевич, А. М. Расчет тепловлажностного режима наружных стен зданий с вентилируемой воздушной прослойкой и защитными экранами / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2009. – № 1. – С. 19–24.

5. Протасевич, А. М. Аэродинамический расчет вентилируемых фасадных систем зданий со сплошными экранами / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Жилищное строительство. – 2011. – № 7. – С. 37–40.

6. Протасевич, А. М. Классификация вентилируемых фасадных систем. Влияние теплопроводных включений на их теплозащитные характеристики / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 8. – С. 57–62.

7. Протасевич, А. М. Тепловая защита и тепловлажностное состояние ограждающих конструкций промышленных холодильников / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин, С. В. Сомова, В. В. Лешкевич // Строительная наука и техника. – 2011. – № 6. – С. 42–45.

8. Протасевич, А. М. Влажностный режим наружных стен зданий в условиях Республики Беларусь/ А. М. Протасевич, В. В. Лешкевич, А. Б. Крутилин // Жилищное строительство. – 2013. – № 9. – С. 37–40.

9. Крутилин, А. Б. Тепловлажностный режим наружных стен с вентилируемыми фасадными системами утепления / А. Б. Крутилин // Энергоэффективность. – 2020. – № 5. – С. 27–32.

10. Крутилин, А. Б. Вентилируемые фасадные системы в энергосберегающих конструкциях наружных стен зданий / А. Б. Крутилин // Энергоэффективность. – 2020. – № 10. – С. 18–25.

Патенты

11. Вентилируемое наружное ограждение здания: а. с. ВУ 9368 Республика Беларусь, МПК (2006) Е 04 В 2/42, Е 04 В 1/70 / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин, Д. Д. Якимович; Белорусский национальный технический университет – №а 20041256 ; заявл. 30.12.2004 ; опубл. 30.06.2006 // Официальный бюллетень Республики Беларусь. – 2007. – № 3. – С. 108.

Материалы докладов на конференциях, семинарах, тезисы докладов и рекомендации по проектированию

12. Калинина, Л. С. К расчету приведенного сопротивления теплопередачи стен зданий с наружной теплоизоляцией / Л. С. Калинина, А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Актуальные проблемы строительной теплофизики: Материалы седьмой научно-практической конференции. Москва, 18–20 апреля, 2002 г. / НИИСФ. – Москва, 2002. – С. 147–149.

13. Протасевич, А. М. Натурные исследования наружных стен зданий, теплоизолированных по системе «вентилируемый фасад» / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Современные фасадные системы: эффективность и долговечность: Материалы научно-технической конференции. Москва, 21 ноября 2008 г. / МГСУ. – Москва, 2008. – С. 212–217.

14. Крутилин, А. Б. Результаты теплотехнических расчетов наружных стен с фасадными системами и вентилируемыми воздушными прослойками / А. Б. Крутилин // Наука — образованию, производству, экономика: Материалы Восьмой международной научно-технической конференции. В 4 томах: Том 1. Минск, 2010 г. / БНТУ. – Минск, 2010. – С. 121.

15. Протасевич, А. М. Навесные (вентилируемые) фасады в каркасных системах с наружными поэтажными стенами из ячеистого бетона / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции. Минск, 26–28 мая 2010 г. / Под редакцией журнала «Архитектура и строительство». – Минск, Стринко, 2010. – С. 131–136.

16. Крутилин, А. Б. К вопросу определения расчетных массовых отношений влаги в материалах и уровня теплозащиты наружных стен, выполняемых кладкой из ячеистобетонных блоков / А.Б. Крутилин // Современное производство автоклавного газобетона: Сборник докладов научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 16–18 ноября 2011 г. / Под редакцией научно-технического совета Национальной Ассоциации Производителей Автоклавного Газобетона. – СПб, 2011. – С. 96–103.

17. Крутилин, А. Б. Результаты расчетов влажностного режима наружных стен из ячеистобетонных блоков / А. Б. Крутилин // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: Материалы

7-й Международной научно-практической конференции. Брест, Малорита, 22–24 мая 2012 г. / Под редакцией журнала «Архитектура и строительство». – Минск, Стринко, 2012. – С. 100–108.

18. Протасевич, А. М. Heat-Protective Properties of Outer Walls with Ventilated Facade Heat Insulation Systems / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Advanced Construction 2012: Сборник докладов конференции. Каунас, 18–19 октября 2012 г. / Kaunas University of Technology. – Каунас, 2012. – С. 52–61.

19. Рекомендации по проектированию поэтажно опертых стен и перегородок из эффективных мелкоштучных стеновых материалов: Изменение № 1 Р 5.02.088.11 № 1. – Введ. 10.01.2013. – Минск: РУП «Институт БелНИИС», 2013. – 8 с.

РЭЗІЮМЭ

Круцілін Антон Барысавіч

Удасканаленне метадаў цеплатэхнічнага разліку і канструкцый вентыляваных фасадных сістэм будынкаў з суцэльнымі экранамі

Ключавыя словы: вентыляваныя фасадныя сістэмы ўцяплення, тэмпературна-вільготнасны рэжым вонкавых сцен, паветраная вентыляваная праслойка, хуткасць руху паветра, супраціўленне цеплаперадачы.

Мэта працы: зніжэнне матэрыялаёмістасці і ўдасканаленне спосабу разліку тэмпературна-вільготнаснага рэжыму вонкавых сцен з вентыляванымі фасаднымі сістэмамі ўцяплення.

Метады даследавання: вымярэнні хуткасці руху паветра ў паветраных праслойках, вымярэнні тэмператур і паверхневых шчыльнасцяў цеплавых патокаў, адбор проб матэрыялаў вонкавых сцен будынкаў з вызначэннем вільготнасці вагавым метадам, метадам канечных разнасцяў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Атрыманы новыя эксперыментальныя дадзеныя па тэмпературна-вільготнаснаму рэжыму вонкавых сцен будынкаў з ВФС ўцяплення, эксплуатаваных ва ўмовах Рэспублікі Беларусь. Устаноўлены разліковыя аэрадынамічныя рэжымы паветраных вентыляваных праслоек і ўмовы вільгацэперадачы праз вонкавыя сцены з ВФС ўцяплення. Распрацавана фізіка-матэматычная мадэль тэмпературна-вільготнаснага рэжыму вонкавых сцен з ВФС ўцяплення для нестацыянарных умоў, і алгарытм яе лікавага рашэння. Праведзены лікавыя даследаванні вільготнаснага рэжыму і атрыманы новыя дадзеныя па размеркаванні масавай вільготнасці па сячэннях вонкавых сцен з ВФС уцяплення для ўмоў Рэспублікі Беларусь. Даследаваны канструктыўныя рашэнні па павышэнню ўзроўню цеплааховы вонкавых сцен з ВФС ўцяплення з выкарыстаннем кранштэйнаў з нержавеючай аўстэнітнай сталі і ўстаноўкай паранітых пракладак за іх пятой. Атрыманы новыя дадзеныя па каэфіцыентах цеплатэхнічнай аднароднасці вонкавых сцен з ВФС уцяплення з выкарыстаннем прапанаваных рашэнняў. Распрацавана класіфікацыя вонкавых сцен з ВФС і інжынерная метадыка аэрадынамічнага разліку паветраных праслоек.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі могуць быць выкарыстаны пры праектаванні вонкавых сцен будынкаў ВФС ўцяплення.

Галіна выкарыстання: будаўніцтва.

РЕЗЮМЕ

Крутилин Антон Борисович

Совершенствование методов теплотехнического расчета и конструкций вентилируемых фасадных систем зданий со сплошными экранами

Ключевые слова: вентилируемые фасадные системы утепления, температурно-влажностный режим наружных стен, воздушная вентилируемая прослойка, скорость движения воздуха, сопротивление теплопередаче.

Цель работы: снижение материалоемкости и усовершенствование способа расчета температурно-влажностного режима наружных стен с вентилируемыми фасадными системами утепления.

Методы исследования: измерения скорости движения воздуха в воздушных вентилируемых прослойках, измерения температур и поверхностных плотностей тепловых потоков, отбор проб материалов наружных стен зданий с определением влажности весовым методом, метод конечных разностей.

Полученные результаты и их новизна. Получены новые экспериментальные данные по температурно-влажностному режиму наружных стен зданий с ВФС утепления, эксплуатируемых в условиях Республики Беларусь. Установлены расчетные аэродинамические режимы воздушных вентилируемых прослоек и условия влагопередачи через наружные стены с ВФС утепления. Разработана физико-математическая модель температурно-влажностного режима наружных стен с ВФС утепления для нестационарных условий и алгоритм ее численного решения. Проведены численные исследования влажностного режима и получены новые данные по распределению массовой влажности по сечениям наружных стен с ВФС утепления для условий Республики Беларусь. Исследованы конструктивные решения по повышению уровня теплозащиты наружных стен с ВФС утепления с использованием кронштейнов из нержавеющей аустенитной стали и установкой паронитовых прокладок за их пяткой. Получены новые данные по коэффициентам теплотехнической однородности наружных стен с ВФС утепления с использованием предлагаемых решений. Разработаны классификация наружных стен с ВФС и инженерная методика аэродинамического расчета воздушных вентилируемых прослоек.

Рекомендации по использованию. Результаты могут быть использованы при проектировании наружных стен зданий ВФС утепления.

Область применения: строительство.

SUMMARY

Krutilin Anton Borisovich

Improvement of methods of heat engineering calculation and designs of ventilated facade systems of buildings with solid screens

Key words: ventilated facade insulation systems, temperature and humidity conditions of external walls, ventilated air layer, air velocity, heat transfer resistance.

Purpose of the work: reducing material consumption and improving the method for calculating the temperature and humidity conditions of external walls with ventilated facade insulation systems.

Research methods: measuring the speed of air movement in ventilated air layers, measuring temperatures and surface densities of heat fluxes, taking samples of materials of the outer walls of buildings with the determination of humidity by the gravimetric method, finite differences method.

The results obtained and their novelty. New experimental data on the temperature and humidity conditions of external walls of buildings with ventilated facade insulation systems, operated in the conditions of the Republic of Belarus, have been obtained. The calculated aerodynamic regimes of ventilated air layers and the conditions for moisture transfer through the outer walls with ventilated facade insulation systems have been established. A physical and mathematical model of the temperature and humidity regime of external walls with ventilated facade insulation systems for non-stationary conditions, and an algorithm for its numerical solution have been developed. Numerical studies of the moisture regime have been carried out and new data have been obtained on the distribution of mass moisture over the sections of external walls with ventilated facade insulation systems for the conditions of the Republic of Belarus. Constructive solutions for increasing the level of thermal protection of external walls with ventilated facade insulation systems using brackets made of stainless austenitic steel and installing paronite gaskets behind their heel have researched. New data were obtained on the coefficients of heat engineering uniformity of external walls with ventilated facade insulation systems using the proposed solutions. A classification of external walls with ventilated facade insulation systems and an engineering technique for aerodynamic calculation of ventilated air layers have developed.

Recommendations for use. The results can be used in the design of the external walls of buildings with ventilated facade insulation systems.

Scope: construction.

Научное издание

КРУТИЛИН
Антон Борисович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО
РАСЧЕТА И КОНСТРУКЦИЙ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДНЫХ
СИСТЕМ ЗДАНИЙ СО СПЛОШНЫМИ ЭКРАНАМИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

Подписано в печать 04.02.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,18. Тираж 80. Заказ 58.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.