

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

На правах рукописи



**СМИРНОВ Николай Николаевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ПО СОЗДАНИЮ  
ДИНАМИЧЕСКОГО МИКРОКЛИМАТА ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЙ  
С ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМИ СВЕТОПРОЗРАЧНЫМИ  
КОНСТРУКЦИЯМИ**

Специальность: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Захаров Вадим Михайлович

ИВАНОВО – 2022

## Реферат

Диссертация 333 стр., 121 рис., 35 табл., 212 библ.

Динамический микроклимат, теплоотражающие экраны, фотоэлектрическая солнечная батарея, светопрозрачные ограждающие конструкции, прерывистый режим отопления, осушка воздуха, математическая модель

**Объектами исследования** являются системы по созданию динамического микроклимата для помещений с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями.

**Целью работы** является повышение энергоэффективности работы систем по созданию динамического микроклимата в помещениях путем внедрения разработанных светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами и солнечными фотоэлектрическими батареями, а также совершенствования методики определения минимальной температуры внутреннего воздуха в нерабочее время.

Выполнен аналитический обзор опубликованных данных об энергосберегающих мероприятиях при организации микроклимата в помещении, в том числе по теплозащите ограждающих конструкций, а также об методах математического моделирования динамического микроклимата. Предложены новые решения по повышению энергоэффективности работы светопрозрачных ограждающих конструкций зданий за счет применения в них теплоотражающих экранов и солнечных фотоэлектрических батарей. На основе проведения лабораторного эксперимента и математического моделирования получены новые данные о влиянии применения теплоотражающих экранов различной конфигурации и свойств на теплотехнические характеристики оконных блоков. Разработан инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции в текущий момент времени и за отопительный период года с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации на основе аппроксимации результатов математического моделирования. Разработана методика определения значения минимальной температуры внутреннего воздуха в нерабочее время при условии недопущения выпадения конденсата на внутренних поверхностях разработанных светопрозрачных конструкций при наличии или отсутствии предварительной осушки воздуха. Разработана и реализована в программном комплексе COMSOL Multiphysics математическая модель динамического микроклимата для помещения с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями. Определены технико-экономические показатели от использования разработанных энергосберегающих решений при организации микроклимата в помещениях различного назначения.

## Содержание

Введение.....	8
1 Энергосбережение при организации микроклимата в помещении. Состояние вопроса .....	17
1.1 Энергоемкость мирового ВВП. Анализ энергоемкости производства в России.....	17
1.2 Структура конечного потребления энергии. Анализ потребления топливно-энергетических ресурсов на обеспечение параметров микроклимата в зданиях	20
1.3 Доля светопрозрачных конструкций в структуре потерь тепловой энергии в зданиях .....	27
1.4 Требования в области энергосбережения и энергоэффективности в зданиях стран Европейского союза .....	30
1.5 Требования в области энергосбережения и энергоэффективности для зданий в Российской Федерации.....	32
1.6 Энергосберегающие мероприятия при организации микроклимата в зданиях промышленных предприятий .....	38
1.7 Современные подходы к повышению тепловой защиты светопрозрачных ограждающих конструкций зданий .....	48
1.8 Динамический микроклимат в помещениях. Современное состояние вопроса.....	55
1.9 Выводы по первому разделу. Постановка задач исследования .....	62
2 Разработка светопрозрачных ограждающих конструкций с использованием теплоотражающих экранов .....	66
2.1 Климатические ресурсы – как предпосылка для создания светопрозрачных конструкций с регулируемым сопротивлением теплопередаче за счет использования теплоотражающих экранов.....	66

2.2	Разработка новых светопрозрачных ограждающих конструкций с теплоотражающими экранами рулонного, панельного и жалюзийного типа ..	77
2.3	Разработка конструкции многофункционального энергоэффективного ставня .....	83
2.4	Автоматизация работы светопрозрачных ограждающих конструкций с теплоотражающими экранами. Новые решения.....	86
2.4.1	Автоматизированный оконный блок.....	87
2.4.2.	Системы управления теплоотражающими экранами оконного блока ...	88
2.4.3.	Системы управления группой электроприводов теплоотражающих экранов.....	93
2.4.4	Разработка и реализация экспериментального образца автоматизированной системы управления работой теплоотражающего экрана с солнечной фотоэлектрической батареей для оконного блока .....	94
2.5	Выводы по второму разделу .....	98
3	Экспериментальное исследование теплозащитных свойств окон с теплоотражающими экранами .....	101
3.1	Описание экспериментальной установки.....	101
3.2	Разработка методики испытаний окон с теплоотражающими экранами....	112
3.2.1	Подготовка к работе.....	112
3.2.2	Проведение испытаний базового варианта конструкции оконного блока .....	113
3.2.3	Обработка результатов испытаний базового варианта конструкции оконного блока .....	114
3.2.4	Проведение испытаний оконного блока с теплоотражающими экранами и обработка результатов .....	118

3.3 Экспериментальные исследования влияния установки теплоотражающих экранов в оконных блоках на теплозащитные характеристики светопрозрачных ограждающих конструкций при стационарных условиях .....	122
3.4 Исследование динамики изменения тепловых потоков, проходящих через оконный блок при использовании теплоотражающих экранов, во времени.....	139
3.5 Экспериментальное исследование зависимости приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока с экранами от температурных режимов испытаний.....	142
3.6 Выводы по третьему разделу.....	146
4 Разработка математической модели динамического микроклимата для зданий с регулируемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций.	148
4.1 Разработка и программная реализация математической модели теплопередачи через стеклопакет с теплоотражающими экранами.....	148
4.1.1 Теплообмен на наружной поверхности окна.....	150
4.1.2 Теплообмен на внутренней поверхности окна.....	151
4.1.3 Термическое сопротивление стеклопакета.....	152
4.1.4 Теплообмен в газовой прослойке .....	153
4.1.5 Расчётная схема модели.....	156
4.1.6 Программная реализация математической модели .....	159
4.1.7 Результаты моделирования процесса теплопередачи через стеклопакет в ПК Matlab.....	160
4.2 Трёхмерное моделирование процесса теплопередачи через стеклопакет в программно-вычислительном комплексе Phoenix .....	166
4.3 Проверка адекватности математических моделей теплопередачи через стеклопакет с экранами .....	177
4.4 Разработка инженерного метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции с теплоотражающими экранами в	

текущий момент времени на основе аппроксимации результатов математического моделирования .....	189
4.5 Разработка математической модели динамического микроклимата для зданий с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон .....	195
4.5.1 Математическое моделирование тепломассопереноса в помещении ...	196
4.5.2 Граничные и начальные условия математической модели.....	202
4.5.3 Описание тепловых потоков в помещении .....	209
4.5.4 Определение количества электрической энергии, генерируемой в энергоэффективных светопрозрачных конструкциях .....	214
4.6 Выводы по четвертому разделу.....	216
5 Повышение эффективности энергосбережения при организации монотонного и динамического микроклимата в помещениях зданий с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями .....	218
5.1 Разработка методики определения минимальной температуры внутреннего воздуха при недопущении выпадения конденсата на внутренних поверхностях разработанных светопрозрачных конструкций при наличии и отсутствии предварительной осушки воздуха.....	218
5.2 Разработка инженерного метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции за отопительный период с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации .....	236
5.3 Определение энергосберегающего эффекта от применения теплоотражающих экранов, жалюзи в окнах и дежурного режима отопления при создании микроклимата в производственном помещении промышленного предприятия.....	247
5.3.1 Описание производственного помещения ремонтно-механического цеха .....	247

5.3.2 Тепловизионное обследование поверхностей ограждающих конструкций здания РМЦ.....	251
5.3.3 Разработка и оценка энергетической эффективности мероприятий по снижению затрат ТЭР на поддержание параметров микроклимата в производственном помещении .....	254
5.4 Повышение эффективности работы систем по созданию динамического микроклимата для помещения с энергосберегающими светопрозрачными конструкциями .....	261
5.4.1 Разработка системы кондиционирования воздуха для помещения тренажера БЩУ АЭС.....	262
5.4.2 Численное моделирование динамического микроклимата в помещении тренажера БЩУ АЭС.....	270
5.4.3 Верификация математической модели микроклимата в помещении тренажера БЩУ АЭС.....	281
5.4.3 Расчет экономической эффективности применения энергоэффективных светопрозрачных конструкций при создании динамического микроклимата.....	284
5.5 Выводы по пятому разделу .....	288
Заключение .....	291
Список литературы .....	293
Приложения .....	319
Приложение А .....	320
Приложение Б .....	323
Приложение В.....	329

## Введение<sup>1</sup>

**Актуальность работы.** Среди основных факторов, влияющих на снижение себестоимости продукции промышленного предприятия, можно особо выделить повышение производительности труда и уменьшение материальных затрат, в том числе на топливно-энергетические ресурсы (ТЭР). В Российской Федерации энергоемкость внутреннего валового продукта является одной из самых высоких в мире. Для повышения конкурентоспособности отечественной продукции в России в последние десятилетия особое внимание уделяется проблемам энергосбережения и энергоэффективности. Нормативные акты устанавливают снижение потребления тепловой энергии к 2028 году для вновь строящихся зданий на 50 %, а для реконструируемых или проходящих капитальный ремонт – на 20% по сравнению с базовым уровнем. Рекомендуется активно внедрять в инженерные системы зданий возобновляемые и альтернативные источники энергии и устройства, утилизирующие теплоту вторичных энергоресурсов.

В структуре общих издержек предприятий средней и северной полосы России значительный удельный вес занимают расходы на отопление, вентиляцию и кондиционирование производственных помещений, при этом их доля составляет от 10 до 50 % в себестоимости продукции. В структуре ТЭР, направленных на поддержание необходимых параметров микроклимата значительная доля приходится на компенсацию потерь через ограждающие конструкции здания вследствие теплопередачи в окружающую среду (трансмиссионные потери). Потери теплоты через светопрозрачные ограждающие конструкции (окна, световые фонари и т.д.) являются значительными в структуре трансмиссионных потерь, из-за низкого приведенного сопротивления теплопередаче данных элементов здания. В производственных зданиях площадь остекления, как правило, выше, чем в жилых в связи с высокими требованиями к естественному освещению и промыш-

---

<sup>1</sup> Автор выражает глубокую благодарность за научные консультации при выполнении работы к.т.н., профессору кафедры промышленной теплоэнергетики Пыжову В.К.



ленной безопасности (легкосбрасываемые конструкции), поэтому доля тепловых потерь через светопрозрачные конструкции в структуре трансмиссионных потерь возрастает и составляет величину 20÷60 % от суммарных трансмиссионных тепловых потерь.

В промышленном производстве с монотонным и напряженным характером работы стабильные параметры микроклимата повышают утомляемость персонала и отрицательно сказываются на производительности труда. Система динамического микроклимата (ДМ) подает в помещение воздух с непрерывно изменяющимися во времени параметрами воздуха (температура, скорость), что приводит к повышению работоспособности сотрудников за счет возбуждения центральной нервной системы.

Следовательно, решение задачи энергосбережения в зданиях за счет внедрения инновационных энергоэффективных светопрозрачных конструкций с высокой степенью теплозащиты и генерацией электроэнергии при создании динамического микроклимата является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемам повышения тепловой защиты светопрозрачных конструкций посвящены труды исследовательских групп под руководством В.М. Захарова (ИГЭУ), М.И. Низовцева, В.И. Терехова (Институт теплофизики СО РАН), И.Л. Шубина, В.К. Савина (НИИСФ РААСН), Ю.А. Табунщикова (МАрхИ), В.С. Глазова (НИУ МЭИ), В.В. Логвиненко (АлтГТУ им. И.И.Ползунова), Е.В. Петрова (ТГАСУ) и др. Значимые результаты в области разработки энергосберегающих мероприятий при создании (и моделировании) микроклимата в помещениях получены научными коллективами под руководством В.Н. Богословского (МИСИ), П.О. Фангера, Ю.А. Табунщикова (МАрхИ), В.В. Бухмирова (ИГЭУ), А.Б. Гаряева, А.Я. Шелгинского (НИУ МЭИ), В.Н. Федосеева (ИвГПУ), Е.Г. Малявиной, В.Г. Гагарина (МГСУ), В.И. Панферова (ЮУрГУ), Л.Б. Директора (ОИВТ РАН) и др.. Вопросы создания систем динамического микроклимата в помещениях и его влияния на самочувствие человека занимались Ю.Н. Хомуцкий, В.В. Ловцов (ВНИИОТ), А.Г. Сотников (НП «АВОК – Северо-Запад»), П.О. Фангер (Дания),

В.К. Пыжов, А.В. Гаранин (ИГЭУ). Однако ряд важных аспектов, рассмотренных в данной работе, таких как, влияние на уменьшение затрат ТЭР за счет понижения температуры внутреннего воздуха в нерабочее время, рассчитанной с учетом изменения трансмиссионных потерь и влажности, а также внедрения энергоэффективных светопрозрачных ограждающих конструкций с перемещаемыми теплоотражающими экранами и солнечными батареями при организации классического и динамического микроклимата, остается недостаточно изученным.

**Целью диссертационной работы** является повышение энергоэффективности работы систем по созданию динамического микроклимата в помещениях путем внедрения разработанных светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами и солнечными фотоэлектрическими батареями, а также совершенствования методики определения минимальной температуры внутреннего воздуха в нерабочее время.

В работе решаются следующие **задачи**:

1) выполнить анализ существующих требований и предлагаемых решений в области энергосбережения при организации микроклимата в помещении, способов повышения тепловой защиты светопрозрачных конструкций, методов математического описания тепломассообменных процессов при формировании динамического микроклимата;

2) разработать энергосберегающие светопрозрачные ограждающие конструкции с перемещаемыми теплоотражающими экранами и солнечными фотоэлектрическими батареями;

3) провести экспериментальные исследования с целью определения влияния теплоотражающих экранов на сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций;

4) разработать и выполнить проверку адекватности математической модели теплопередачи через светопрозрачную конструкцию с теплоотражающими экранами с учётом изменения во времени температуры и подвижности внутреннего и наружного воздуха;

5) разработать инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции в текущий момент времени и за отопительный период года с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации на основе аппроксимации результатов математического моделирования;

6) разработать методику определения минимальной температуры внутреннего воздуха при выполнении условия недопущения выпадения конденсата на внутренних поверхностях разработанных светопрозрачных конструкций при наличии и отсутствии предварительной осушки воздуха;

7) разработать математическую модель динамического микроклимата для зданий с новыми энергоэффективными светопрозрачными конструкциями.

8) определить энергетические показатели работы системы по созданию классического и динамического микроклимата помещений предприятий при использовании в светопрозрачных конструкциях теплоотражающих экранов и солнечных батарей, а также дополнительного понижения температуры внутреннего воздуха в нерабочее время.

**Научная новизна** работы обусловлена следующим:

1. Разработаны новые энергосберегающие светопрозрачные конструкции с регулируемым сопротивлением теплопередаче на основе применения перемещаемых теплоотражающих экранов и генерацией электрической энергии при помощи солнечных фотоэлектрических батарей.

2. На основании данных физического эксперимента и численного моделирования впервые установлена количественная зависимость приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами от геометрических размеров и физических свойств стекол, экранов и образованных ими воздушных прослоек, а также от температурного режима эксплуатации данных конструкций.

3. Разработана методика определения минимальной температуры воздуха в нерабочее время для помещений с регулируемым сопротивлением теплопередаче

светопрозрачных конструкций, отличающаяся учетом термовлажностных режимов эксплуатации здания и эффекта от предварительной осушки воздуха.

4. Впервые при моделировании динамического микроклимата в помещениях реализован учет нелинейной зависимости сопротивления теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций с теплоотражающими экранами от температурного режима эксплуатации, а также генерации электрической энергии при помощи солнечных батарей.

**Теоретическая значимость работы** обусловлена следующим. *Доказана* целесообразность использования теплоотражающих экранов с солнечными фотоэлектрическими батареями в светопрозрачных конструкциях в целях повышения их тепловой защиты и генерации электроэнергии. *Изложены:* результаты обобщения экспериментальных данных о влиянии применения теплоотражающих экранов и температурных режимов эксплуатации на приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций; основные положения разработанных моделей теплопередачи через стеклопакет с экранами, а также динамического микроклимата для помещений с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями. *Разработана* методика определения минимальной температуры воздуха в нерабочее время для помещений с регулируемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций. *Раскрыты* схемные и режимные аспекты технических решений по применению экранов с солнечными батареями в светопрозрачных конструкциях. *Изучено* влияние применения экранов с солнечными батареями в светопрозрачных конструкциях и дежурного режима отопления на снижение энергетических затрат при организации микроклимата в помещении.

**Практическая значимость результатов** заключается в следующем:

1. Применение разработанных в диссертации энергоэффективных светопрозрачных ограждающих конструкций с теплоотражающими экранами и солнечными батареями, методик определения дополнительного понижения температуры воздуха в нерабочее время, а также организация динамического микроклимата в рабочее время позволяет существенно понизить потребление ТЭР (от 15 до 70 %) и повысить производительность труда.

2. Разработана компьютерная программа для расчета процесса теплопередачи для стеклопакета с теплоотражающими экранами (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615250 от 19 мая 2016 г.), которая позволяет с учетом переменного температурного и скоростного режимов эксплуатации определять термическое и приведенное сопротивление теплопередаче конструкции, тепловой поток, а также значения температур на границах раздела сред с целью использования полученных данных при разработке математических моделей микроклимата, составления теплового баланса и определения эффективности использования экранов.

3. Применение разработанного инженерного метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции в текущий момент времени и за отопительный период года с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации на основе аппроксимации результатов математического моделирования позволяет оценить эффективность применения экранов.

4. Предложены аналитические зависимости и номограммы для определения приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций с теплоотражающими экранами, учитывающие количество экранов, температуру и скорость внутреннего и наружного воздуха.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использованы фундаментальные методы математического моделирования и экспериментальных исследований процессов теплообмена, методы корреляционно-регрессионного анализа, математической статистики, определения приведенного сопротивления теплопередаче строительных конструкций, оценки эффективности энергосберегающих мероприятий.

**Внедрение результатов исследований.** Результаты диссертационной работы рекомендованы для внедрения специалистами в области энергосбережения и энергосервиса, сертификационных испытаний окон, в сфере эксплуатации инженерных систем, формирующих микроклимат зданий, а также переданы НКО Фонд "Энергоэффективность" (г.Ярославль), АНО "Ивановостройиспытания" (г. Ивано-

во), АО «ПСК» (г. Иваново), ИГЭУ. Результаты внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», в том числе в виде учебника "Системы кондиционирования, вентиляции и отопления".

**Достоверность и обоснованность результатов** подтверждается использованием фундаментальных физических законов, апробированных теоретических и экспериментальных методов исследования, обоснованностью выбора математической модели и проверкой её адекватности, полнотой обзора литературных данных, согласованностью результатов диссертационной работы с данными других авторов и нормативной документацией.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Энергосберегающие светопрозрачные конструкции с регулируемым сопротивлением теплопередаче и генерацией электрической энергии на основе применения теплоотражающих экранов и солнечных батарей.

2. Результаты экспериментальных исследований о влиянии установки теплоотражающих экранов и температурных условий эксплуатации на приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций.

3. Результаты численного моделирования теплопередачи через светопрозрачную конструкцию с теплоотражающими экранами с учётом влияния параметров внутреннего и наружного воздуха и их верификация с данными эксперимента.

4. Инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции в текущий момент времени и за отопительный период года с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации на основе аппроксимации результатов математического моделирования.

5. Методика определения минимальной температуры воздуха в нерабочее время для помещений с регулируемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций, отличающаяся учетом термовлажностных режимов эксплуатации здания и эффекта от предварительной осушки воздуха.

6. Модель динамического микроклимата для зданий с регулируемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами и фотоэлектрическими батареями и результаты ее применения при создании микроклимата в помещениях различного назначения.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора заключается в разработке новых энергоэффективных светопрозрачных ограждающих конструкций зданий; в сборе, анализе и обработке экспериментальных данных; разработке и верификации моделей теплопередачи через энергоэффективные светопрозрачные конструкции и динамического микроклимата; в разработке патентов и свидетельства на программу для ЭВМ; в разработке метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции; в разработке методики определения минимальной температуры внутреннего воздуха в помещении; в расчете показателей эффективности; в подготовке публикаций по тематике работы.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы и обсуждались на 26 международных и всероссийских конференциях: XIII-XVII, XX, XXI, XXII Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2007-2011, 2014-2016 гг.); V, VI, VIII-XI Международных молодежных научных конференциях «Гинчуринские чтения» (г. Казань, 2010, 2011, 2013-2016 гг.); XIV, XV, XVI, XVIII, XXI Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электро- и тепло-технологии» (Бенардосовские чтения) (г. Иваново, 2007, 2009, 2011, 2015, 2021 гг.); на VIII-XI Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных «Энергия» (г. Иваново, 2013-2016 гг.); на VIII и IX Международных школах-семинарах молодых учёных и специалистов «Энергосбережение – теория и практика» (Москва, 2016, 2018 гг.); на Международной научно-технической конференции «Совершенствование энергетических систем и комплексов» (г. Саратов, 2018).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 25 печатных работах, в том числе в 8 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендован-

ных ВАК, в 5 статьях – в сборниках, индексируемых в международной базе данных SCOPUS; издан 1 учебник. Получены 1 патент на изобретение, 6 патентов на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, трех приложений и содержит 318 страниц основного текста, включая иллюстративный материал. Список литературы содержит 212 источников.



# **1 Энергосбережение при организации микроклимата в помещении. Состояние вопроса**

Среди основных факторов, влияющих на снижение себестоимости продукции, выпускаемой на промышленном предприятии, можно выделить повышение производительности труда и уменьшение материальных затрат, в том числе на топливно-энергетические ресурсы (ТЭР) [60, 109].

Одним из главных приоритетов современной энергетической политики России и ее регионов является повышение эффективности использования ТЭР ускоренными темпами, обеспечивающими динамику снижения энергоемкости валового регионального продукта (ВРП) на 40 % и более к 2035 году, что позволит экономике регионов и страны в целом выйти на энергосберегающий путь развития, повысить свою энергетическую безопасность [152, 155].

По данным Правительства Российской Федерации [155], энергоемкость экономики России с 2008 года по 2018 год снизилась на 9,3 процента (с 10,8 до 9,8 т у.т./млн. рублей валового внутреннего продукта в ценах 2016 года). Основными факторами, которые обеспечили снижение энергоемкости, стали технологический фактор (рост энергоэффективности энергопотребляющего оборудования) и уровень загрузки производственных мощностей. Необходимо отметить, что 28 % всего потенциала энергосбережения сосредоточено в промышленности [97].

## **1.1 Энергоемкость мирового ВВП. Анализ энергоемкости производства в России**

Снижение энергопотребления зданий в условиях постоянного удорожания топлива – актуальная задача для экономики нашей «северной» страны с достаточно холодным климатом, особенно если учитывать наличие сильной конкуренции с иностранными производителями, имеющими сравнительно низкую энергоемкость продукции [113].

Полной энергоемкостью продукции называют величину расхода энергии и (или) топлива на изготовление продукции, включая расход на добычу, транспортирование, переработку полезных ископаемых и производство сырья, материалов, деталей с учетом коэффициента использования сырья и материалов [34]. Энергоемкость внутреннего валового продукта (ВВП) [113, 114] исчисляется как отношение объема потребленных энергоресурсов в экономике на единицу стоимости ВВП.

Согласно данным, взятым из Энергетической стратегии России на период до 2035 года [155], уровни энергоемкости производства важнейших отечественных промышленных продуктов выше (хуже) среднемировых в 1,2-2 раза, а по отношению к лучшим мировым практикам – 1,5-4 раза. Низкая энергетическая эффективность порождает высокую долю расходов на энергоносители в себестоимости, и, как следствие, низкую конкурентоспособность российской продукции.

Согласно данным исследований международной консалтинговой компании «Enerdata» [53], головной офис которой расположен в г. Гренобль, Франция, энергоёмкость ВВП Российской Федерации по состоянию на 2020 год составляла 0,20 кг в нефтяном эквиваленте/дол. США. Если сравнивать данный показатель у стран с сопоставимым холодным климатом (см. рисунок 1.1), то энергоемкость ВВП Канады – 0,17 кг н.э./дол. США (или в 1,18 раза меньше, чем в России). Энергоемкость в США составляет 0,11 кг н.э./дол. США (или в 1,82 раза меньше, чем в России), в Европейском союзе – 0,07 кг н.э./дол. США (меньше в 2,86 раза). Среднемировая энергоемкость составляет 0,11 кг н.э./дол. США (меньше в 1,82 раза). По всей видимости, в России имеет место нерациональное потребление энергии, недостаточное внимание к проблеме энергоэффективности и более холодный климат.



Рисунок 1.1 – Энергоёмкость ВВП по странам, кг н.э./дол. США (данные за 2020 год [53])

Эксперты из Министерства энергетики Российской Федерации отмечают тот факт, что главной проблемой в сфере снижения энергоёмкости производства является значительный нереализованный потенциал организационного и технологического энергосбережения, составляющий до 40 процентов общего объема внутреннего энергопотребления [97]. Согласно существующим оценкам, удельный вес различных составляющих в общей величине указанного потенциала характеризуется следующими данными (см. рисунок 1.2):

- жилые здания – 18÷19 процентов;
- электроэнергетика, промышленность, транспорт – в каждом случае в диапазоне от 13 до 15 процентов;
- теплоснабжение, оказание услуг, строительство – в каждом случае в диапазоне от 9 до 10 процентов;
- производство топлива, сжигание попутного газа, энергоснабжение государственных учреждений – в каждом случае в диапазоне от 5 до 6 процентов;
- сельское хозяйство - 3÷4 процента.

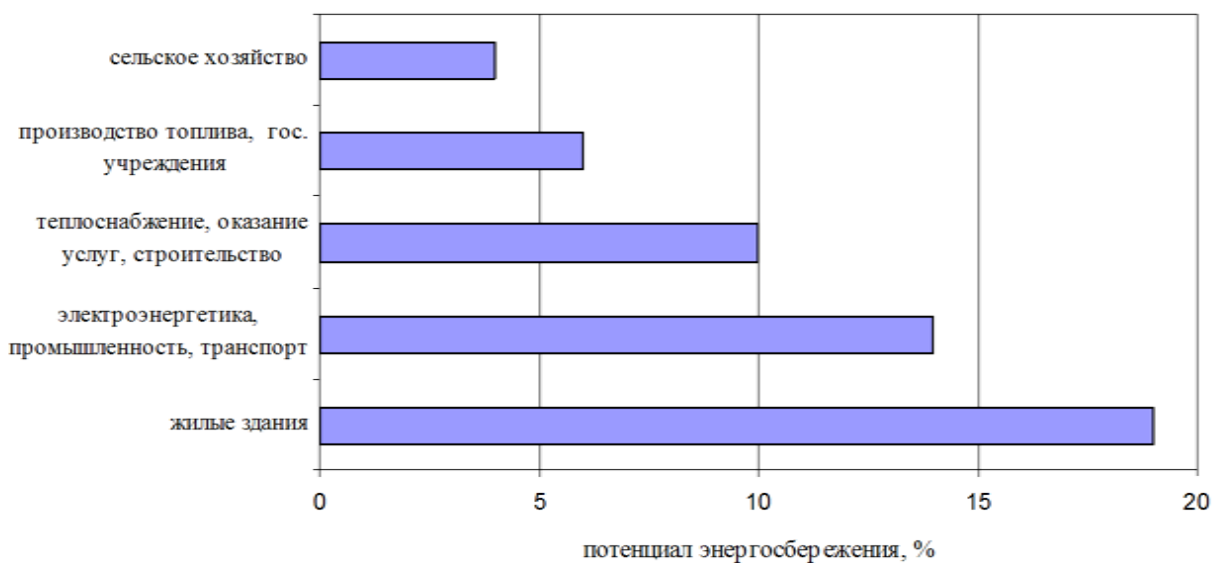


Рисунок 1.2 – Нереализованный потенциал организационного и технологического энергосбережения (оценка)(построено по данным [97]), %

## 1.2 Структура конечного потребления энергии. Анализ потребления топливно-энергетических ресурсов на обеспечение параметров микроклимата в зданиях

Энергия в жилых, общественно-административных и производственных зданиях тратится на компенсацию трансмиссионных потерь через ограждающие конструкции, подогрев воздуха в системах механической вентиляции и на инфильтрацию, подогрев воды на ГВС, искусственное освещение, технологию и т. д. [67, 104, 139].

В исследованиях [13, 144] группы ученых Института энергетической стратегии под руководством В.В. Бушуева отмечается тот факт, что общее потребление первичной энергии в 2010 году составило 7,8 млрд т н.э.. Большая часть потребления энергии относилась к коммунальному и сервисному секторам (3,2 млрд т н.э. или 42 %), мировая промышленность израсходовала 2,4 млрд т н.э. – около трети всего конечного потребления энергии (см. таблицу 1.1, рисунок 1.3). Согласно прогнозам ученых к 2050 году потребление энергии в промышленности достигнет 3,9-4,1 млрд т н.э., увеличившись в 1,6-1,7 раза.

Таблица 1.1 – Конечное потребление энергии в мире по секторам, млрд т н.э. (данные за 2010 год) [144]

Сектор экономики	Годовое потребление энергии
Промышленный	2,2
Коммунальный и сервисный	3,2
Транспортный	2,3
Прочие	0,1
Всего	7,8

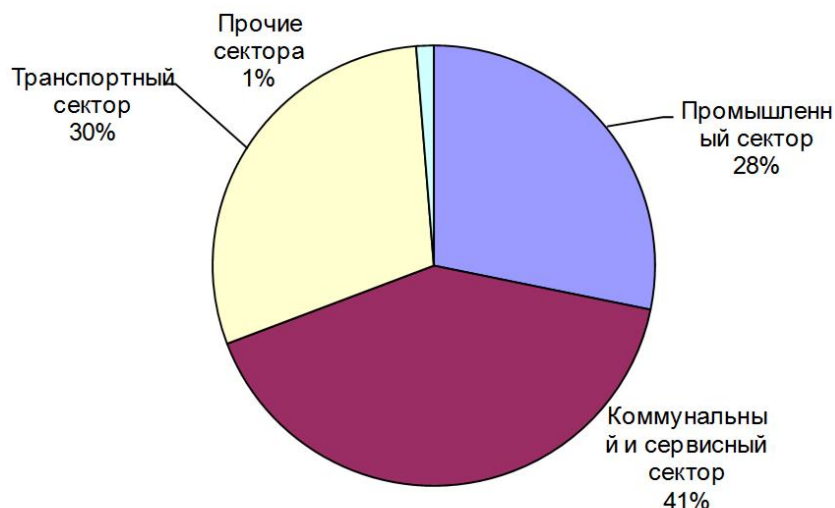


Рисунок 1.3 – Структура конечного потребления энергии в мире [144]

Результаты анализа [144] показывают, что мировое потребление энергии для отопления, вентиляции и кондиционирования составляет 3,4 млрд т н.э. (данные за 2010 год). Эта величина составляет около **40 %** конечного потребления энергии.

Согласно исследований Международного энергетического агентства (МЭА) [167], проведенного на основании данных таких стран как США, Франция, Германия, Италия, Япония, Великобритания, Канада, Испания, Финляндия, Швеция, Ирландия, Греция, Швейцария, Чехия, Южная Корея, Нидерланды, в среднем конечном потреблении энергии (данные за 2017÷2018 гг.) 23 % приходится на промышленность (см. таблицу 1.2, рисунок 1.4), 35 % - на ЖКХ и сервисный сектор, причем в ЖКХ не менее 11 % энергии затрачивается на поддержание необходимых параметров микроклимата в помещениях. Следует отметить, что в исследования МЭА не вошли такие лидеры в области потребления энергии, как Китай,

Индия и Россия. Максимальная доля конечного потребления энергии в промышленности приходится на такие страны, входящие в МЭА, как Япония (40 %), Финляндия (43 %), Швеция (36 %), Германия (29 %).

Таблица 1.2 – Распределение конечного потребления энергии по видам потребителей, %

Вид потребителя	Страна (отчетный год)							Среднее по странам МЭА
	Канада	США	Франция	Германия	Финляндия	Швеция	Япония	
Транспорт	30	40	28	26	18	22	27	<b>35</b>
Производство (промышленность)	25	18	22	29	43	36	40	<b>23</b>
Жилищно-коммунальное хозяйство (в т.ч. на отопление помещений)	17 (11)	20 (9)	29 (20)	29 (20)	22 (15)	26 (16)	17 (6)	<b>21 (11)</b>
Сервисный сектор	10	15	16	13	12	13	14	<b>14</b>
Прочее* (в т.ч. добыча полезных ископаемых)	18 (13)	7 (5)	5	3	5	3 (2)	2	<b>7 (4)</b>

\* - прочее включает в себя сельское хозяйство, добычу полезных ископаемых и строительство



Рисунок 1.4 – Структура среднего конечного потребления энергии среди стран, входящих в обзор МЭА: транс. – транспорт; сервис. – сервисный сектор; ЖКХ – жилищно-коммунальное хозяйство; произв. – промышленность.

В странах Европейского союза большая часть потребляемой энергии также приходится на здания [202]. Так во Франции на энергоснабжение зданий прихо-

дится до 44 % потребляемых ТЭР (см. рисунок 1.5), что представляет собой значительный потенциал для экономии энергии.

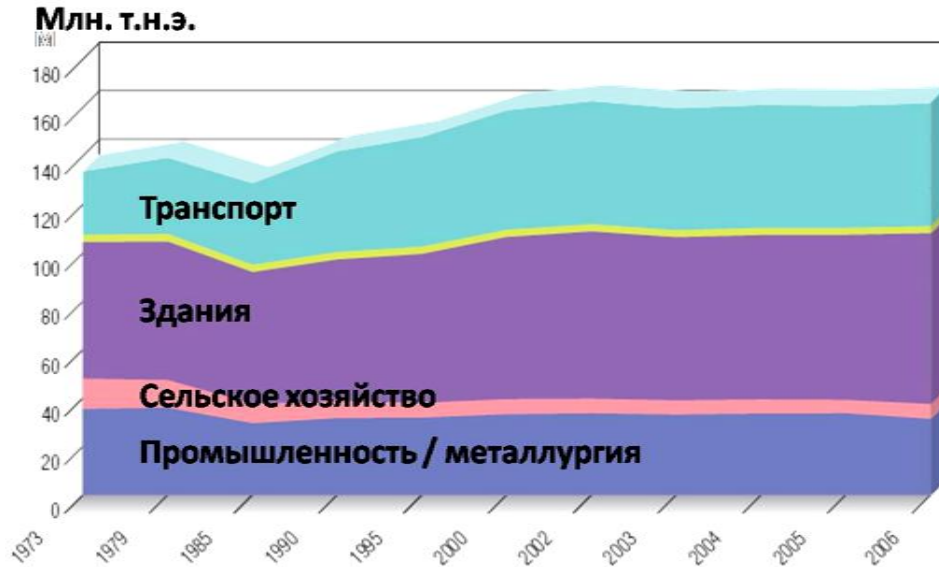


Рисунок 1.5 – Распределение потребления энергии (в млн. тонн нефтяного эквивалента) во Франции с 1973 по 2006 гг.

В ходе стажировок в Национальном институте прикладных наук в г.Страсбурге (INSA de Strasbourg) и Научно-техническом комитете по промышленной климатологии (COSTIC, г. Париж) диссертант сделал вывод о том, что с 1985 по 2002 год во Франции наблюдалось значительное увеличение потребления энергии, особенно на транспорте и в жилом секторе. После 2002 года рост потребления энергии снизился, несмотря на продолжающийся ввод в эксплуатацию новых жилых зданий. Это обусловлено введением более жестких требований по энергосбережению в Европе и во Франции, в частности. Также во Франции сохраняется большая доля зданий, построенных до 2000-ых годов.

Преобладающая доля затрат энергии в ЖКХ у стран, рассмотренных в обзоре МЭА [167], по состоянию на 2019 год приходится на отопление помещений и составляет 52 % (см. рисунок 1.6 и таблицу 1.3); на горячее водоснабжение расходуется 16 % конечного потребления энергии, на бытовую технику – 19 %. Наибольшее потребление энергии в ЖКХ на отопление помещений наблюдается в

странах с холодным климатом, таких как Финляндия (70 %), Германия (69 %), Франция (68 %) и Канада (62 %).

Таблица 1.3 – Распределение конечного потребления энергии в жилищно-коммунальном хозяйстве, %

Тип нагрузки	Страна							Среднее по странам МЭА
	Канада	США	Франция	Германия	Финляндия	Швеция	Япония	
Отопление помещений	62	45	68	69	70	62	25	52
Горячее водоснабжение	19	15	10	15	16	9	27	16
Бытовая техника	10	23	14	11	9	14	38	19
Освещение	4	4	2	2	4	4	-	4
Приготовление пищи	4	3	6	3	1	2	8	4
Охлаждение помещений	1	6	-	-	-	-	2	3
Прочее	-	4	-	-	-	9	-	2

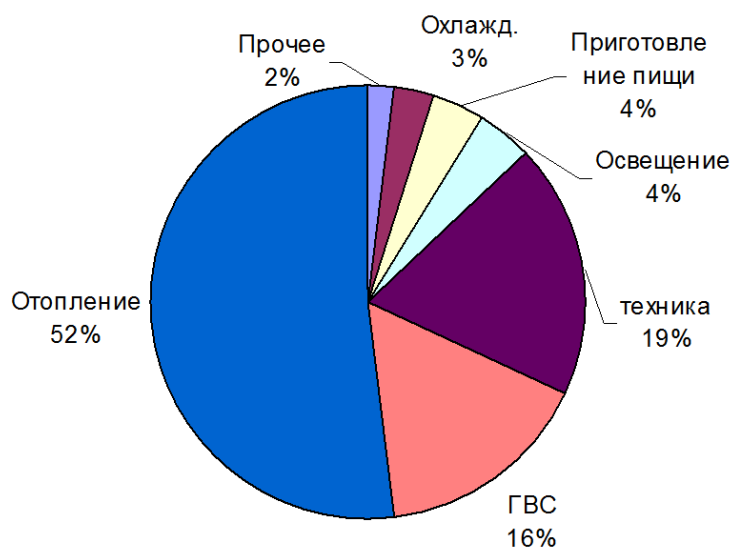


Рисунок 1.6 – Структура среднего конечного потребления энергии в ЖКХ среди стран, рассмотренных в обзоре МЭА [167]

Согласно оценкам экспертов Московского энергетического института [92] по состоянию на 2016 год в РФ затраты на отопление, вентиляцию, кондиционирование воздуха и ГВС составляют примерно 160 млн т. у. т. (20 % топливно-энергетического баланса страны). На отопление расходуется 80 % из вышеуказанных затрат.



Основываясь на данных Федеральной службы государственной статистики России за 2020 год [5], потребление тепловой энергии на Российских обрабатывающих производствах распределилось следующим образом (см. рисунок 1.7): химическое и нефтехимическое производство – 49 %, металлургическое производство – 13 %, машиностроение – 10 %, целлюлозно-бумажное производство – 10 %, пищевая промышленность – 9 %. Значительная доля тепловой энергии расходуется в химическом и нефтехимическом производстве.

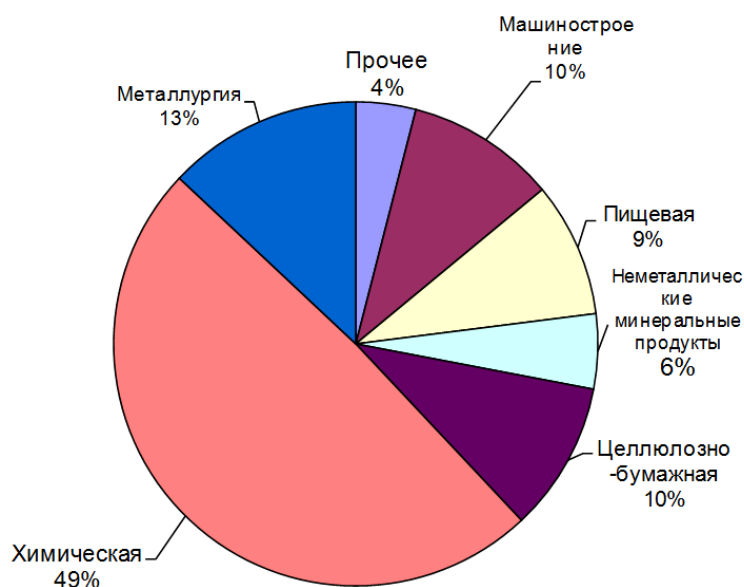


Рисунок 1.7 – Структура потребления тепловой энергии на обрабатывающих производствах в России (данные за 2020 год)

Сенникова О.Б. в работе [110] отмечает, что потребители тепловой энергии на промышленных предприятиях подразделяются на технологические, отопительно-вентиляционные и санитарно-технические (горячего водоснабжения).

Различают сезонных и круглогодичных потребителей: технологические и санитарно-технические потребители относятся к круглогодичным, отопительно-вентиляционные – к сезонным [143].

Существует следующее разделение потребителей по группам. К *первой* группе относятся предприятия, например, легкой промышленности и машиностроения, в структуре затрат тепловой энергии которых более 40 % имеют нагрузки систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха (ОВК) и горя-

чего водоснабжения (ГВС). Соответственно затраты теплоты на технологию составляют менее 60 %. К *третьей* группе относятся предприятия с преобладающей долей затрат тепловой нагрузки на технологические нужды – более 90 %. Затраты теплоты потребителями других категорий очень малы – менее 10 % (таблица 1.4).

Предприятия химической и нефтехимической отраслей относятся ко *второй* и *третьей* группе. Доля пара в структуре суммарного теплопотребления на этих предприятиях находится в диапазоне от 70 до 98%. Другие виды теплофикационных нагрузок – отопительная, вентиляционная и горячего водоснабжения – составляют 2÷30 %.

Таблица 1.4 – Классификация промышленных потребителей (по отраслям) по типам нагрузки [110]

Отрасль промышленности	Группа потребителей	Доля расхода теплоты на технологические процессы, %	Доля расхода теплоты на ОВК и ГВС, %
Машиностроение	1	10÷60	90÷40
Электротехническая	1	50÷60	50÷40
Стройматериалов	1	50÷80	50÷20
Пищевая [43]	1	45÷60	55÷40
Текстильная	2	65÷90	35÷10
Химическая	2	70÷80	30÷20
Нефтеперерабатывающая	3	90÷98	10÷2

Согласно данным ученых Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, а также Института холода и биотехнологий [54] расход теплоты на пищевых предприятиях на технологическое теплопотребление составляет 45÷60 %, горячее водоснабжение – 23÷30 %, отопление и вентиляцию – 10÷25 %, собственные нужды – до 10 %.

Следовательно, можно констатировать, что в структуре затрат топливно-энергетических ресурсов на поддержание необходимых параметров микроклимата в секторе ЖКХ России расходуется более 70 % от общего потребления, в промышленности - от 10 до 90 %, в зависимости от отраслевой принадлежности

предприятия и места его расположения. Преобладающими являются производства с существенным потреблением тепловой энергии на технологические нужды (нефтехимические производства).

На территории Российской Федерации в зданиях производственного и непроизводственного назначения на ОВК расходуется более 70 % энергии, что значительно превышает среднемировые показатели, приводит к высоким значениям энергоёмкости Российской продукции и к снижению конкурентоспособности.

В связи с планируемым увеличением доли продукции машиностроительных, приборостроительных предприятий, а также заводов по производству электроники, с переходом от сырьевой к инновационно-ориентированной экономике (с новым технологическим укладом), с декларируемым импортозамещением можно предположить, что структура потребления ТЭР в промышленности будет претерпевать изменения и больший вес будут иметь предприятия с весомыми затратами на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха (ОВК). Следовательно, снижение затрат ТЭР на системы ОВК является актуальной задачей для достижения цели по уменьшению энергоёмкости отечественной продукции и повышению её конкурентоспособности.

### **1.3 Доля светопрозрачных конструкций в структуре потерь тепловой энергии в зданиях**

Тепловая энергия, затрачиваемая на поддержание необходимых параметров воздуха в помещениях, определяется тепловым и воздушным режимами здания. Затраты теплоты на компенсацию потерь через оболочку здания вследствие теплопередачи (**трансмиссионные потери**) в жилых зданиях значительно превышают расход тепловой энергии на подогрев наружного воздуха, попадающего в помещение как вследствие естественной инфильтрации, так и в результате работы механической вентиляции. В общественно-административных зданиях с большим количеством пребывающих в них людей, а также в производственных помещениях со значительными «вредностями» в виде выделяющихся в ходе технологиче-

ских процессов и жизнедеятельности человека влаги, вредных паров, газов и пыли, затраты теплоты на поддержание штатной работы систем вентиляции и кондиционирования преобладают над трансмиссионными потерями [23, 94, 96]. Данное соотношение во многом зависит от месторасположения зданий, его геометрии и сопротивлений теплопередаче ограждающих конструкции, специфики технологических процессов.

Согласно данным научных сотрудников «ЦНИИЭП жилища» В.С. Беляева и С.К. Есенгабулова [7] значительная доля теплопотерь в жилых зданиях приходится на окна (световые проёмы) (см. таблицу 1.5). Так, для достаточно распространённых 5-этажных жилых зданий (серии 1-511 и 1-447) тепловые трансмиссионные потери через окна составляют от 46 до 54 % среди потерь через наружные ограждающие конструкции.

Таблица 1.5 – Структура теплопотерь 5-этажных жилых зданий (с надстройкой до 7 этажей) (серии 1-511 и 1-447), % [7]

По элементам оболочки		По структуре теплопотерь	
Вид ограждающей конструкции	%	Вид потерь	%
Стены	32-37	Трансмиссионные через оболочку	57-59
Окна (световые проёмы)	46-54	На инфильтрацию (вентиляцию)	41-43
Чердачные перекрытия теплого чердака (серия 1-447)	5	-	-
Покрытия (мансарда) (серия 1-511)	8	-	-
Цокольное перекрытие	7	-	-

В работе [153] приведены расчетные данные по теплопотерям для зимних нормативных условий для 9-ти этажного жилого дома, расположенного в г. Норильске (см. таблицу 1.6).

Таблица 1.6 – Структура теплопотерь 9-этажного жилого здания, расположенного в Норильске

Распределение по элементам оболочки здания, %			
Вид ограждающей конструкции	Трансмиссионные (69 %)	На инфильтрацию (31 %)	Итого
Стены	26	3	29
Окна (световые проёмы)	34	24	58
Покрытия	6	2	8
Цокольное перекрытие	3	2	5

В данном здании на окна также приходятся максимальные относительные затраты как на компенсацию трансмиссионных тепловых потерь (34 %), так и на инфильтрацию (24%). В общей структуре теплотерь окна занимают лидирующую позицию с 58 %, потери через стены составляют только 29 %.

Согласно данным отечественных исследователей Данилова Н.И. [41], Бухмирова В.В., Пророковой М.В. [93], постаравшихся определить усредненные показатели для зданий непромышленного назначения, наибольший потенциал в области энергосбережения также приходится на окна (см. рис. 1.8) и его значение составляет 17,5 %. Потери через окна составляют 35 %.

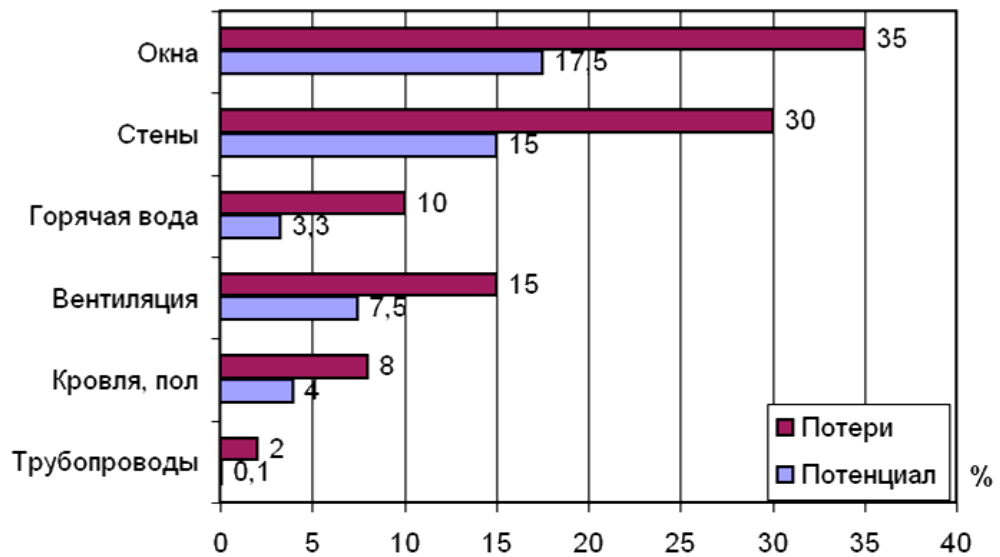


Рисунок 1.8 – Распределение затрат тепловой энергии в зданиях и потенциал энергосбережения, %

В производственных зданиях обычно процент остекления выше, чем в жилых (окна, световые фонари и т.д.) в связи с высокими требованиями в области естественного освещения и промышленной безопасности (легкосбрасываемые конструкции) [128, 129], поэтому и доля в структуре трансмиссионных потерь обычно возрастает и оценивается в пределах 20-60 %. Для специфических производств, таких как тепличные хозяйства, доля тепловых потерь, приходящихся на остекление, составляет более 80 %.

Следовательно, фактические тепловые потери через остекление в жилых, общественно-административных и производственных зданиях составляют значи-

тельную часть в общей структуре тепловых затрат, поэтому к ним должно быть уделено особое внимание при разработке энергосберегающих мероприятий.

#### **1.4 Требования в области энергосбережения и энергоэффективности в зданиях стран Европейского союза**

К лидерам в области проведения последовательной энергетической политики можно отнести Германию, Францию, Великобританию, а также Данию и Словению [111].

В странах Европейского союза (ЕС) действуют стандарты CEN, утверждённые Европейским комитетом по стандартизации (Comite' Europe'en de Normalisation), директивы по энергетической эффективности (Energy Efficiency Directive (EED), тепловые регламенты RT (Réglementation Thermique) в области энергетической эффективности зданий и др.. Юридическим документом в области энергосбережения, обязательным для исполнения во всех стран ЕС, является Директива по энергетическим характеристикам зданий (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD). Более высокие требования EPBD, принятой в 2010 году, и обновленной в 2021 году, должны быть внедрены во всех странах ЕС к 2030 и 2050 годам [111, 168]. Так, энергетические характеристики всех новых зданий с 2021 года должны практически соответствовать значениям характеристик «зданий с нулевым потреблением энергии». К 2050 году должна быть осуществлена декарбонизация экономики. Усиливается роль европейских унифицированных стандартов в национальных законодательствах; усиливается доля использования энергии, полученной из возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [111]. В национальных технических регламентах требования относительно использования ВИЭ различны: так, в Германии данная величина варьируется в диапазоне от 15 до 50 %, в Словении – от 25 до 70 %.

В странах Европы установлены национальные требования к теплозащите зданий, причём постоянно вводятся новые, более высокие теплозащитные харак-

теристики ограждающих конструкций. Следует отметить, что в ряде стран предусматриваются различные значения для жилых и общественных зданий.

Как следует из данных таблицы 1.7, требования к значениям приведенного сопротивления теплопередаче для ограждающих конструкций во многом зависят как от географического местоположения страны, так и от политики энергосбережения: чем ближе к северу расположено государство, тем более высокие значения сопротивления теплопередаче. Так, требуемое сопротивление теплопередаче для окон в южных районах Италии составляет  $0,23 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ , а для Финляндии данный показатель должен быть не менее  $1,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ .

Таблица 1.7 – Требуемые значения приведенного сопротивления теплопередаче для типовых зданий в некоторых европейских странах [111]

Показатель	Франция	Бельгия	Германия		Велико-британия	Италия	Дания	Норвегия	Швеция	Финляндия
Год принятия требований	2005	2008	2009		2010	2010	2006	2007	2008	2010
Тип здания	жилое	жилое	жилое	общ.	общественное	–	–	–	–	–
Коэффициент сопротивления теплопередаче, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$										
стены	2,78	2,0	3,57	3,57/2,86 <sup>1</sup>	5,55	3,03 (1,61) <sup>2</sup>	5,00	5,56	5,56	5,88
кровли	5,00	3,33	5,00	5,0/2,86 <sup>1</sup>	6,67	3,45 (2,63) <sup>2</sup>	5,56	7,69	7,69	11,11
окна	0,42	0,47	0,77	0,77/0,53 <sup>1</sup>	0,67	0,5 (0,23) <sup>2</sup>	0,67	0,83	0,76	1,0
пол	3,70	1,11	2,86	2,86/2,86 <sup>1</sup>	4,76	3,12 (1,54) <sup>2</sup>	6,67 (8,33) <sup>3</sup>	6,67	6,67	5,88

<sup>1</sup> Для температуры внутреннего воздуха соответственно  $> 19 \text{ °C} / < 19 \text{ °C}$ .

<sup>2</sup> Пороговое значение для самых теплых климатических зон Италии.

<sup>3</sup> При использовании теплых полов.

Особое внимание в национальных требованиях по теплозащите также уделяется вопросам, связанным с расчётом «мостиков холода» и герметичностью ограждающих конструкций [111].

В рамках тематики данного исследования следует указать и нормируемые значения приведенного сопротивления теплопередаче для светопрозрачных конструкций, устанавливаемый тепловыми регламентами (RT), например, для Франции в период с 1974 по 2020 года [202] (табл. 1.8).

Таблица 1.8 – Требования к нормируемому сопротивлению теплопередачи  $R_o$  для светопрозрачных конструкций во Франции

Технический регламент	Описание окна	$R_o, (m^2 \cdot ^\circ C) / Вт$
RT 1974	Одинарное остекление	0,17
1975-2000	Двойное остекление	0,34
RT 2005	Двойное остекление	0,42
RT 2012	Двойное остекление с теплоотражающим покрытием	0,72
Пассивный дом, EPBD (2020 год)		1,67÷2,0

Из данных таблицы 1.8 следует, что с 2020 года в строящихся зданиях с нулевым потреблением энергии должны быть установлены окна с минимальным сопротивлением теплопередаче **от 1,67 до 2,0 ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт.**

Необходимо сделать вывод, что в странах ЕС на протяжении многих лет проводят планомерную политику по снижению энергопотребления в зданиях с целью снизить расходы граждан на коммунальные платежи, повысить конкурентоспособность продукции и снизить энергозависимость от стран-экспортеров ТЭР.

### **1.5 Требования в области энергосбережения и энергоэффективности для зданий в Российской Федерации**

В Российской Федерации в последние 15 лет заметно активизировалась законотворческая деятельность в области требований по повышению энергоэффективности и энергосбережению в зданиях.

Так, были приняты Федеральный закон "Об энергосбережении..." от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ [147], приказ Минрегионразвития от 28 мая 2010 года № 262 [88], Постановление Правительства РФ от 25 января 2011 г. №18 (с изменениями и дополнениями) [87], приказ Минстроя России от 17.11.2017 г №1550/пр [90], Свод правил СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [127] и прочие нормативные акты. К сожалению, в вышеуказанных документах присутствуют некоторые противоречия относительно друг друга, и по мнению вице-президента НП «АВОК», Государственного эксперта энергоэффективности проектной доку-



ментации в строительстве, к.т.н. В.И. Ливчака СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [127] «рекомендует увеличение потребления тепловой энергии на отопление по сравнению с действующим до него СНиПом» [63].

Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении..." [147] предусматривает наличие у крупных потребителей топливно-энергетических ресурсов, организаций с участием государства, а также организаций, связанных с добычей, передачей и распределением топливно-энергетических ресурсов, паспорта потребителя топливно-энергетических ресурсов, составляемого по результатам энергетического обследования, а также плана мероприятий по сокращению потребления топливно-энергетических ресурсов с указанием объемов и источников финансирования – программы энергосбережения [93].

Для снижения потерь ТЭР при их производстве, передаче и использовании, а также применения энергоэффективных режимов эксплуатации объектов необходимо внедрять энергосберегающие мероприятия. Стимулирование деятельности по данному направлению осуществляется, с одной стороны, путем установления ответственности за несоблюдение требований законодательства в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности [147]. С другой стороны, при реализации мер, направленных на повышение эффективности использования энергетических ресурсов, осуществляется государственная поддержка [93]: льготное кредитование, налоговые льготы, стимулирование производства энергосберегающей продукции и технологий, субсидирование энергоэффективного производства и строительства и т.д.

В Постановлении Правительства РФ №754 «Об утверждении Правил предоставления субсидий на реализацию региональных программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности» [86] утверждены Правила предоставления субсидий из федерального бюджета бюджетам субъектов Федерации на софинансирование расходных обязательств, связанных с реализацией региональных программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, начиная с 2015 года. Указанные субсидии предоставляются (в том числе организациям, реализующим энергосервисные контракты) на

возмещение части затрат на приобретение оборудования, затраты на оплату процентов по кредитам, затраты по лизинговым платежам, а также разработку схем теплоснабжения, проведение научно-исследовательских работ, формирование информационных систем в области энергосбережения.

Согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [127] при проектировании тепловой защиты строящихся или реконструируемых зданий нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции,  $R_0^{TP}$ , ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт определяется исходя из градусо-суток отопительного периода (ГСОП), вида здания и ограждающей конструкции. Например, для окон большинства зданий (за исключением производственных с сухим или нормальным режимом) в северных регионах страны с ГСОП, большим 12000  $^\circ C \cdot \text{сут}/\text{год}$ ,  $R_0^{TP}$  должен быть не ниже 0,8 ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт (см. рисунок 1.9).

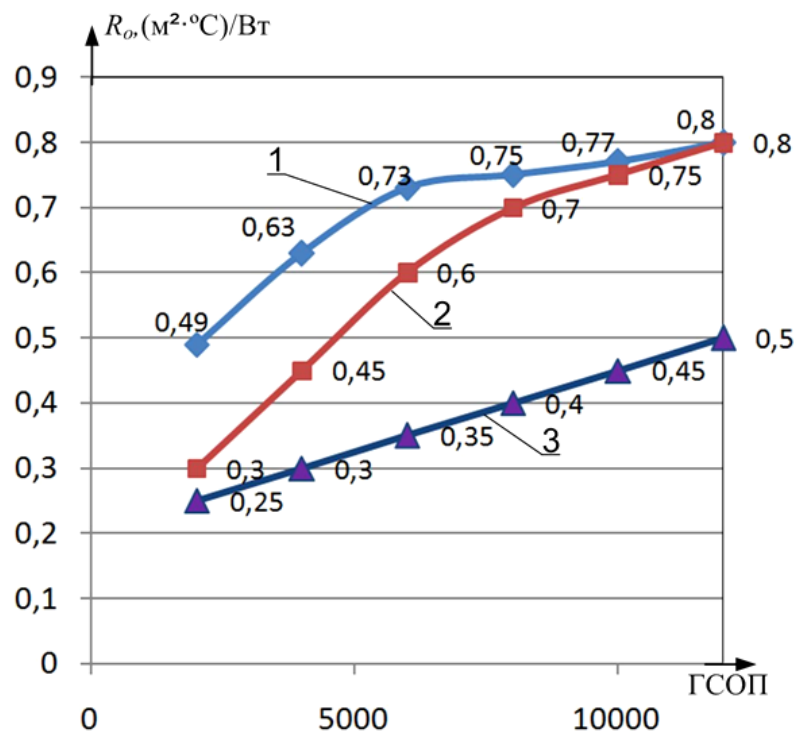


Рисунок 1.9 – Зависимость нормируемого сопротивления теплопередаче окон  $R_0^{TP}$  от ГСОП: 1 – жилые, гостиницы, общежития, общественные, административные и бытовые; 2 – дошкольные образовательные учреждения, школы, медицинские организации и интернаты; 3 – производственные с сухим и нормальным режимом

В приказе Минстроя России от 17.11.2017 г №1550/пр [90] требования к теплозащите конструкций и к потреблению энергии зданием еще более повышаются. Требования должны выполняться при проектировании, экспертизе, строительстве, вводе и эксплуатации построенных, реконструированных или прошедших капитальный ремонт отапливаемых зданий, строений, сооружений.

Требования энергетической эффективности должны предусматривать уменьшение показателей (см. рисунок 1.10):

а) для вновь создаваемых зданий, строений, сооружений с 1 января 2018 г. – не менее чем на 20 процентов по отношению к базовому уровню, с 1 января 2023 г. – не менее чем на 40 процентов по отношению к базовому уровню, **с 1 января 2028 г. – не менее чем на 50 процентов** по отношению к базовому уровню;

б) для реконструируемых или проходящих капитальный ремонт зданий (за исключением многоквартирных домов), строений, сооружений **с 1 января 2018 г. – не менее чем на 20 процентов** по отношению к базовому уровню.

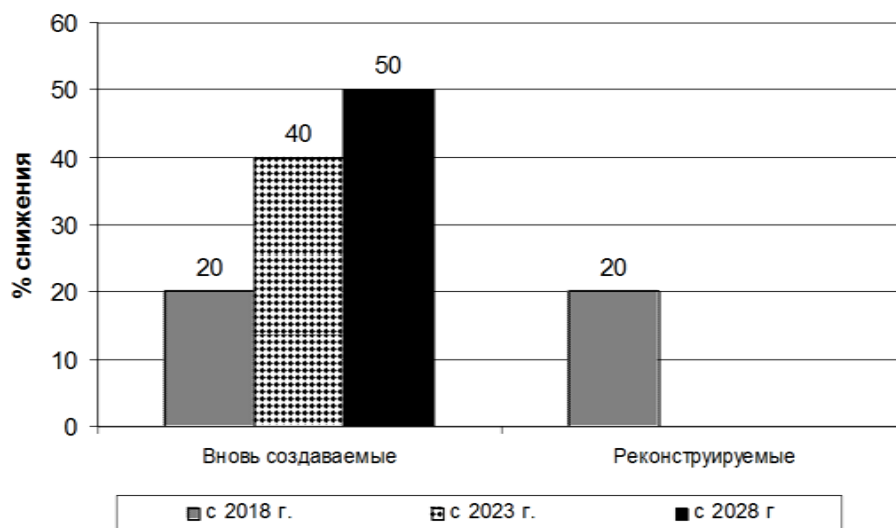


Рисунок 1.10 – Уменьшение показателей, в %, характеризующих годовую удельную величину расхода энергетических ресурсов в здании, строении, сооружении, по годам относительно базового уровня согласно [87, 90]

В Приказе Минстроя России от 17.11.2017 г №1550/пр также рекомендуется с 1 января 2023 года для проектируемых, реконструируемых, капитально ре-

монтируемых зданий, строений, сооружений, за исключением многоквартирных домов (при наличии технической возможности и технико-экономического обоснования) устанавливать в инженерные системы этих объектов возобновляемые и альтернативные источники энергии и вторичных энергоресурсов, определенные в ГОСТ Р 54531-2011 "Нетрадиционные технологии. Возобновляемые и альтернативные источники энергии. Термины и определения" [35], при этом обеспечивая удельное поступление энергетических ресурсов от указанных источников в инженерные системы зданий, строений, сооружений не менее  $10 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$  в год - с 1 января 2023 года и не менее  $20 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$  в год - с 1 января 2028 года. Данное требование созвучно с европейскими требованиями по строительству "пассивных" зданий. В приказе приводятся и данные по базовым удельным характеристикам расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию для зданий (см. рисунок 1.11).

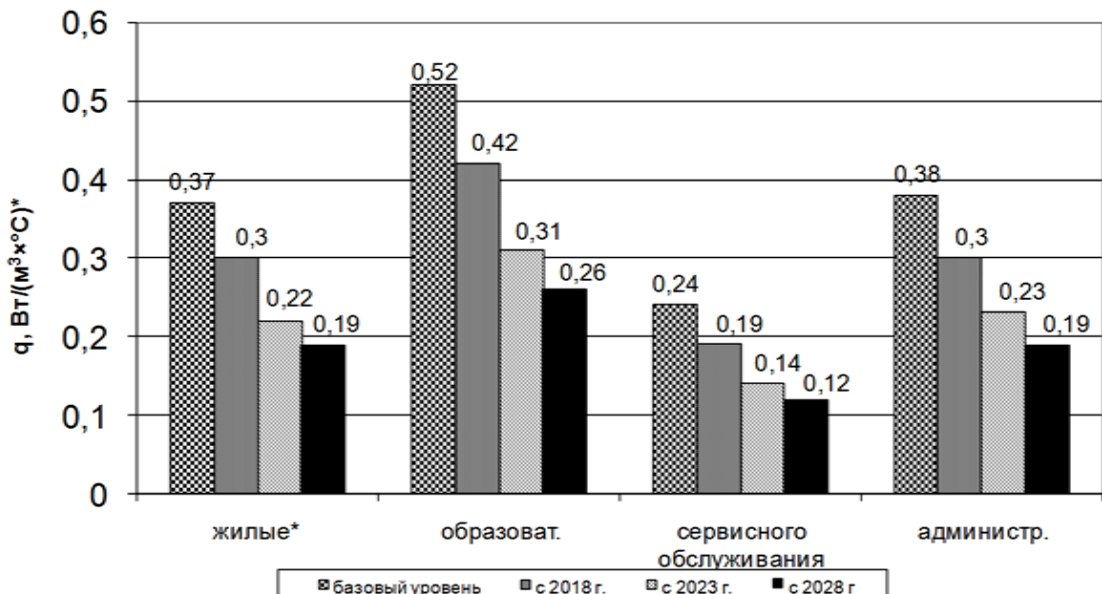


Рисунок 1.11 – Изменение нормируемой удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию  $q_{от+вент}^{mp}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{C})$ , для отдельных видов зданий (3 этажа) на период с базового по 2028 гг. согласно приказа Министра России от 17.11.2017 г. №1550/пр [75]; \* – для жилых зданий  $q_{от+вент}^{mp}$  приведена  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$

Необходимо отметить, что для достижения данных показателей предлагается перечень типовых энергосберегающих мероприятий [77, 88, 89, 90].

В Правилах определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов, утвержденных Приказом Минстроя РФ от 06.06.2016 N 399/ПР [91], помимо разъяснений по порядку присвоения класса эффективности (см. таблицу 1.9), также приводятся и данные по базовому уровню удельного годового расхода энергетических ресурсов в многоквартирном доме (далее МКД), отражающему суммарный удельный годовой расход тепловой энергии на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение, а также на общедомовые нужды, многоквартирных жилых домов.

Таблица 1.9 - Классы энергетической эффективности

Обозначение класса энергетической эффективности	Наименование класса энергетической эффективности	Величина отклонения значения фактического удельного годового расхода энергетических ресурсов от базового уровня, %
A++	Высочайший	- 60 включительно и менее
A+	Высочайший	от - 50 включительно до - 60
A	Очень высокий	от - 40 включительно до - 50
B	Высокий	от - 30 включительно до - 40
C	Повышенный	от - 15 включительно до - 30
D	Нормальный	от 0 включительно до - 15
E	Пониженный	от + 25 включительно до 0
F	Низкий	от + 50 включительно до +25
G	Очень низкий	более + 50

Таким образом, в России, как и в Европе, наблюдается значительное повышение требований по снижению потребления ТЭР на энергообеспечение зданий. При запланированном в Российской Федерации снижении потребления ТЭР на 50 % к 1 января 2028 года актуальной задачей является разработка новых энергосберегающих мероприятий, с учетом комплексного подхода к энергообеспечению зданий. Необходимо отметить, что в последние годы государственные органы власти стали предоставлять субсидии на реализацию энергосберегающих мероприятий, особо в условиях высоких значений стоимости материалов и оборудования и процента банковского кредита. К сожалению, вследствие увеличения тре-

бований в области энергосбережения вплоть до 2028 года, себестоимость строительства и цена 1 квадратного метра будет увеличиваться.

### **1.6 Энергосберегающие мероприятия при организации микроклимата в зданиях промышленных предприятий**

В настоящее время можно выделить два наиболее распространенных направления энергосбережения и повышения энергетической эффективности [93]:

- сокращение потерь энергетических ресурсов при их производстве, передаче и использовании;
- использование энергоэффективных режимов эксплуатации объектов и оборудования.

Согласно ГОСТ 12.1.005-88\* "Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны" [26] под микроклиматом производственных помещений понимаются такие условия воздушной среды этих помещений, которые определяются действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха и теплового излучения.

В соответствии с СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» [130], основной целью функционирования систем, обеспечивающих условия для нахождения человека в помещении (систем отопления, вентиляции и кондиционирования), является поддержание заданных значений параметров микроклимата. При этом с точки зрения находящегося в помещении человека:

- система вентиляции должна обеспечивать допустимые метеорологические условия и чистоту воздуха в обслуживаемой или рабочей зоне, в том числе организацию воздухообмена в помещении для удаления избытков теплоты, влаги, вредных и других веществ;
- система кондиционирования должна в автоматическом режиме обеспечивать, главным образом, оптимальные метеорологические условия;

– система отопления должна поддерживать нормируемую температуру воздуха.

Комфортное кондиционирование обеспечивает микроклимат, благоприятный для труда и отдыха людей, а также для их нормального самочувствия [96].

Технологическое кондиционирование обеспечивает микроклимат, необходимый для проведения технологических процессов, сохранности оборудования, материалов, художественных и музейных ценностей.

Анализ литературы в области энергосбережения показал, что в настоящее время необходимо выделить четыре основных направления научных исследований при разработке энергосберегающих мероприятий при организации микроклимата в зданиях промышленных предприятий:

– Повышение тепловой защиты зданий путем улучшения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций;

– Использование энергоэффективного оборудования и технологий при организации работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования;

– Использование инновационных решений в автоматической системе регулирования микроклимата и учета потребленных энергоресурсов;

– Использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Основные технологии повышения тепловой защиты стен приводят в работах [15, 69, 104, 139, 141, 161] В.Г. Гагарин, В.И. Ливчак, Е.Г. Малявина, В.К. Савин, Ю.А. Табунщиков, Н.В. Шилкин. К данным технологиям относят использование стеновых панелей с эффективным утеплителем промышленного изготовления; применение конструкции стены из мелкоштучных изделий, с утеплением теплоизоляционными материалами, такими как каменная вата, пенополистирол и т.д., и с облицовкой из кирпичной кладки; размещение с наружной стороны стены системы скрепленной теплоизоляции с тонким штукатурным слоем; монтаж навесных фасадных систем с вентилируемой воздушной прослойкой.

Особое внимание по мнению М.М. Бродач и Ю.А. Табунщикова [138, 141] необходимо уделить вопросу снижения количества креплений теплосберегающих конструкций к несущим стенам (так называемые «мостики холода»), форме и

ориентации зданий, использованию эффективных уплотнителей для герметизации зданий, применению теплоотражающих экранов за отопительными приборами.

Одним из перспективных направлений улучшения тепловой защиты непрозрачных ограждающих конструкций является использование новых тонкопленочных жидко-керамических покрытий (ЖКП), состоящих из полых микросфер в связующем вязком материале, которые имеют физические свойства красок, но с пониженным значением коэффициента теплопроводности. В.В. Бухмиров, А.К. Гаськов в своих экспериментальных исследованиях [10] на лабораторном стенде и в реальных условиях эксплуатации установили целесообразность использования данных материалов для теплоизоляции трубопроводов, стен, а также установили, что коэффициент теплопроводности  $\lambda$  энергосберегающих красок значительно зависит от их состава и температуры: значение коэффициента  $\lambda$  краски с использованием полых стеклянных микросфер марки МС-В2Л производства НПО «Стеклопластик» (Московская обл.) варьировалось в диапазоне от 0,014 до 0,037 Вт/(м·К) при изменении средней температуры образца от 24 до 89 °С, массового содержания микросфер в связующем акриле от 0 до 32,6 %.

А.Н. Жуков, А.Г. Перехоженцев [49] провели исследования по определению снижения теплопотерь и теплопоступлений при нанесении на поверхность кровли теплоизоляционного покрытия на основе жидкого керамического утеплителя «Корунд» толщиной 2 мм. Теплопотери снизились в 1,6 раза при нанесении ЖКП.

Д. Божсаки (D. Bozsaky) в работе [160] также установил значительное занижение (в 7,2÷8,5 раз) заявленных производителями ЖКП значений теплопроводности этих материалов от результатов проведенного им эксперимента.

Основные направления повышения тепловой защиты светопрозрачных конструкций (окон, фонарей и т.д.) представлены в подразделе 1.7.

Значительный объем научно-исследовательских публикаций посвящен вопросам использования энергоэффективного оборудования и технологий при организации работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования.



Одним из основных энергосберегающих мероприятий является технология утилизации теплоты наружного и вытяжного воздуха, в том числе с применением рекуператоров, теплонасосных установок (ТНУ), камеры смешения.

И.А. Зайцева, В.А. Емелин, В.Н. Федосеев, С.В. Федосов [148] предлагают использовать универсально-комбинированной воздушный тепловой насос (ВТН) со встроенными солнечным коллектором, теплым полом, горячим водоснабжением, фанкойлом. Разработанный ВТН предоставляет возможность его широкого использования (климат-контроля) для отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования, осушения и увлажнения воздуха в помещении. Авторами описан процесс перевода ВТН из режима теплоснабжения в режим холодоснабжения. В работе [149] И.А. Зайцева, В.Н. Федосеев, С.В. Федосов с помощью метода анализа иерархий выполнено моделирование тепломассопереноса в воздушных теплонасосных системах с целью энергоресурсосберегающих решений. Многокритериальный анализ позволил установить взаимосвязь между основными термодинамическими и теплофизическими параметрами, которые оказывают существенное влияние на повышение интенсивности тепломассопереноса в испарительно-конденсационном блоке при выборе эффективной модели ВТН.

А.Б. Гаряев, С.П. Манчха, Парёхина И.В., В.Ю. Самойленко, И.В. Яковлев [156, 107] исследовали эффективность применения теплового насоса для глубокой утилизации теплоты вентиляционного воздуха в плавательном бассейне НИУ «МЭИ». Функциональная схема установки приведена на рисунке 1.12.

При охлаждении влажного вытяжного воздуха в воздухоохладителе ниже температуры точки росы происходит процесс конденсации, при этом выделяется так называемая «скрытая» теплота конденсации. Если данная теплота полезно используется, то происходит глубокая утилизация теплоты влажных газов.

В ходе проведения экспериментальных исследований и численного моделирования [156, 107] было установлено, что коэффициент преобразования ТНУ существенно зависит от температуры фреона на выходе из конденсатора, причем его значение для фреона R410A достигает 4,5 единиц. Выбор хладагента и при-

менение переохладителя в цикле ТНУ не оказывает значительного влияния на энергопотребление системы.

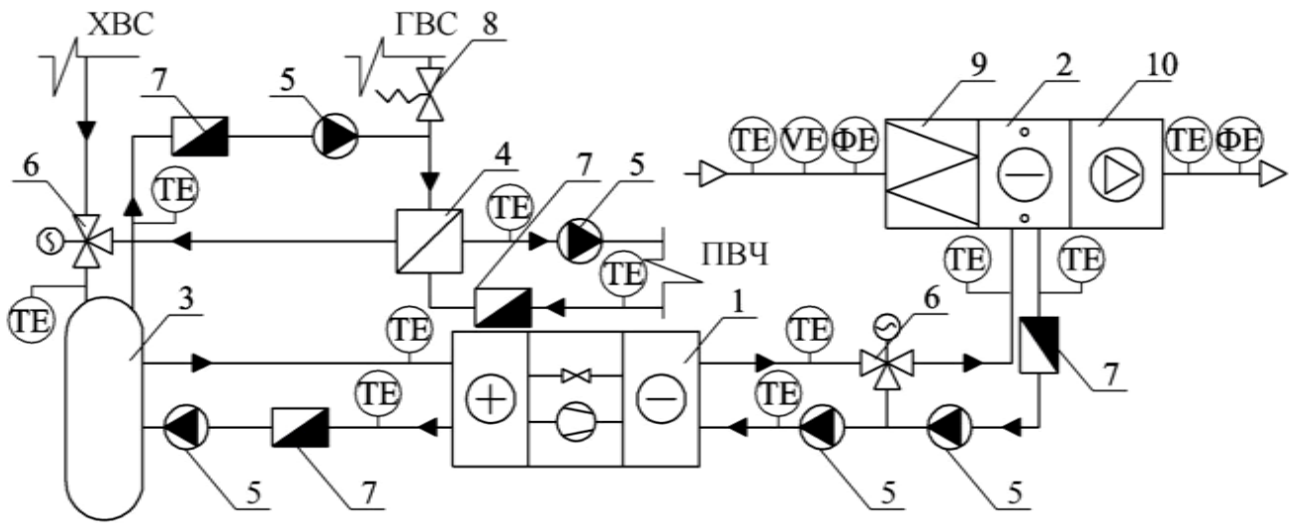


Рисунок 1.12 – Функциональная схема лаборатории для исследования процессов утилизации теплоты НИУ МЭИ»: 1 – теплонасосная установка; 2 – воздухоохладитель (трубчатый оребренный теплообменник); 3 – буферный бак накопитель; 4 – промежуточный теплообменник (пластинчатый теплообменник); 5 – циркуляционный насос; 6 – смешивающий клапан с электроприводом; 7 – расходомер; 8 – клапан; 9 – фильтр карманный; 10 – вентилятор

Среднее снижение расхода условного топлива для наиболее энергоэффективной схемы с ТНУ, утилизатором с промежуточным теплоносителем и второй рециркуляции [107] составит 68 % в зависимости от климатического района расположения объекта.

А.В. Мартынов, М.Н. Степаненко, А.Я. Шелгинский [133] произвели численное моделирование и расчет экономической эффективности работы систем вентиляции при различных схемах их организации и выявили, что в схемах, где для утилизации теплоты используется ТНУ, существует лучшее распределение тепловой нагрузки между ТНУ, теплоутилизатором и другими воздухоподогревателями при котором достигаются наилучшие значения технико-экономических показателей.

А.В. Гаранин, В.К. Пыжов [17, 19, 20] подробно на основе численного моделирования исследовали эффективность утилизации теплоты вытяжного воздуха

с помощью рециркуляции и использования теплообменника-рекуператора. Была выявлена ограниченность применения теплообменника-рекуператора: для заданных условий моделирования при температурах наружного воздуха ниже минус 8 °С возникает опасность замерзания поверхности нагрева со стороны выхода внутреннего воздуха. При наружной температуре выше +5 °С происходит падение температурного напора в рекуператоре, и эффективность его использования становится минимальной. Годовая экономия теплоты в случае применения рециркуляции составила 89,7%, рекуператора – 16,7%.

Важным мероприятием по снижению потребления топливно-энергетических ресурсов является использование прерывистого режима отопления и понижения температуры внутреннего воздуха в нерабочее время.

Действующие положения свода правил СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» [130] в холодный период года в помещениях отапливаемых зданий (кроме помещений, для которых параметры воздуха установлены другими нормативными документами), когда они не используются и в нерабочее время, позволяют снижать температуру внутреннего воздуха ниже нормируемой, но не ниже 15 °С – в жилых помещениях; 12 °С – в помещениях общественных и административно-бытовых зданий; 5 °С – в «сухих» производственных помещениях. При установлении значений минимальной температуры воздуха в [130] недостаточно рассмотрены вопросы, связанные с влажностным режимом эксплуатации различных помещений, хотя требования свода правил СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [127] не разрешают образование конденсата на внутренних поверхностях ограждающих конструкций.

Периодический режим работы системы отопления применяют в производственных, гражданских, учебных, спортивных, торговых, административных зданиях, используемых для работы неполные сутки и дни недели, в которых допускается снижение температуры внутри помещений в нерабочее время. В режиме работы системы отопления в течение суток наблюдаются три характерных промежутка времени [43]:

- основной рабочий режим, когда в помещении поддерживаются заданные параметры температуры и влажности;
- дежурный режим, когда после основного режима система отопления переводится на режим поддержания пониженной температуры в помещении;
- режим форсированного нагрева помещения (натоп), в течение которого система отопления переводится на возможно быстрый разогрев помещения после охлаждения.

Вопросы, связанные с разогревом помещения перед началом рабочей смены, рассматривались М.М. Бродач и Ю.А. Табунщиковым [140, 141]. Было выявлено, что разогрев помещений должен производиться с использованием максимальной мощности отопительного оборудования, необходимо начинать с разогрева наиболее теплоемких частей помещения. Проведенные экспериментальные исследования выявили высокие величины экономии энергии (более 50 %) при оптимальном управлении ее расхода при организации дежурного режима отопления.

Л.Б. Директор в ходе численного моделирования микроклимата в помещениях различного назначения установил [46], что потенциал энергосбережения за счет суточного регулирования тепловой нагрузки при организации динамических режимов отопления зданий составляет 25÷30 %. Эффективность суточного регулирования температуры во многом зависит от технических возможностей схемы отопления, прежде всего, от предельной мощности калориферных установок.

Т.А. Дацюк, Ю.П. Ивлев, В.А. Пухкал [43], Л.Н. Данилевский [40] выполнили численное моделирование нестационарных процессов теплообмена в помещении при прерывистом отоплении. Моделирование осуществлялось для помещения с притоком наружного воздуха через вентиляционные клапаны и отопительными приборами различного типа (конвектор и радиатор). Были определены графики изменения температур в помещении в течении суток, а также установлено, что наиболее энергоэффективными отопительными приборами при формировании прерывистого режима отопления являются устройства, обладающие наименьшей тепловой инерционностью. Было выявлено, дополнительная мощность системы отопления зависит от теплоаккумулирующей способности здания,

воздухообмена во время разогрева помещения, величины снижения температуры внутреннего воздуха по отношению к расчетной, времени разогрева.

Е.Ю. Анисимова, А.Б. Дегтярь, В.И. Панферов, С.В. Панферов [3, 45, 79] установили, что применение режима прерывистого отопления в зданиях, подключенных к центральным тепловым сетям, нецелесообразно. Для проведения вычислений по определению оптимальных режимов отопления в разработанной авторами программе задавали следующие исходные данные: теплотехнические и геометрические параметры здания, параметры внутреннего воздуха, минимально допустимую температуру внутреннего воздуха (рекомендуется принимать  $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), продолжительность нерабочего периода, параметры наружного воздуха, располагаемую мощность системы отопления. Интенсивный натоп здания на конечном участке нерабочего времени экономит до  $30\div 55\%$  (см. рисунок 1.13, б).

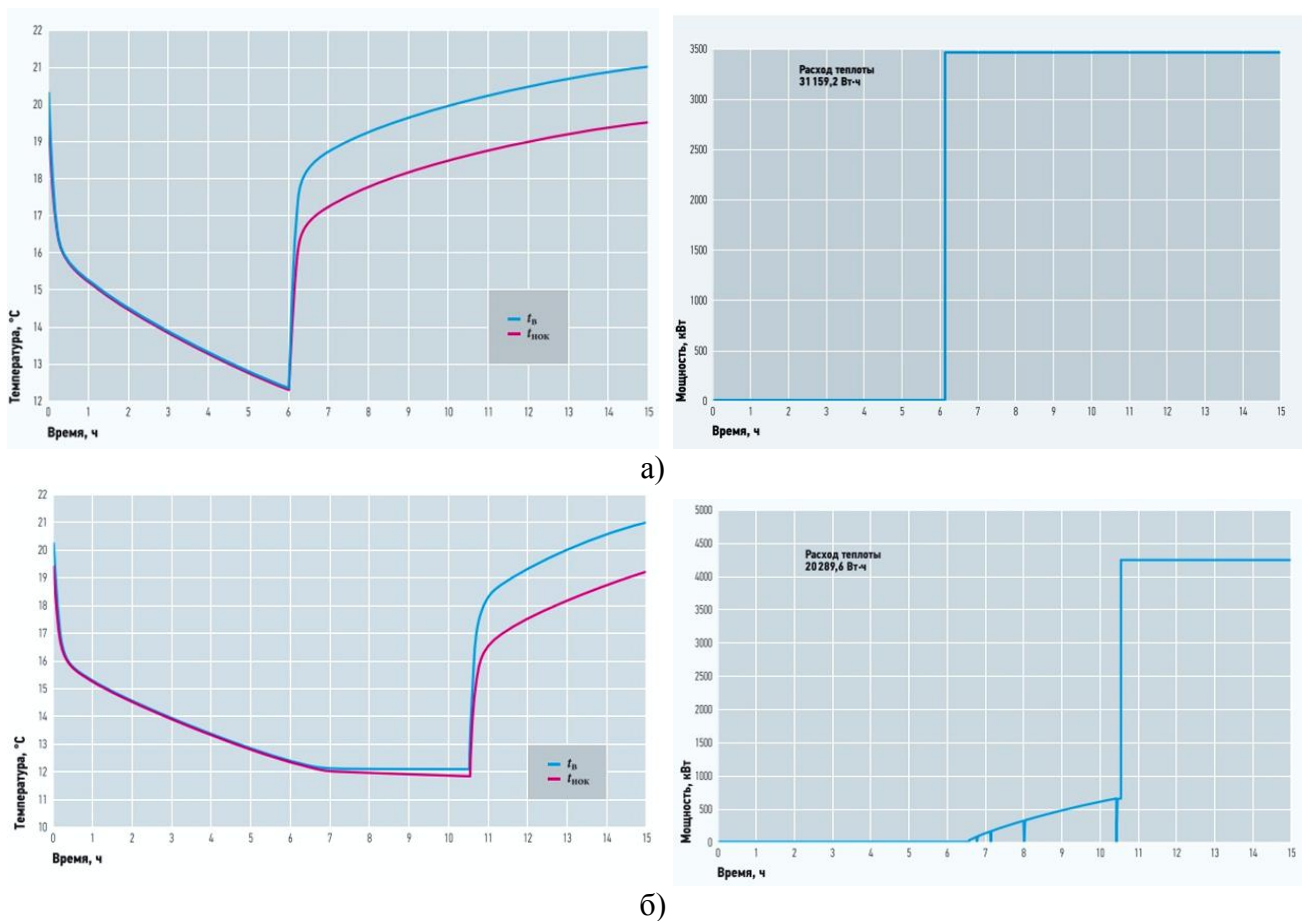


Рисунок 1.13 – Изменение температуры внутреннего воздуха  $t_{\text{в}}$ , внутренней поверхности наружного ограждения  $t_{\text{нoк}}$  и мощности системы отопления  $Q$  при первом (а) и втором (б) режиме управления тепловой мощностью во время натопа [79]

Важным энергосберегающим направлением при организации микроклимата в зданиях является рациональное использование солнечной энергии (инсоляции).

В теплый период инсоляция, поступающая в помещения, приводит к значительным избыткам теплоты и является причиной дополнительных затрат на охлаждение помещения. Проблеме снижения инсоляции через светопрозрачные конструкции посвящено достаточно много исследований, особенно среди зарубежных исследователей.

М. Дэвид (M. David), М. Донн (M. Donn), Ф. Гард (F. Garde), А. Ленуа (A. Lenoir) в работе [165], а также ученые Американской национальной исследовательской лаборатории имени Л. Беркли под руководством Д.Ч. Курция (D.Ch. Curcija) в [164] рассматривают различные виды и варианты размещения солнцезащитных устройств, в том числе жалюзи, ставни, шторы, маркизы и т.д., а также их влияние на снижение инсоляции. Л.С. Чэн (L. S. Chan) в [162] приводит результаты исследований по изучению влияния использования солнцезащитных устройств в светопрозрачных ограждающих конструкциях на энергетические затраты при организации работы системы кондиционирования зданий. Наиболее целесообразно использовать с точки зрения регулирования естественного освещения металлические жалюзи с электроприводом ламелей.

По мнению В.И. Римшина, С.А. Семина, А.В. Спиридонова, И.Л. Шубина [131] для широкого внедрения солнцезащитных устройств в нашей стране, прежде всего необходимо разработать нормативные документы по применению таких устройств в строительстве. В 2018 году при участии вышеуказанных ученых был введен в действие СП 370.1325800.2017 «Устройства солнцезащитные зданий. Правила проектирования» [125], устанавливающий основные требования к солнцезащитным устройствам (далее – СЗУ), изготовленным с применением различных материалов, при их размещении на наружных ограждающих конструкциях в местах расположения окон, навесных светопрозрачных фасадных систем, внутри помещений и в межстекольном пространстве.

Результаты исследований различных научных групп по изучению влияния СЗУ на снижение инсоляции в помещении были обобщены в СП 23-101-2004

«Проектирование тепловой защиты зданий» [124]. В данном документе приведены значения коэффициентов теплопропускания солнцезащитных устройств в зависимости от места их установки и конструкции (см. таблицу 1.10). Наименьшим значением коэффициента теплопропускания обладают СЗУ, установленные со стороны окружающей среды. Коэффициент теплопропускания солнцезащитного устройства – отношение количества тепла, проходящего через световой проем с солнцезащитным устройством, к количеству тепла, проходящего через этот световой проем без солнцезащитного устройства.

Таблица 1.10 – Коэффициент теплопропускания солнцезащитных устройств

№ п.п.	Солнцезащитные устройства	Коэффициент теплопропускания солнцезащитных устройств
А. Наружные		
1	Штора или маркиза из светлой ткани	0,15
2	Штора или маркиза из темной ткани	0,20
3	Ставни-жалюзи с деревянными пластинами	0,10/0,15
4	Шторы-жалюзи с металлическими пластинами	0,15/0,20
Б. Межстекольные (непроектируемые)		
5	Шторы-жалюзи с металлическими пластинами	0,30/0,35
6	Штора из светлой ткани	0,25
7	Штора из темной ткани	0,40
В. Внутренние		
8	Шторы-жалюзи с металлическими пластинами	0,60/0,70
9	Штора из светлой ткани	0,40
10	Штора из темной ткани	0,80

**Примечание**

Коэффициенты теплопропускания: до косой черты – для солнцезащитных устройств с пластинами под углом 45°, после черты – под углом 90° к плоскости проема.

В последние десятилетия активно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по повышению эффективности преобразования солнечной энергии в тепловую и электрическую посредством солнечных батарей, устанавливаемых как на отдельном основании, так и на наружных поверхностях

ограждающих непрозрачных конструкциях здания. Согласно исследованиям М. Пальяро (M. Pagliaro) [181], А.В. Бастрон, А.С. Дебрина, В.Н. Урсегова [44] у фотоэлектрических установок коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую относительно небольшой. В настоящее время он составляет  $13\div 20\%$  для солнечных батарей массового производства. Суммарная эффективность большинства промышленных солнечных полупроводниковых систем электроснабжения не превышает  $8\div 12\%$ . Предпринимаются попытки увеличения коэффициента преобразования в лабораторных условиях. В настоящий момент достигнута величина  $24\%$  для лучших лабораторных образцов [47].

### **1.7 Современные подходы к повышению тепловой защиты светопрозрачных ограждающих конструкций зданий**

Светопрозрачной называется «ограждающая конструкция, предназначенная для освещения естественным светом помещений зданий» [134]. К светопрозрачным ограждающим конструкциям (СПК) зданий относятся оконные блоки, стеклянные двери (в том числе балконные) и входные группы; светопрозрачные фасады; фонари и светопрозрачные кровли и т.д. [104].

Свод правил СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [127] устанавливает требования к приведенному сопротивлению теплопередаче (см. рисунок 1.9), воздухопроницаемости СПК, температуре на внутренних поверхностях и т.д.. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» устанавливает нормативы к коэффициенту естественной освещенности (КЕО).

Согласно мнению ведущего ученого в области строительной теплофизики В.К. Савина [104] естественный свет является ключевым биологическим фактором, от которого зависит здоровье и производительность труда человека. Естественный свет регулирует обмен веществ в организме человека, он влияет на его иммунологическое состояние. Без естественного освещения у детей развивается рахит, а у взрослых – авитаминоз. Ультрафиолетовые лучи



солнечного спектра убивают в помещении болезнетворную микрофлору. При длительном пребывании человека в помещении с недостаточным освещением «он теряет зрение и у него появляются все перечисленные выше симптомы светового голодания, которые приводят к инвалидности и преждевременной смерти» [104]. В.К. Савин выступает против ограничения площади световых проемов, приведенных в пп. 9.4.4 СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» [124] (суммарная площадь окон жилых зданий должна быть не более 18 % (для общественных - не более 25 %) суммарной площади светопрозрачных и непрозрачных ограждающих конструкций), хотя необходимо отметить, что данные ограничения устанавливаются для СПК с недостаточной тепловой защитой. По мнению В.К. Савина «проектирование наружного ограждения необходимо вести из условий обеспечения помещения светом и теплом» [105].

В.К. Савин в монографии [104] вводит понятие коэффициента энергетической эффективности оконного блока, показывающего насколько теплотери и светопропускание рассматриваемого оконного блока меньше или больше эталонного:

$$k_{эф} = \frac{R_o^{эм} \cdot \tau_1^{эм} \cdot \tau_2^{эм}}{R_o \cdot \tau_1 \cdot \tau_2}, \quad (1.1)$$

где  $R_o^{эм}, R_o$  – приведенные сопротивления теплопередаче эталонного и рассматриваемого оконного блока, соответственно,  $(м^2 \cdot ^\circ C)/Вт$ ;

$\tau_1^{эм}, \tau_2^{эм}, \tau_1, \tau_2$  – коэффициенты светопропускания светопрозрачной части, а также коэффициенты, учитывающие потери света в переплетах, для эталонного и рассматриваемых оконных блоков.

Среди рассмотренных публикаций, посвященных повышению тепловой защиты СПК и моделированию процессов теплопередачи в них, необходимо отметить работы Савина В.К. [103, 104, 105], Шубина И.Л. [4, 131] (НИИ строительной физики РААСН); Низовцева М.И. [71, 72, 73], Терехова В.И. [73] (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН); Захарова В.М. (ИГЭУ) [80, 192]; Табунщикова Ю.А. [136, 137, 141] (МАрХИ, АВОК); Малявиной Е.Г. [69], Гагарина В.Г. [15], Самарина О.Д. [106] (МГСУ); Петрова Е.В. [83] (ТГАСУ); Глазо-

ва В.С. [92] (НИУ МЭИ); Логвиненко В.В. [67] (АлтГТУ им. И.И.Ползунова); Чернова В.А. [153] (КФУ); Арастега Д.К. (Arasteh D.K.), Райли М.С. (Reilly M.S.) [172, 157] (Национальная американская лаборатория имени Л.Беркли при Калифорнийском университете, США); Карлсона И. [175] (Karlsson J.) (Университет Упсалы, Швеция); Касини М. (Casini M.) [161] (Университет Рима, Италия); Рудольфа С.Е. (Rudolph S.E.), Диекманна Д. (Dieckmann J.) [182] (Кембридж, Великобритания) и многих других.

В ходе проведения обзора литературы были определены основные направления по повышению тепловой защиты светопрозрачных ограждающих конструкций СПК:

а) увеличение слоев остекления (многокамерные стеклопакеты) и толщины воздушной прослойки [69, 71, 83, 92, 103, 104, 141, 153, 157, 167, 175];

б) заполнение прослоек малотеплопроводными газами (аргон, криптон) [4, 83, 106];

в) нанесение низко-эмиссионного покрытия из оксидов металлов на стекла [4, 83, 92, 104, 153, 161, 175];

г) вакуумирование стеклопакетов [4];

д) многоселевые конструкции [103, 104];

е) повышение сопротивления рам и откосов световых проемов [4, 83, 153, 172];

ж) применение фото- и электрохромных технологий с использованием оксидов металлов, позволяющих изменять светопропускание остекления за счет использования специальных покрытий под воздействием электрического тока [4, 161, 182];

з) вентилируемые окна [4, 72, 73, 104, 105, 153];

и) тепловыделения в межстекольной воздушной прослойке [4, 72, 73, 83];

к) стекла с фотоэлектрическим эффектом, обладающих способностью преобразования солнечного излучения в электрическую энергию [4, 161];

л) использование мобильных (перемещаемых) теплоотражающих экранов [4, 67, 72, 73, 80, 136, 153, 192].

Применение вышеуказанных технологий в окнах позволяет значительно повысить приведенное сопротивление теплопередаче СПК особенно светопрозрачной части, что наглядно представлено на рисунке 1.14.

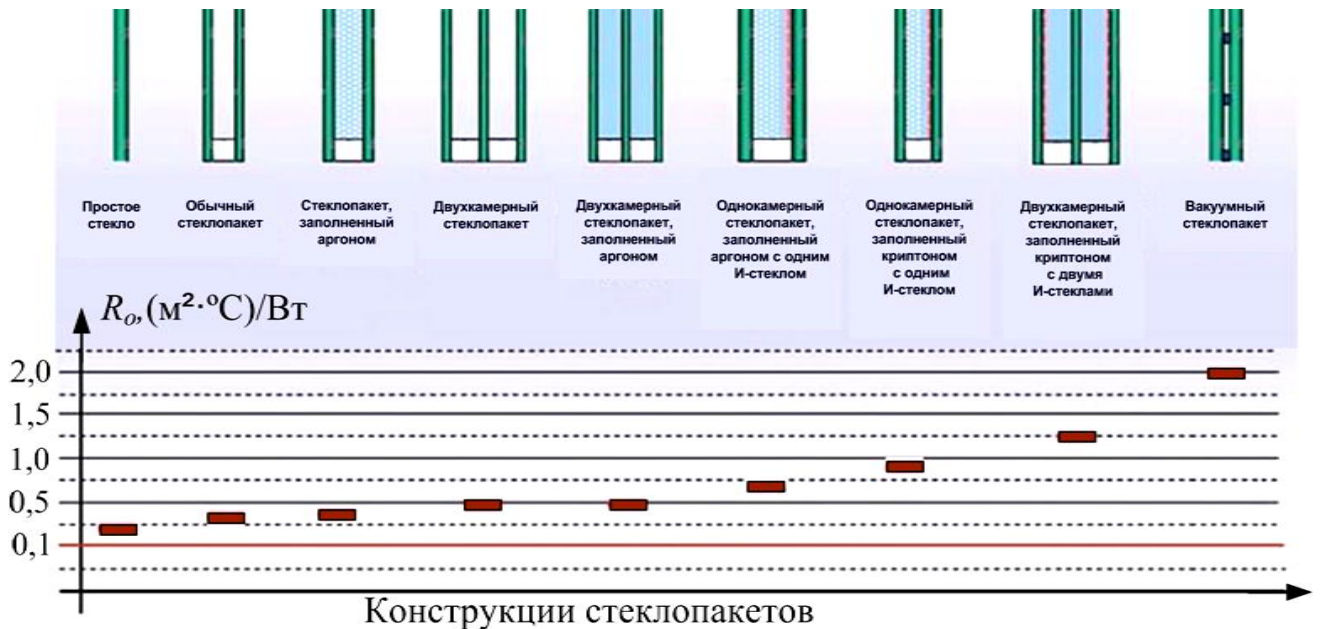


Рисунок 1.14 – Развитие светопропускающего заполнения оконных конструкций [107]

Однако, современные энергосберегающие конструкции окон имеют ряд недостатков [67, 137, 141]. Так, применение окон с высокой степенью герметичности вызывает увеличение кратности воздухообмена, и задачи энергосбережения не решает, а лишь изменяет её условия, перекладывая теплотери через неплотности в окнах на теплотери в системе вентиляции. Конструкции окон, ориентированные на снижение конвективной составляющей и потерь теплоты теплопроводностью (многослойное остекление или заполнение стеклопакетов малотеплопроводными газами), значительно снижают уровень поступления в помещение солнечного света (в т.ч. полезных для здоровья человека УФ-лучей), а также имеют высокую громоздкость. В связи со снижением значения коэффициента естественного освещения уменьшается и величина коэффициента энергетической эффективности  $k_{эф}$  оконного блока.

Окна, понижающие долю тепла, передаваемого излучением, за счет использования теплоотражающих покрытий, достаточно энергоэффективны, по-

скольку доля тепла, передаваемого излучением, может достигать 80 %, и её понижение заметно отразится на теплотерях окна.

Следует особо отметить перспективные технологии энергосбережения в окнах. Одним из примеров таких технологий послужат вакуумированные окна (см. рисунок 1.13) [4, 141] со стеклянными стержнями или шарами внутри стеклопакетов для выдерживания атмосферного давления воздуха и динамического давления ветра, со специальными стеклянными уплотнениями, причём данная светопрозрачная конструкция имеет низкий коэффициент теплопроводности, но теплотери по краям больше, чем у традиционных изолирующих стеклопакетов.

Окна с электрохромным остеклением, позволяющим плавно изменять прозрачность стекла приблизительно от 5 до 70 %, с соответствующим регулированием теплоступлений за счёт солнечной радиации, несут существенную выгоду для общественных зданий с точки зрения экономии в связи со снижением расходов на освещение и на охлаждение воздуха внутри помещений, но эта технология пока дорогостоящая.

Окна с аэрогелем, состоящим приблизительно на 4 % из силикона и на 96% - из воздуха, обладают высокой изоляционной способностью, но они существенно рассеивают свет и не имеют хорошей прозрачности.

Использование в СПК в темное время суток или во время отсутствия людей мобильных (перемещаемых) теплоотражающих непрозрачных может значительно увеличить приведенное сопротивление теплопередаче, при этом коэффициенты светопропускания светопрозрачной части (формула (1.1) не изменятся, так как во время использования экранов естественное освещение или не требуется (нерабочее время), или оно отсутствует (темное время). Более того, данная технология может применяться совместно со всеми вышеуказанными технологиями, также не снижая требуемое светопропускание конструкции.

Вопросами, посвященными применению теплоотражающих экранов в окнах, занимались в своих исследованиях Шубин И.Л. [4], Низовцев М.И. [72, 73], Терехов В.И. [73], Захаров В.М. [192, 80], Табунщиков Ю.А. [136], Логвинен-

ко В.В. [67]; Чернов В.А. [153]. Была экспериментально в климатической камере и в натуральных условиях установлена их энергетическая эффективность. Так, М.И. Низовцев под руководством М.И. Терехова в работах [72, 73] исследовал влияние использования вертикальных жалюзи и сплошных экранов, выполненных из различных материалов, на сопротивление теплопередаче двухслойного и трехслойного остекления [73]. В результате проведенного цикла экспериментальных исследований для различных типов экранов и жалюзи при трехслойном остеклении была получена общая зависимость роста относительного сопротивления теплопередаче (рисунок 1.15). Для лавсановых экранов с двухсторонним покрытием экспериментально показано существенное повышение сопротивления теплопередаче в 1.8 раза. Жалюзи с двухсторонним теплоотражающим покрытием дали увеличение теплозащитных характеристик в 1.3 раза, что существенно меньше, чем для экранов с двухсторонним покрытием. Натурные измерения на обычном окне с двухслойным остеклением показали, что установка жалюзи в межрамную зону в 1.5 уменьшила тепловые потери, а установка экрана привела к снижению в 2.3 раза [73].

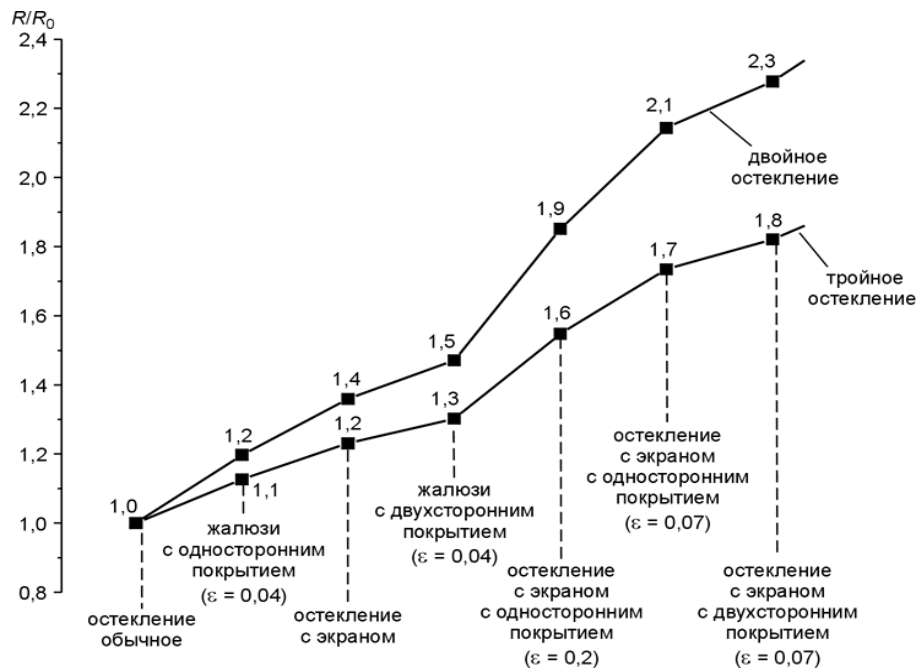


Рисунок 1.15 – Относительное сопротивление теплопередаче остекления при применении экранов и жалюзи с теплоотражающими покрытиями при двойном и тройном остеклении

В.В. Логвиненко в работе [67] при использовании экранов в СПК предложил термины «технология управляемого экранирования», а также «управление процессом теплообмена» в окнах. В ходе проведения натурального эксперимента по использованию двух экранов из алюминиевой фольги толщиной 0,055 мм рулонного типа на окне, представляющим собой двойное остекление в отдельных деревянных переплетах, для условий г. Барнаула было установлено, что применение экранов позволяет снизить тепловые потоки только в 1,6 раза. При проведении испытаний в климатической камере [64] было установлено, что применение двух теплоотражающих экранов из пленки, покрытой с двух сторон теплоотражающим покрытием на основе алюминиевого порошка с бесцветным связующим, внутри окна (двойное остекление в отдельных деревянных переплетах) увеличивает приведенное сопротивление теплопередаче  $R_0$  с 0,44 до 0,95 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (или в 2,16 раза). Применение жалюзи увеличило  $R_0$  до значения 0,84 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (или в 1,90 раза). К сожалению, в работе [64] не указаны температурные режимы испытаний.

Ю.А. Табунщиков в ходе натурального эксперимента для зимних условий эксплуатации г. Норильска определил [136], что при использовании в окне, представляющем собой двойное остекление в отдельных деревянных переплетах, шторы из двухслойной синтетической пленки с герметической воздушной прослойкой в 10 мм сопротивление теплопередаче  $R_0$  увеличилось с 0,37 до 0,57 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (или в 1,54 раза), шторы из поролон толщиной 10 мм – до 0,66 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (или в 1,78 раза), пенопласта толщиной 10 мм – до 0,76 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (или в 2,05 раза). Ю.А. Табунщиков также предложил для оценки эффективности использования экранов в СПК учитывать среднемесячные значения длительности светового дня в сутках.

В.М. Захаров предложил и запатентовал [80] варианты конструкций оконных блоков с применением экранов, выполненных из металлической фольги с высокими теплоотражающими свойствами, а также провел испытания в лаборатории кафедры промышленной теплоэнергетики ИГЭУ, показавшие высокий энергосберегающий потенциал от применения экранов в СПК.

В ходе выполнения обзора литературы не было найдено результатов научных исследований по математическому моделированию процессов теплообмена для СПК с теплоотражающими экранами, приводятся лишь результаты натурного и лабораторного эксперимента. Отсутствуют количественные данные по влиянию толщины воздушной прослойки между экранами, температурных режимов эксплуатации на приведенное сопротивление теплопередаче СПК.

### **1.8 Динамический микроклимат в помещениях. Современное состояние вопроса**

Влияние микроклимата на самочувствие людей и производительность их труда имеет важное значение как для повышения продолжительности и качества жизни населения, так и для снижения себестоимости продукции на промышленных предприятиях. Данными вопросами занимались как представители отечественной научной школы [9, 17, 39, 48, 93], так и зарубежной [146, 171].

В инженерной практике и строительном проектировании широко применяется метод П.О. Фангера (P.O. Fanger) [146]. На его основе можно определить ожидаемое значение теплоощущения в любой точке помещения при известных параметрах микроклимата. П.О. Фангер ввёл понятия «ожидаемое значение теплоощущения» (PMV), «ожидаемая вероятность неприятного теплоощущения в процентах» (PPD). При разработке значения PMV П.О. Фангер исходил из основного уравнения теплового баланса человека, а также из шкалы психофизического субъективного теплоощущения.

Коллектив исследователей под руководством С. Готье (S. Gauthier) в работе [171] рассматривает вопросы, связанные с проектированием так называемых "человекоцентричных" систем по созданию микроклимата в зданиях, обеспечивающих тепловой комфорт отдельно по каждой зоне помещения.

В.В. Бухмиров, М.В. Пророкова [9, 93] предложили новый комплексный критерий комфортности микроклимата (уровень комфортности микроклимата),

который учитывает физиологические особенности человека, параметры внутренней среды помещения и качество воздуха, а также дополнительные вредности, характерные для зданий. В ходе проведенных исследований была получена зависимость уровня комфортности микроклимата помещений от внедрения типовых энергосберегающих мероприятий, направленных на сокращение потребления тепловой энергии за счет утепления и герметизации зданий.

Авторский коллектив под руководством М.И. Гримитлина [39] во ВНИИ охраны труда (бывший Ленинградский институт охраны труда ЛИОТ) исследовал вопросы, связанные со струйными течениями при создании микроклимата в помещении и их влияние на самочувствие человека.

А.А. Дударев, А.Г. Сотников [48] особый акцент делают на гигиене труда и борьбе с профессиональной патологией офисных работников. Были уточнены методики выбора воздухораспределителей: на основе дизайн-проекта помещения определяют рабочие места и расстояние в плане и по высоте от опасной точки до места установки воздухораспределителя, далее осуществляется совместный выбор типа струи, ее расчетной длины от различных факторов.

В промышленном производстве с монотонным и напряженным характером работы стабильные параметры микроклимата повышают утомляемость персонала и отрицательно сказываются на производительности труда. Система динамического микроклимата (ДМ) подает в помещение воздух с непрерывно изменяющимися во времени параметрами воздуха (температура, скорость), что приводит к повышению работоспособности сотрудников за счет возбуждения центральной нервной системы.

Ученые ВНИИ охраны труда (г. Санкт-Петербург) В.В. Ловцов, Ю.Н. Хомуцкий активно разрабатывали вопросы теоретического и практического применения систем кондиционирования динамического микроклимата помещений, результаты этих исследований были опубликованы в монографии [66]. Был гигиенически обоснован импульс отклонения температуры, совокупно учитывающий влияние на человека, как самого отклонения, так и его формы и продолжительности.



Динамический микроклимат подразделяется на оптимальный и допустимый. Оптимальный динамический микроклимат (ОДМ) обуславливает периодические отклонения средневзвешенной температуры кожи на  $\Delta t_k = 2 \cdot A_k = (0,8 \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C})$  от средних оптимальных значений с определённой частотой при сохранении остальных показателей теплового состояния на оптимальном уровне, соответствующим гигиеническим рекомендациям. Для допустимого динамического микроклимата периодическое отклонение средневзвешенной температуры кожи составляет  $\Delta t_k = 2 \cdot A_k = (1,0 \pm 0,3 \text{ } ^\circ\text{C})$  [20].

Для перехода от колебаний температуры на поверхности кожи к колебаниям температуры воздуха в помещении составлением уравнения теплового баланса для условного тонкого слоя кожи человека и одежды за полупериод колебаний получено следующее выражение [20, 66]

$$\nu_n = T_k \cdot \omega + 1, \quad (1.2)$$

где  $\nu_n$  – величина затухания температурных колебаний при переходе на поверхность кожи человека,

$$\nu_n = \frac{A_b}{A_k}, \quad (1.3)$$

$A_b$  – амплитуда колебаний температуры внутреннего воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;

$A_k$  – средневзвешенная амплитуда температурных колебаний на поверхности кожи,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_k$  – условная постоянная времени кожи человека, для одетого человека  $T_k = (1,1 \pm 0,1)$  ч [66],

$\omega$  – частота колебания температур, 1/ч,

$$\omega = \frac{2\pi}{Z}, \quad (1.4)$$

$Z$  – период колебаний, ч.

Следует учитывать, что наибольший эффект по снижению утомляемости и повышению работоспособности был получен в экспериментах при периодах менее 1,33ч (при  $A_b = \pm 2,5^\circ\text{C}$ ), что, видимо, связано с влиянием на оптимальное воз-

буждение нервной системы частоты появления возбуждающих факторов со стороны терморегуляции [20].

Изменение текущей температуры внутреннего воздуха  $t_e(\tau)$  в рабочее время можно описать с помощью функции

$$t_e(\tau) = \bar{t}_{DM} + A_e \cdot \sin(\omega \cdot \tau), \quad (1.5)$$

где  $\bar{t}_{DM}$  – средняя температура колебаний воздуха при ДМ, °С.

Среднюю температуру колебаний воздуха при ДМ  $\bar{t}_{DM}$  можно определить по формуле

$$\bar{t}_{DM} = \bar{t}_{opt} + (0,2 \div 0,5) \cdot \Delta t_b, \quad (1.6)$$

где  $\Delta t_b$  – отклонение средневзвешенной температуры воздуха от средних оптимальных значений, °С;  $\bar{t}_{opt}$  – оптимальная температура при стабильных параметрах, °С.

Амплитуду колебаний температур  $A_e$  можно найти по следующей формуле:

$$A_e = \frac{\Delta t_e}{2}. \quad (1.7)$$

В СССР и РФ вопросами прогнозирования параметров микроклимата в целях проектирования энергетически эффективных систем отопления, вентиляции и кондиционирования помещений занимались научные группы под руководством В.М. Ильинского, В.Н. Богословского, В.В. Бухмирова, М.М. Бродач, Т.А. Дацюка, В.И. Панферова, В.К. Пыжова, Ю.А. Табунщикова, А.Я. Шелгинского и других ученых [3, 8, 11, 17, 42, 51, 93, 96, 135, 133].

В настоящее время для расчёта годового цикла эксплуатации здания с различными вариантами организации микроклимата в помещениях известны алгоритмы решения отдельных задач [19, 20]:

а) Линеаризованная математическая модель помещения. Зависимость изменения температуры регулируемого объёма воздуха записывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка.

б) Модель на базе теории регулярного процесса. Зависимость изменения температуры внутреннего воздуха от времени можно описать переходной функцией апериодического звена первого порядка

в) Модель теплового режима здания как единой теплоэнергетической системы.

г) Модель, построенная на уравнениях тепловых балансов. Состоит из нескольких подчинённых моделей, каждая из которых описывает отдельный тепловой поток с помощью уравнения теплового баланса.

д) Модель на базе теории систем автоматического регулирования. Для каждого элемента системы кондиционирования определяется передаточная функция.

е) Подход на основе ячеечных моделей и связанным с ними математическим аппаратом теории цепей Маркова.

ж) Математическая модель теплового режима здания с пассивной системой солнечного теплоснабжения. Модель предполагает использование аккумулятора теплоты (массивная стена) и построена на уравнениях теплового баланса каждого элемента, входящего в конструкцию пассивной системы теплоснабжения.

з) Расчёт воздухообмена с применением коэффициента эффективности воздухообмена.

Необходимо отметить, что некоторые модели просты для реализации (линеаризованная (а), на базе теории САР (д), ячеечная (е)), но не учитывают многих факторов, воздействующих на здание и (или) конструктивных особенностей здания. Это снижает точность моделирования. Другие модели учитывают слишком большое количество воздействий, что значительно усложняет моделирование.

При выполнении расчетов микроклимат в помещении рассматривается как сосредоточенная [107, 133, 135], так и полевая модель [11, 21, 93, 186]. В связи с развитием и доступностью вычислительной техники, обладающей высокой производительностью, в последнее время для реализации математической полевой модели активно используются метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных объемов (МКО) с применением таких программно-вычислительных комплек-

сов, как ANSYS [75, 93], COMSOL Multiphysics (ранее FEMLAB) [24, 61, 185], FlowVision, Phoenix [11, 21, 22, 184, 186], STAR-CCM и другие.

При трехмерном полевом моделировании процессов, происходящих при формировании микроклимата в помещении, используются уравнение неизотермического турбулентного или ламинарного движения несжимаемого вязкого газа (уравнение Навье-Стокса), уравнения неразрывности, переноса энергии, лучистого теплообмена. При описании лучистого теплообмена достаточно активно применяется метод дискретных ординат [55, 65, 93, 185].

В работах отечественных ученых М.И. Авраменко, В.В. Бухмирова, Т.А. Дაცюка, А.Ю. Гильмутдинова, М.В. Пророковой [1, 9, 21, 42, 93], а также ряда зарубежных авторов Б. Мохаммади (B. Mohammadi), О. Пиронно (O. Pironneau) [179] особый акцент сделан на исследовании различных моделей турбулентности для описания движения воздуха в помещении. Для расчета течения газа в большом объеме  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности является наиболее приемлемой моделью, так как она не требует значительных вычислительных ресурсов [1, 115] и показывает хорошую точность при расчете процессов конвективного теплообмена в помещениях [93, 179].

Разработкой математических моделей динамического микроклимата для офисных и производственных помещений (и её реализацией в виде программного комплекса) в последние два десятилетия активно занимались учёные ИГЭУ А.В. Гаранин, В.К. Пыжов [16, 18, 19, 20]. В ходе проведенных исследований [20] была предложена математическая модель динамического микроклимата промышленного здания, предоставляющая возможность рассчитать график нагрузки на систему кондиционирования с учетом динамического режима эксплуатации здания, был разработан алгоритм реализации математической модели динамического микроклимата на ЭВМ. В работе [18] также было выполнено моделирование применения энергосберегающих мероприятий, таких как утепление стен, рециркуляции воздуха и рекуперации теплоты вытяжного воздуха в теплоутилизаторах.

Реализация модели динамического микроклимата [18, 20] на ЭВМ состоит из трёх взаимосвязанных процессов: расчёт нестационарной передачи теплоты

через многослойную стенку, решение сопряжённой задачи внутреннего и внешнего теплообмена в системе «наружный воздух – ограждающие конструкции – внутренний воздух», позонного определения внутренних температур и тепловыделений с целью учёта изменения температуры воздуха по высоте помещения (см. рисунок 1.16).

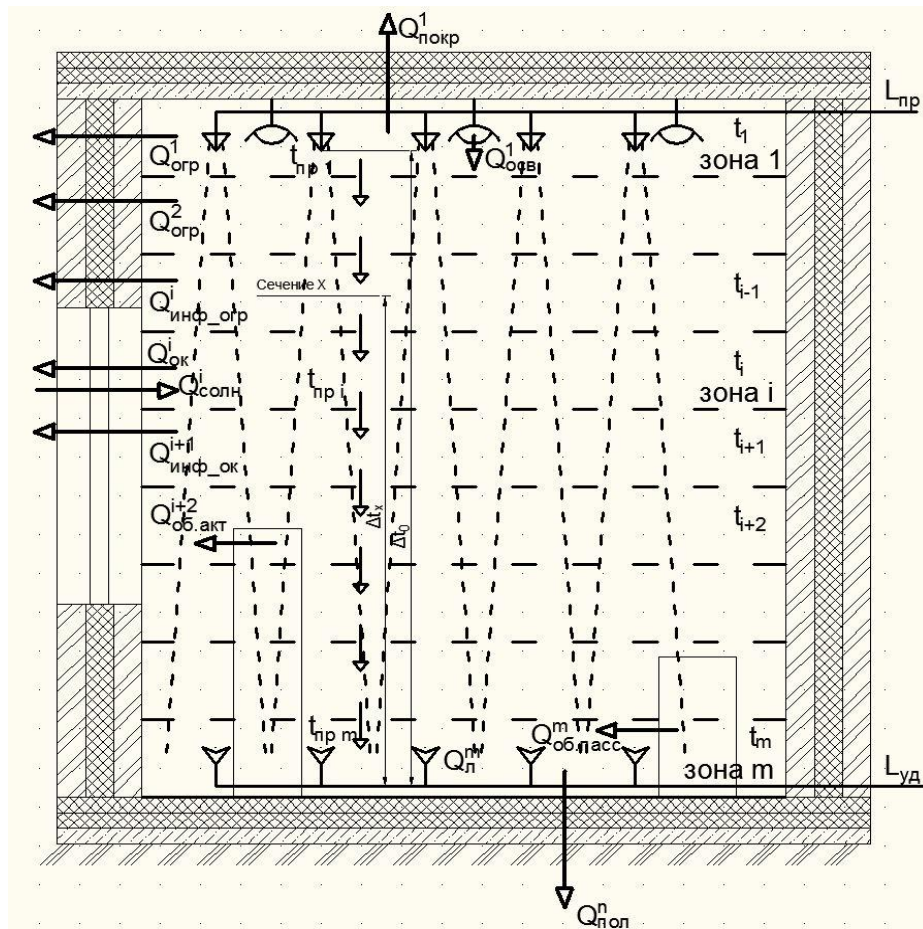


Рисунок 1.16 – Разбивка помещения на зоны по высоте

А.В. Гараниным, В.К. Пыжовым было выполнено моделирование динамического микроклимата в здании одного из корпусов машиностроительного завода ОАО «МКБ «Факел», находящегося в г.Химки Московской области [19]. Температура внутреннего воздуха была задана с учётом исследований гигиенистов и требований технологических процессов. Увеличение годовых затрат тепловой энергии всего на 0,2% и затрат холода на 7,3% позволило создать допустимый динамический микроклимат.

Недостатком разработанной математической модели [19] является отсутствие учёта зависимости коэффициентов теплоотдачи на наружной  $\alpha_n$  и внутренних  $\alpha_{вн}$  поверхностях ограждающих конструкций здания от параметров воздуха, таких как скорость  $v$  и температура  $t$ , от способа организации воздухообмена. Коэффициенты  $\alpha_n$ ,  $\alpha_{вн}$  не могут быть одинаковыми для систем естественной и механической вентиляции, причём в последнем случае  $\alpha_{вн}$  значительно зависит от скорости воздуха на внутренней поверхности ограждения. Реализация модели на ЭВМ в диссертации А.В. Гаранина [20] выполнена в одномерном исполнении, что не позволяет адекватно определять значения теплофизических параметров сред в различных координатах трехмерного пространства; моделирование движения воздушных потоков не осуществлено.

При описании и реализации на ЭВМ математических моделей, рассмотренных в [19, 21, 93], не учтено изменение во времени приведенного (и термического) сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций, например новых инновационных конструкций окон с мобильными теплоотражающими экранами. Не осуществлено исследование переходных процессов при нагреве и остывании помещения в случае использования энергоэффективного прерывистого режима отопления при организации микроклимата в нерабочее время [40, 43, 45].

## **1.9 Выводы по первому разделу. Постановка задач исследования**

1. Фактическая энергоёмкость ВВП Российской Федерации является одной из самых высоких среди развитых и развивающихся стран, что свидетельствует о нерациональном потреблении энергии при существующих суровых климатических условиях. При этом в стране законодательными и исполнительными органами власти принимаются меры по снижению потребления ТЭР: к 2028 году годовая удельная величина расхода энергетических ресурсов в зданиях, строениях, сооружениях должна уменьшиться на 50 % по отношению к базовому уровню; в нормативных актах рекомендуется активно внедрять в инженерные системы зда-

ний возобновляемые и альтернативные источники энергии и устройства, утилизирующие теплоту вторичных энергоресурсов.

2. На территории Российской Федерации в зданиях производственного и непроизводственного назначения на ОВК расходуется более 70 % тепловой энергии, что значительно превышает среднемировые показатели. В зданиях непроизводственного назначения потери через светопрозрачные конструкции составляют более 35 % от затрат тепловой энергии, причем наибольший потенциал в области энергосбережения также приходится на СПК и его значение составляет 17,5 %.

В производственных зданиях доля светопрозрачных конструкций в структуре трансмиссионных потерь оценивается в пределах 20-60 %. Для специфических производств, таких как тепличные хозяйства, доля тепловых потерь, приходящихся на остекление, составляет более 80 %.

3. Среди предлагаемых решений по повышению тепловой защиты светопрозрачных конструкций одним из самых перспективных и энергоэффективных является использование мобильных теплоотражающих экранов. В настоящее время отсутствуют данные по влиянию вариантов размещения экранов, геометрии их расположения относительно СПК и температурных режимов эксплуатации на приведенное сопротивление теплопередаче данных конструкций. Не использован потенциал от применения в экранах устройств, утилизирующих теплоту возобновляемых источников энергии (солнечные панели).

4. Экспериментальные данные по количественным показателям эффективности применения экранов в СПК значительно разнятся у авторов; отсутствуют данные по результатам математического моделирования процесса теплопередачи через СПК с экранами при изменении температурных режимов эксплуатации, скорости воздуха и других факторов.

5. Применение энергосберегающих мероприятий при организации динамического микроклимата в помещении позволит снизить себестоимость продукции в связи с увеличением производительности труда и снижения затрат на топливно-энергетические ресурсы.

6. В настоящее время отсутствуют способы оценки эффективности применения экранов в СПК в течение отопительного периода.

7. При оценке энергосберегающего потенциала от применения прерывистого режима отопления не учтена возможность и отсутствует методика по дополнительному понижению минимально-допустимой температуры внутреннего воздуха в нерабочее время ниже нормируемых параметров при применении технологии предварительной осушки воздуха и повышении сопротивления теплопередаче СПК от использования в них экранов.

8. В работах по моделированию динамического микроклимата в помещениях не учтено изменение во времени приведенного (и термического) сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций, например новых инновационных конструкций окон с мобильными теплоотражающими экранами. Не осуществлено исследование переходных процессов при нагреве и остывании помещения в случае использования энергоэффективного прерывистого режима отопления при организации микроклимата в нерабочее время .

Проведенный анализ литературных источников позволил сформулировать цель и конкретизировать задачи работы.

**Целью диссертационной работы** является повышение энергоэффективности работы систем по созданию динамического микроклимата в помещениях путем внедрения разработанных светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами и солнечными фотоэлектрическими батареями, а также совершенствования методики определения минимальной температуры внутреннего воздуха в нерабочее время.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи:**

1) выполнить анализ существующих требований и предлагаемых решений в области энергосбережения при организации микроклимата в помещении, способов повышения тепловой защиты светопрозрачных конструкций, методов математического описания тепломассообменных процессов при формировании динамического микроклимата;



2) разработать энергосберегающие светопрозрачные ограждающие конструкции с перемещаемыми теплоотражающими экранами и солнечными фотоэлектрическими батареями;

3) провести экспериментальные исследования с целью определения влияния теплоотражающих экранов на сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций;

4) разработать и выполнить проверку адекватности математической модели теплопередачи через светопрозрачную конструкцию с теплоотражающими экранами с учётом изменения во времени температуры и подвижности внутреннего и наружного воздуха;

5) разработать инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции в текущий момент времени и за отопительный период года с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации на основе аппроксимации результатов математического моделирования;

6) разработать методику определения минимальной температуры внутреннего воздуха при выполнении условия недопущения выпадения конденсата на внутренних поверхностях разработанных светопрозрачных конструкций при наличии и отсутствии предварительной осушки воздуха;

7) разработать математическую модель динамического микроклимата для зданий с новыми энергоэффективными светопрозрачными конструкциями.

8) определить энергетические показатели работы системы по созданию классического и динамического микроклимата помещений предприятий при использовании в светопрозрачных конструкциях теплоотражающих экранов и солнечных батарей, а также дополнительного понижения температуры внутреннего воздуха в нерабочее время.

Материалы первого раздела опубликованы в работах [190, 193].

## **2 Разработка светопрозрачных ограждающих конструкций с использованием теплоотражающих экранов**

В ходе проведения литературного обзора было установлено, что наибольшие трансмиссионные потери в зданиях приходятся на светопрозрачные конструкции. Одним из способов повышения тепловой защиты светопрозрачных конструкций является использование в темное время суток или во время отсутствия людей в помещении непрозрачных теплоотражающих экранов [72].

В диссертации разработаны новые энергосберегающие светопрозрачные конструкции с регулируемым сопротивлением теплопередаче на основе применения перемещаемых теплоотражающих экранов и генерацией электрической энергии при помощи солнечных фотоэлектрических батарей, а также схемы автоматизации их работы.

### **2.1 Климатические ресурсы – как предпосылка для создания светопрозрачных конструкций с регулируемым сопротивлением теплопередаче за счет использования теплоотражающих экранов**

Для обоснования эффективности использования непрозрачных теплоотражающих экранов в темное время суток или во время отсутствия людей был выполнен анализ климатических условий ряда городов Российской Федерации в течение календарного года. Были рассмотрены продолжительность темного и светлого времени суток, дневная амплитуда и средняя температура наружного воздуха, количество солнечной энергии, поступающей на поверхность ограждающей конструкции. Исходные данные были взяты из СП 131.13330.2012 "Строительная климатология" [122] и его обновленной редакции от 2020 года (СП 131.13330.2020 [123]), а также из других источников [85, 98].

Одним из ограничений при разработке энергосберегающих решений для светопрозрачных конструкций является требование по сохранению их светопропускающей способности в дневное время [104, 128]. Данное требование не рас-

пространяется для темного времени суток. Это обстоятельство дает возможность использовать непрозрачные теплоотражающие энергосберегающие экраны в светопрозрачных конструкциях в темное время суток без снижения естественного освещения днем.

В таблице 2.1 приведены значения среднемесячной длительности светового дня, отнесенного к длительности суток, в разных городах РФ для некоторых месяцев отопительного периода. Необходимо отметить, что наименьшая среднемесячная продолжительность светового дня в январе приходится для климатических условий г. Мурманска и составляет 6%.

Таблица 2.1 – Среднемесячная длительность светового дня в сутках в различных городах РФ, %

Город	Месяц		
	Ноябрь	Январь	Март
Краснодар	39,7	36,4	49,9
Москва	34	32	49
Иваново	33,3	30,7	49,1
С-Петербург	30,9	25,8	49,5
Мурманск	23	6	52

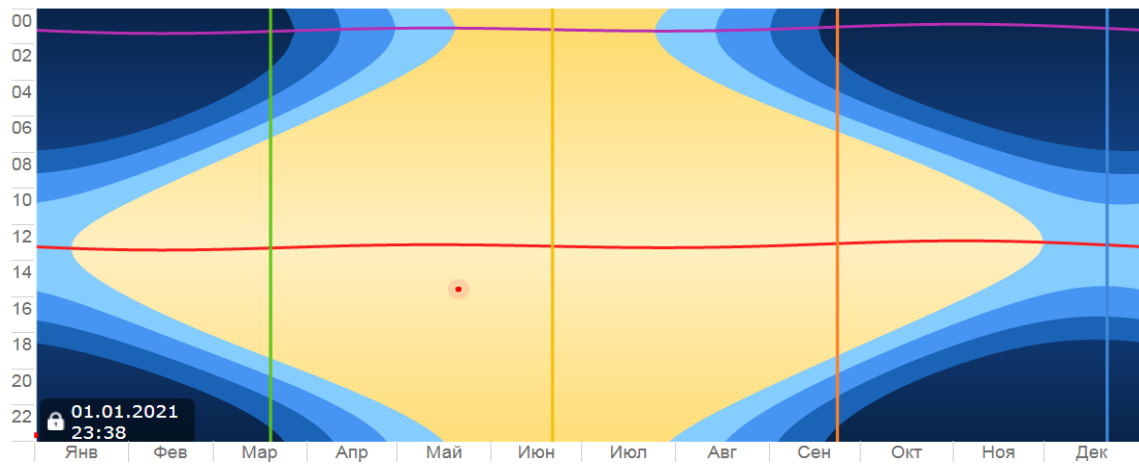
Также было определено время восхода и захода Солнца для таких городов, как Мурманск, Норильск, Москва, Иваново, Сочи, расположенных в разных климатических зонах, в том числе характеризующихся разной средней годовой температурой воздуха (рисунок 2.1).



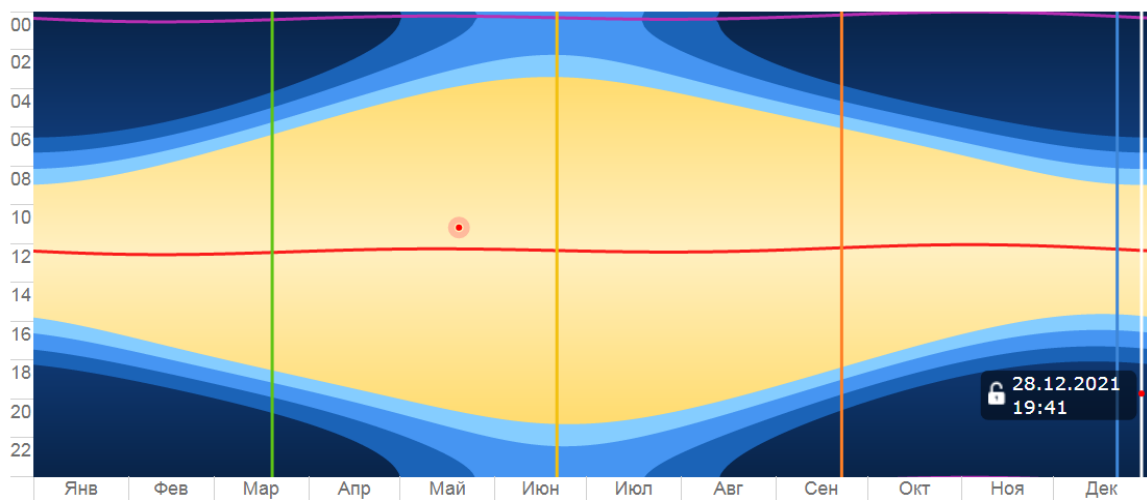
Рисунок 2.1 – Средняя годовая температура воздуха для территории Российской Федерации [108]

Продолжительность светового дня для данных населенных пунктов приведена на рисунке 2.2.

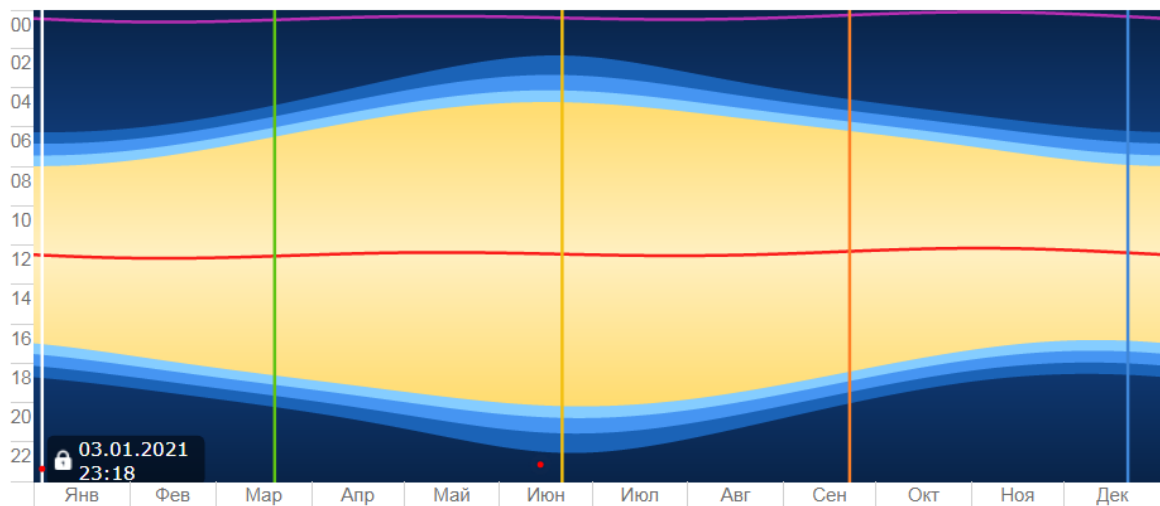
Экраны целесообразно использовать в светопрозрачных конструкциях в тёмное время суток, когда отсутствует естественное освещение. Так, в период с начала декабря по середину января в городах Норильске и Мурманске наступает полярная ночь (рисунок 2.3), Солнце не поднимается над горизонтом, поэтому экраны можно использовать круглосуточно в течение всего этого периода. В период с середины мая по конец июля в данных регионах наблюдается полярный день, поэтому экраны целесообразно применять во время отсутствия людей в помещениях (период окончания-начала рабочей смены, выходные, праздники и т.д.).



а)



б)



в)

Рисунок 2.2 – Продолжительность светового дня [98], часы, в течение календарного года для городов Мурманска, Норильска (а); Москвы, Иваново (б), Сочи (в):

- – астрономические сумерки; ■ – навигационные сумерки; ■ – гражданские сумерки;
- – день.

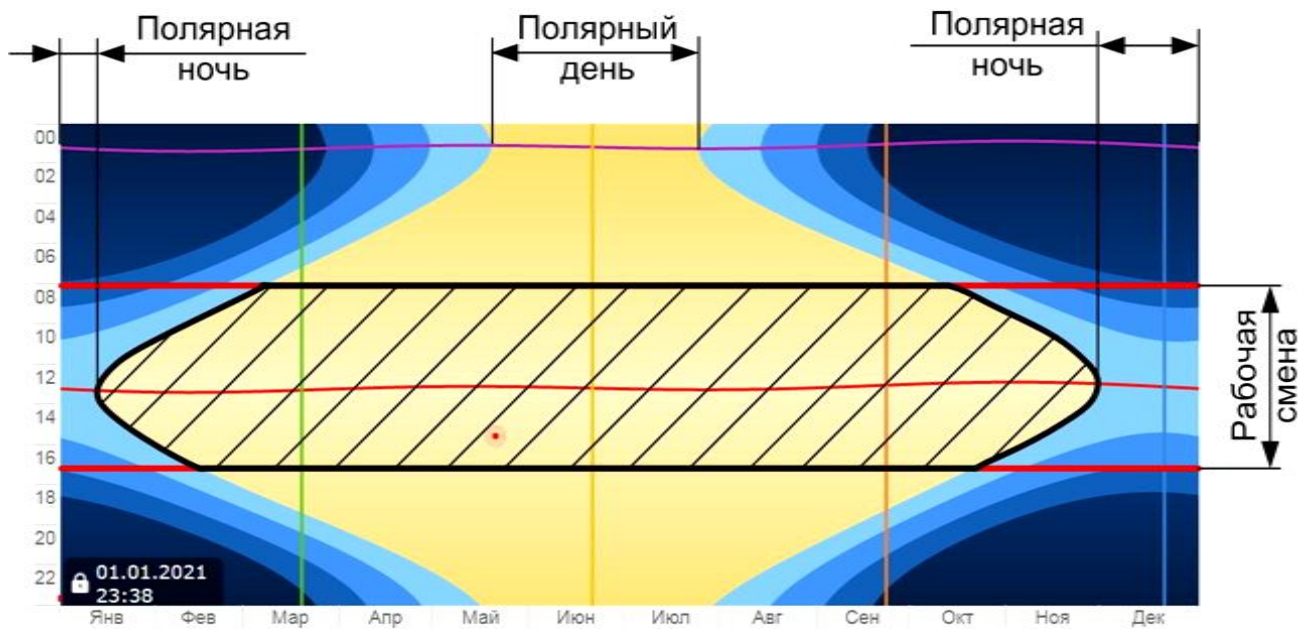


Рисунок 2.3 – Продолжительность временного периода использования теплоотражающих экранов в светопрозрачных конструкциях (незаштрихованная область) в течение суток (рабочие дни) для условий городов Мурманска и Норильска

На основании полученных данных и производственного календаря 2021 года было рассчитано время использования экранов в светопрозрачных конструкциях в течение рабочего дня для некоторых городов РФ (таблица 2.2). При выполнении расчета был принят 9-ти часовой рабочий день (с 8:00 до 17:00).

Таблица 2.2 – Число рабочих дней и продолжительность времени использования теплоотражающих экранов в течение суток (среднее по месяцам) в светопрозрачных конструкциях для различных городов РФ

Город	Число часов в течение суток не использования экранов (среднее по месяцам) за 2021 год											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Мурманск	22	16,5	15	15	15	15	15	15	15	15	19,5	24
Норильск	22	16,5	15	15	15	15	15	15	15	15	19,5	24
Москва / Иваново	16,5	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,5	17
Сочи	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Рабочих дней	15	19	22	22	19	21	22	22	22	21	20	22

В нерабочие дни экраны предлагается использовать круглосуточно: в отопительный период года – для снижения тепловых потерь, в теплый период – для уменьшения поступления солнечной энергии и связанного с этим дополнительного нагрева помещения.

В таблице 2.3 приведены некоторые климатические характеристики вышеуказанных городов [98]. В качестве расчетной температуры воздуха принята температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 92 %. Продолжительность  $n$ , суток, и средняя температура воздуха  $t$ , °С, приведены для периода со средней суточной температуры воздуха не более 8 °С.

Таблица 2.3 – Климатические характеристики городов [98]

Город	Географическая координата, градусы северной широты	Продолжительность отопительного периода $n$ , сутки	Средняя температура воздуха за отопительный период, °С	Расчетная температура воздуха, °С
Мурманск	68	273	-3,3	-28
Норильск	69	296	-15	-47
Москва	55	204	-2,2	-26
Иваново	56	214	-3,6	-29
Сочи	43	93	6,6	-3

Необходимо отметить, что для северных городов, находящихся практически на одной широте (68÷69 град. сев. широты), климатические данные значительно отличаются: в Мурманске отопительный период длится 273 суток, в Норильске – 296 дней, расчётная температура наружного воздуха для Мурманска составляет минус 28 °С, а для Норильска – минус 47 °С.

В рабочие дни холодного периода года теплоотражающие экраны рекомендуется использовать в темное время суток. Необходимо отметить, что в ночное время температура воздуха обычно достаточно понижается относительно дневного значения данной величины [70]. Следовательно, трансмиссионные теплопотери через светопрозрачные конструкции без экранов будут увеличиваться в темное время суток. В связи с этим, для моделирования процесса теплопередачи через светопрозрачные конструкции и определения эффективности использования эк-

ранов необходимо учитывать не только временной график использования экранов, но и изменение температуры в течение суток. Для решения данной задачи были рассмотрены изменение среднемесячной температуры и дневной амплитуды наружного воздуха в течение календарного года (рисунок 2.4).

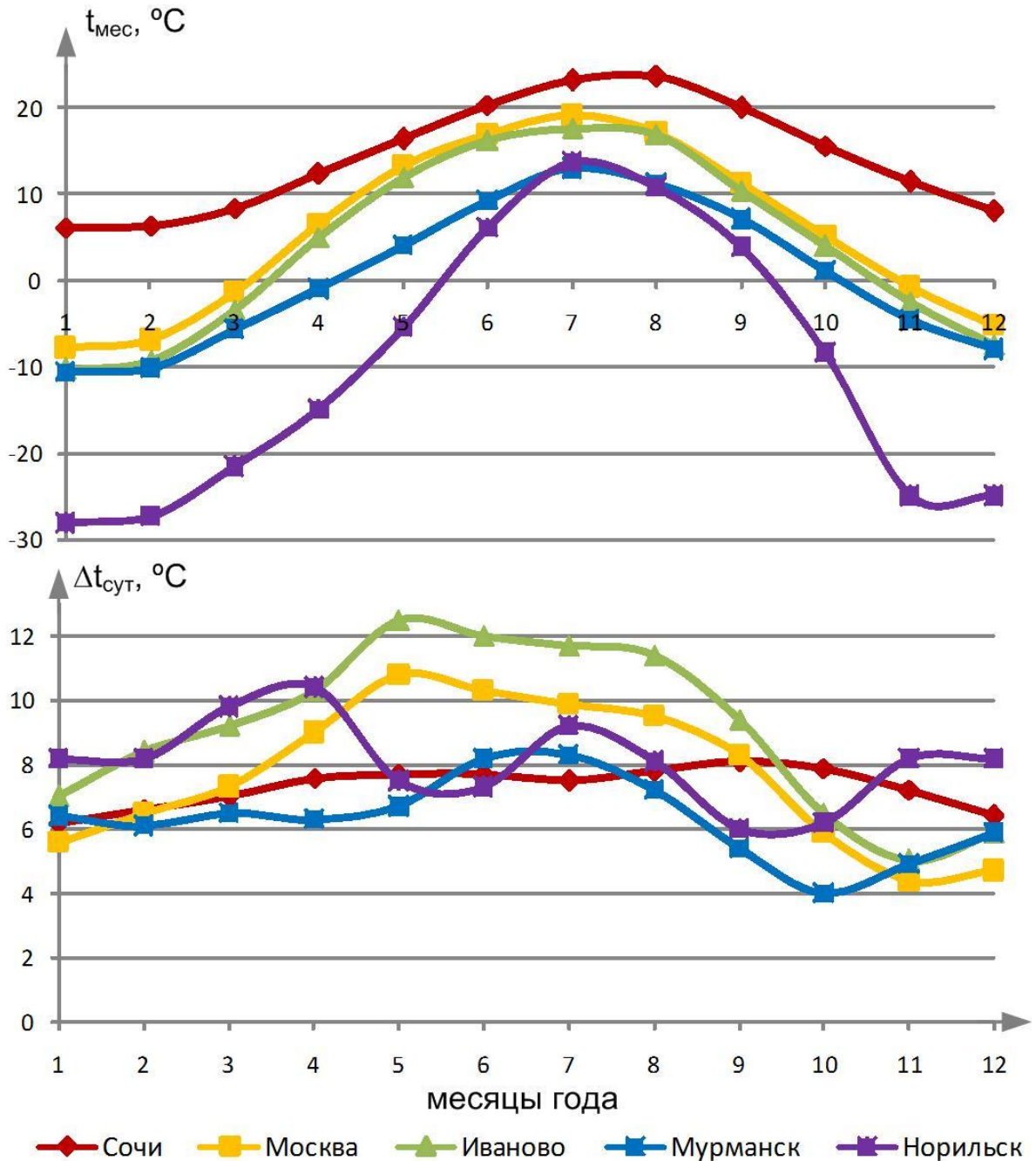


Рисунок 2.4 – Изменение средней месячная температура  $t_{\text{мес}}$  и средней суточной амплитуды температуры  $\Delta t_{\text{сут}}$  наружного воздуха, °C, в течение года по некоторым городам РФ



Среди рассмотренных населенных пунктов наибольшее значение средней суточной амплитуды можно отметить для условий города Иваново: максимальное  $\Delta t_{\text{сут}}$  наблюдается в мае и составляет 12,5 °С.

На основании этих данных (рисунок 2.4) можно определить среднюю температуру наружного воздуха днем и ночью для каждого месяца в течение календарного года. В качестве примера на рисунке 2.5 приведен график изменения дневной и ночной температуры воздуха для условий города Иваново.

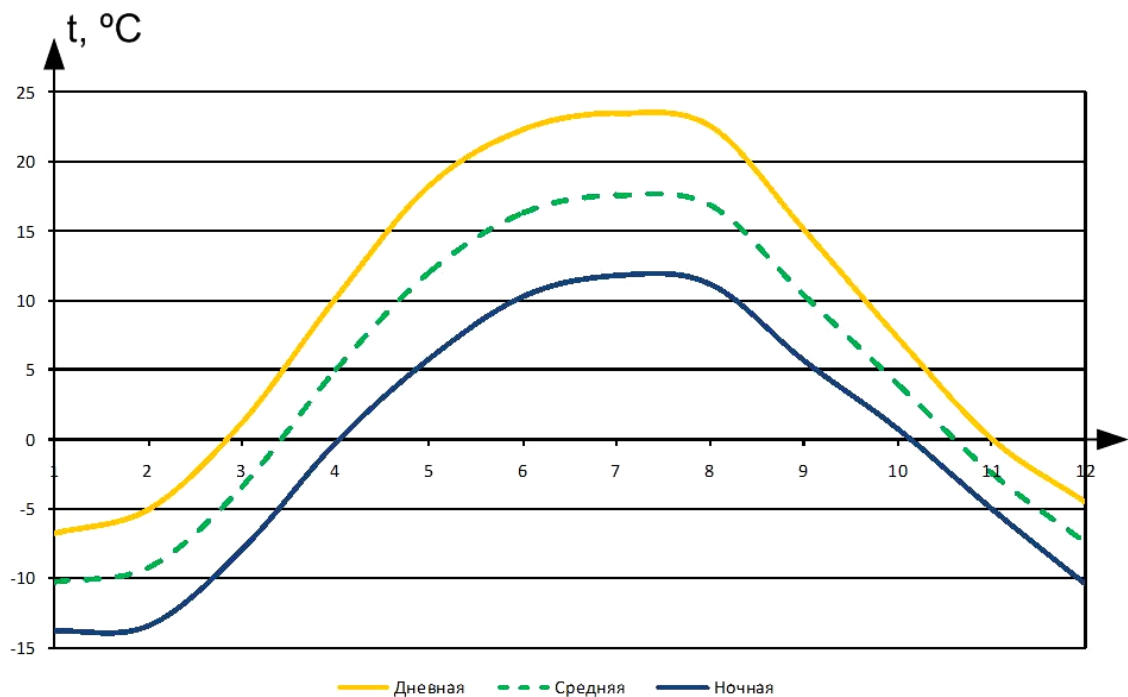


Рисунок 2.5 – Изменение дневной, среднесуточной и ночной температуры воздуха в течение года для условий г. Иваново

Среди климатических ресурсов, являющихся важными для создания светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами и фотоэлектрическими солнечными батареями, необходимо также выделить и инсоляцию. В светлое время суток теплого периода года солнечная энергия, поступающая в помещения, значительно повышает избыток теплоты в рабочей зоне, что накладывает дополнительные требования на работу систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Рациональным энергосберегающим решением является преобразование солнечной энергии, приходящейся на светопрозрачные конструкции, в электриче-

скую посредством установки на теплоотражающем экране со стороны окружающей среды фотоэлектрической солнечной батареи.

Количество солнечной энергии [85], поступающей на поверхность ограждающей конструкции, значительно изменяется не только в течение суток и календарного года, но и в большей степени зависит от ориентации поверхности по сторонам света и местоположения объекта (рисунок 2.6).

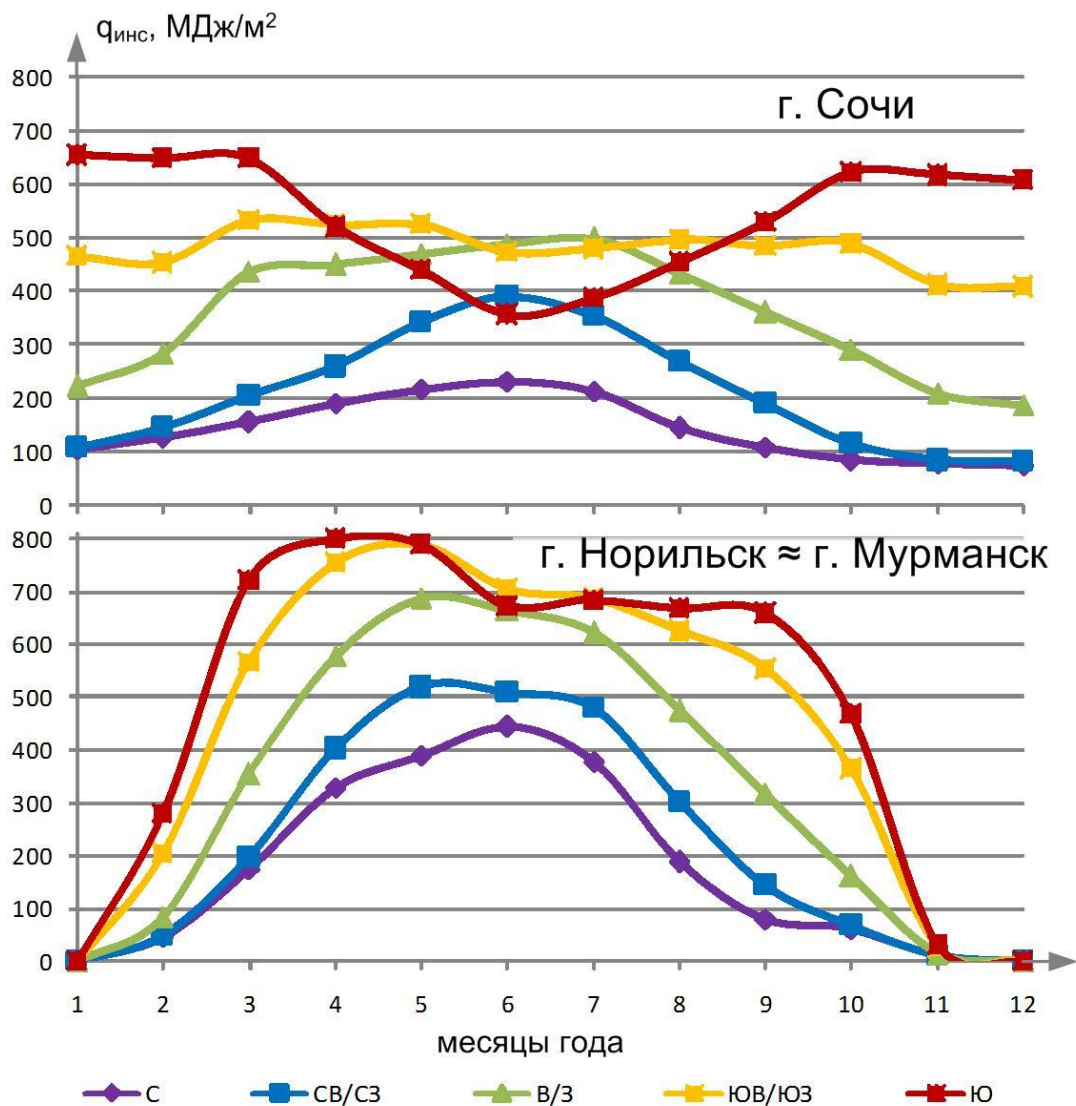


Рисунок 2.6 – Изменение количества суммарной месячной солнечной радиации  $q_{инс}$  на вертикальную поверхность при безоблачном небе,  $МДж/м²$ , для городов Сочи, Норильска и Мурманска в течение года по сторонам света (С – север, СВ/СЗ – северо-восток/северо-запад, В/З – восток/запад, ЮВ/ЮЗ – юго-восток/юго-запад, Ю – юг)

Необходимо отметить, что для северных регионов РФ в весенне-летний период года поступление солнечной радиации на вертикальные поверхности значительно больше, чем для южных.

На основании анализа климатических ресурсов был предложен график использования теплоотражающих экранов с фотоэлектрическими солнечными панелями (см. подраздел 2.3) для помещений производственного, общественного и административно-бытового назначения (рисунок 2.7). Построение графика было выполнено для условий рабочего и выходного дня холодного (21-22 декабря) и теплого (21-22 июня) периодов года г. Иваново. Продолжительность рабочей смены принята в размере 9 часов (с 8:00 до 17:00).

Можно отметить, что в холодный период года светлое время суток начинается в 08:54 (восход) и заканчивается в 15:37 (заход). Следовательно, в периоды внутри рабочей смены с 08:00 до 08:54 и с 15:37 до 17:00 общей продолжительностью 2 часа 17 минут можно использовать теплоотражающие экраны, так как отсутствует естественное поступление светового потока. Общая продолжительность периода использования экранов для условий рабочего дня составляет 17 часов 17 минут в сутки. В темное время суток рабочего дня холодного периода за счет использования экранов снижаются трансмиссионные тепловые потери через светопрозрачные конструкции. В выходной день экраны применяются круглосуточно и происходит не только снижение тепловых потерь, но и генерация электрической энергии в светлое время.

Для условий рабочего дня теплого периода года мы можем наблюдать следующую картину. Продолжительность светлого времени суток составляет 17 часов 54 минуты (восход – в 03:22, заход – в 21:16). В целях снижения теплопоступлений от инсоляции в помещение и генерации электрической энергии экраны с фотоэлектрическими батареями необходимо использовать в периоды с 03:22 до 08:00 и с 17:00 до 21:16, то есть практически 9 часов. Также в рабочую смену предлагается периодическое пофасадное использование экранов с фотоэлектрическими солнечными батареями в зависимости от теплового баланса и принятой схемы организации микроклимата в каждом помещении.



\* – периодическое пофасадное использование экранов с фотоэлектрическими солнечными батареями в зависимости от теплового баланса и принятой схемы организации микроклимата в каждом помещении

Рисунок 2.7 – Временной график и энергетический эффект от использования теплоотражающих экранов с фотоэлектрическими солнечными батареями в светопрозрачных конструкциях в течение рабочего и выходного дня для помещений производственного, общественного и административно-бытового назначения для условий холодного (21-22 декабря) и теплого (21-22 июня) периодов года г. Иваново

Так, при использовании системы кондиционирования воздуха для поддержания оптимальных параметров микроклимата в помещении инсоляция будет иметь положительное значение для снижения затрат теплоты на подогрев наружного воздуха в кондиционере (после его осушения). Для помещений с системами вентиляции целесообразно в течение разных промежутков времени применять теплоотражающие экраны на тех фасадах, где наблюдается максимальное поступление солнечной энергии (см. рисунок 2.6).

В выходной день теплого периода года экраны с фотоэлектрическими панелями целесообразно использовать в течение всего светлого периода, то есть практически 18 часов. Данное мероприятие приведет к снижению поступления солнечной энергии в помещения и генерации электрической энергии для накапливания в аккумуляторе.

В темное время суток теплого периода экраны не должны применяться в светопрозрачных конструкциях для обеспечения наиболее интенсивного процесса отвода теплоты из помещения в окружающую среду, так как значение температуры наружного воздуха в ночное время обычно ниже (см. рисунок 2.5), чем принятая температура в рабочей зоне. Данное решение обеспечит достаточное охлаждение помещения к времени восхода солнца и частично компенсирует нагрев помещения от инсоляции в светлое время суток. Для климатических условий с высокой температурой наружного воздуха в ночное время (большей, чем температура воздуха в рабочей зоне) целесообразно применять теплоотражающие экраны и в темное время суток для сохранения в помещении холода, накопленного во время работы систем воздушного охлаждения, вентиляции или кондиционирования воздуха в течение рабочей смены.

## **2.2 Разработка новых светопрозрачных ограждающих конструкций с теплоотражающими экранами рулонного, панельного и жалюзийного типа**

На основании выполненного обзора существующих энергосберегающих светопрозрачных конструкций, а также анализа климатических ресурсов были

разработаны различные технические решения по использованию теплоотражающих экранов в данных ограждающих элементах здания. Непрозрачные теплоотражающие экраны, которые существенно повышают приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций, предложено использовать в темное время суток или во время отсутствия людей.

На рисунке 2.8 представлен разработанный оконный блок (патент на полезную модель №84042 от 27.06.2009 [204]), который содержит наружную и внутренние рамы с остеклением и установленный в межрамном пространстве металлический экран сплошного типа или в виде жалюзи; с наружной стороны оконного блока установлен дополнительно металлический экран с зазором к наружному стеклу. Опускание / подъем экранов осуществляется как с помощью электродвигателя, так и в ручном режиме.

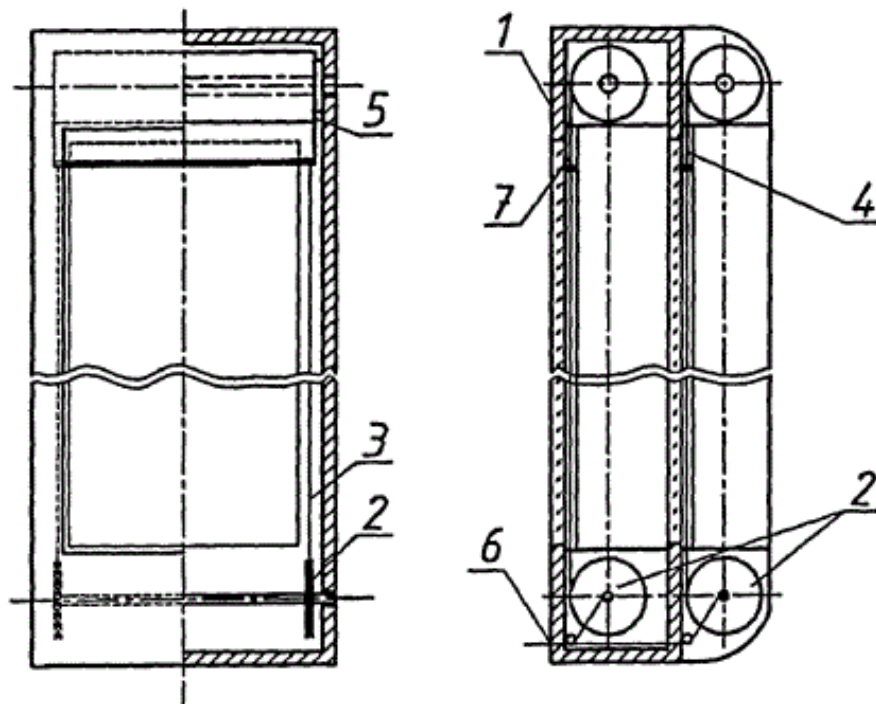


Рисунок 2.8 – Конструкция оконного блока с теплоотражающими экранами: 1 – оконная рама, 2 – шкив, 3 – направляющая, 4 – наружный экран, 5 – пружина, 6 – управляющий тросик, 7 – межрамный экран.

Установка теплоотражающих экранов относительно окна со стороны окружающей среды позволяет не только снизить тепловые трансмиссионные потери,

но и дополнительно повысить температуру на внутренней поверхности остекления, что особенно важно для помещений с высоким значением относительной влажности внутреннего воздуха. Данное решение снижает вероятность образования конденсата на поверхности окна, обращенной в помещение.

Теплоотражающий экран, выполненный из металлов с высокой отражательной способностью поверхности, образует вместе со стеклом воздушную прослойку, причем из-за низкого значения приведенной степени черноты материалов в данной прослойке значительно снижается лучистая составляющая теплообмена.

Также был разработан оконный блок (патент на полезную модель № 95725 от 10.07.2010 г. [205]), в котором теплоотражающие экраны, сплошного или жалюзийного вида, установлены не только внутри рамы и со стороны окружающей среды, но и со стороны помещения (рисунок 2.9). Количество экранов может варьироваться.

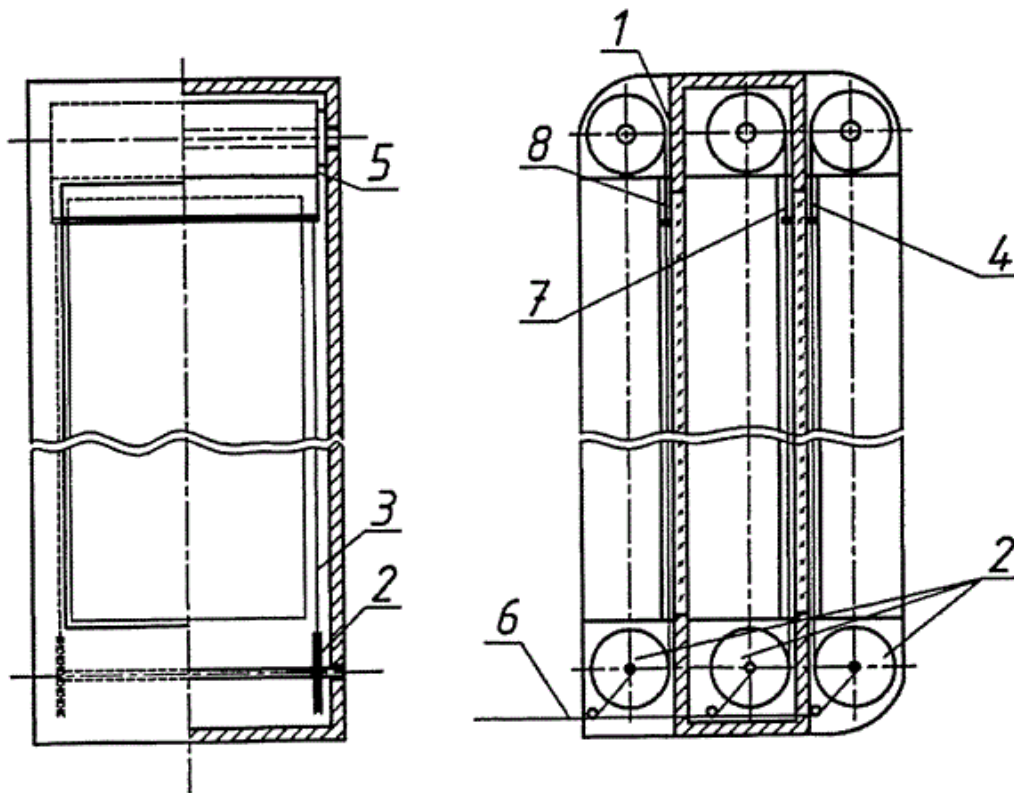


Рисунок 2.9 – Конструкция оконного блока с теплоотражающими экранами, установленными внутри рамы, а также со стороны помещения и окружающей среды: 1 – оконная рама, 2 – шкив, 3 – направляющая, 4 – наружный экран, 5 – пружина, 6 – управляющий тросик, 7 – межрамный экран, 8 – экран к внутреннему стеклу, во внутреннем пространстве помещения

На рисунке 2.10 представлен оконный блок с внутренним ставнем (патент на полезную модель № 153159 от 10.07.2015 г. [208]), выполненным из ламелей, каждая из которых включает в себя три теплоотражающих экрана. Необходимо отметить, что данный ставень может использоваться относительно оконного блока не только внутри помещения, но также и со стороны окружающей среды

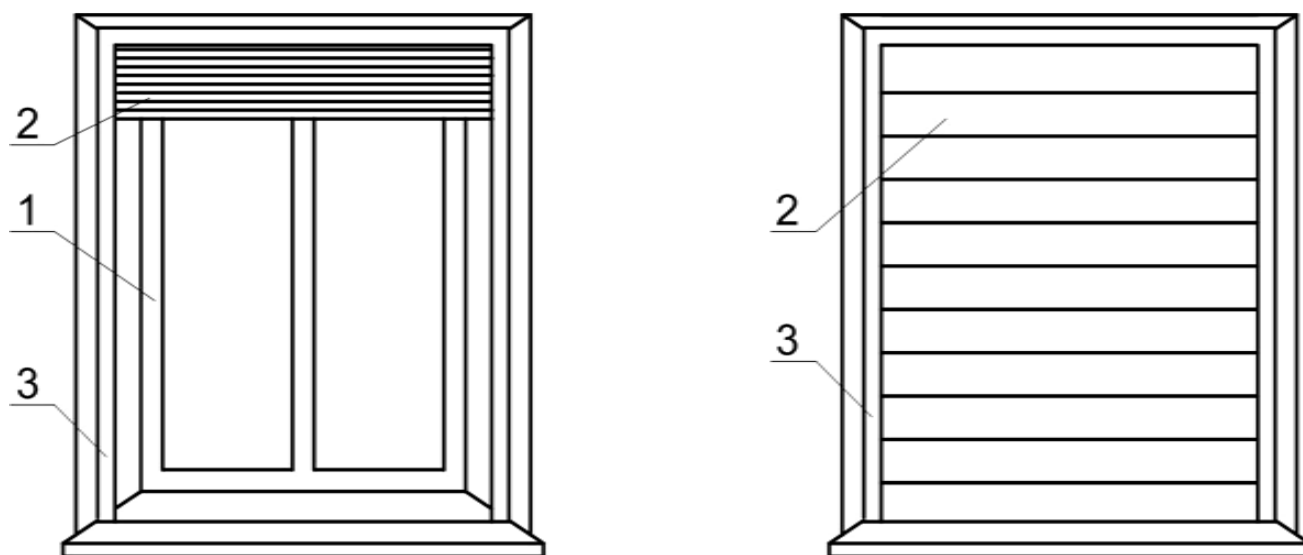


Рисунок 2. 10 – Оконный блок с внутренним ставнем в нерабочем (а) и рабочем (б) положении: 1 – рама; 2 – ставень, выполненный из ламелей; 3 – направляющие

На рисунке 2.11 представлена ламель, которая имеет каркас, выполненный из продольных полых элементов 1, соединенных поперечными планками 3, обеспечивающими жесткость. Продольные элементы соединены между собой с помощью углового крепления 2. В сечении полый элемент 1 имеет форму прямоугольника с двумя скругленными углами. Каждая ламель снабжена тремя теплоотражающими экранами. Наружные теплоотражающие экраны 4 выполнены из алюминиевой фольги толщиной 150-200 мкм, внутренний теплоотражающий экран 5 выполнен из алюминиевой фольги толщиной 7-15 мкм. Внутренний теплоотражающий экран 5 может быть закреплен, например, как показано на рисунке 2.11, с помощью уплотнительного шнура 6, размещенного в канавках образованных планками г-образного сечения, которыми снабжены полые элементы 1.



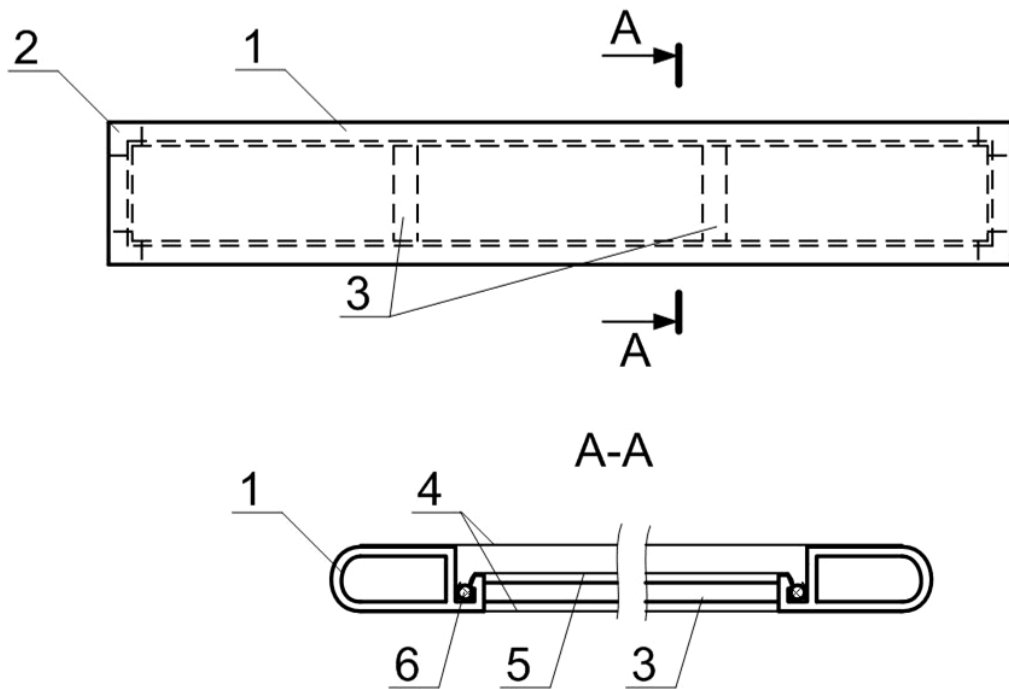


Рисунок 2. 11 – Ламель в продольном и поперечном разрезе

Внутренний ставень выполнен с возможностью раскладываться-складываться, размещен в своем рабочем положении относительно остекленной рамы с возможностью ее прикрывания с рабочим зазором, ставень в нерабочем положении прижат к верхней горизонтальной перекладине оконного проема.

Общеизвестны оконные ставни [52, 59], устанавливаемые на оконных переплетах с их внешней (наружной) стороны вне помещения, в виде полотнищ из дерева, или другого материала, частично или полностью закрывающие окно. Существуют створчатые ставни [59], закрепляемые на петлях, или съемные, или отводимые, так же известны автоматические ставни. В холодных регионах распространены сплошные ставни, которые закрываются для защиты оконных стекол от повреждений, незаконного проникновения в жилище, а также для уменьшения тепловых потерь через светопрозрачные конструкции в холодную погоду. Такие ставни не пропускают солнечный свет. Недостатки данных ставней заключаются в том, что не достаточно решен вопрос теплосбережения, и в частности снижения лучистой составляющей тепловых потерь.

Для уменьшения тепловых потерь через светопрозрачную конструкцию и увеличения температуры поверхности внутреннего остекления был разработан

автоматический наружный ставень (патент на полезную модель № 146566 от 10.10.2014 г. [207]). Наружный ставень (рисунок 2.12) содержит раму 1, выполненную, например, из пластикового материала, и теплоотражающие экраны 2, выполненные, например, из алюминиевой фольги. Расстояние между соседними теплоотражающими экранами 2 может составлять от 5 до 20 мм. Наружные теплоотражающие экраны 2 должны быть выполнены из полированного алюминиевого листа толщиной не менее 200 микрон, для обеспечения надежности конструкции и целостности экранов; внутренние теплоотражающие экраны необходимо выполнить из алюминиевой фольги значительно меньшей толщиной. По периметру рамы 1 со стороны закрываемого проема закреплен уплотняющий шнур 3.

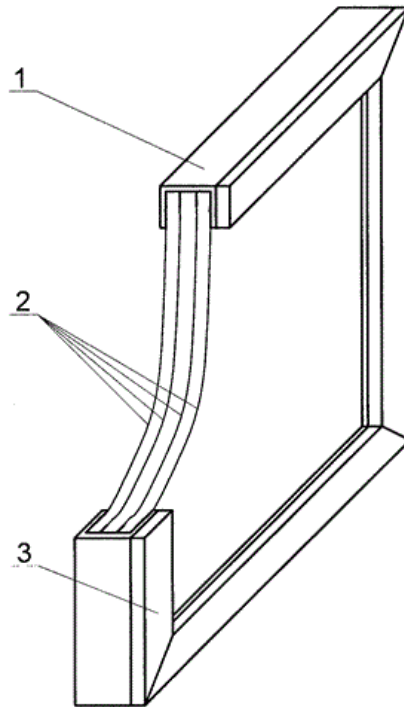


Рисунок 2.12 – Автоматический наружный ставень

Наружный ставень устанавливают таким образом, чтобы в положении, когда проем закрыт, он плотно примыкал к наружной поверхности рамы светопрозрачной конструкции и обеспечивал хорошую герметичность. Предусмотрено автоматическое (посредством электропривода) управление, обеспечивающее экономию времени на перемещение ставня при большом количестве светопрозрачных конструкций, например, в производственных помещениях.

Выбор вида конструкции теплоотражающих экранов (рулонного, панельного или жалюзийного типа) необходимо осуществлять с учетом геометрических и физических характеристик ограждающих конструкций зданий и принятых решениями в области организации микроклимата в помещении.

### **2.3 Разработка конструкции многофункционального энергоэффективного ставня**

В последние десятилетия на мировом и федеральном уровнях большое внимание уделяется вопросам применения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии при энергоснабжении зданий и сооружений. Так в Европейском союзе принята Директива об энергетической эффективности зданий 2010/31/EU (Energy Performance of Buildings Directive — EPBD) [168, 170], предписывающая довести к 2050 году весь фонд зданий на территории Европейского Союза до уровня "nearly zero-energy standard" («стандарта почти нулевого потребления энергии»). По расчетам Европейской Комиссии, требуется ежегодно ремонтировать (с повышением энергоэффективности) в среднем 3% зданий. При этом «почти нулевой или очень низкий объем требуемой энергии должен быть в значительной степени покрыт за счет энергии из возобновляемых источников, включая энергию из возобновляемых источников, производимую на месте или неподалеку», говорится в Директиве [112]. Должны возводиться здания с "нулевыми выбросами углерода" [168].

В Приказе Минстроя России от 17.11.2017 г №1550/пр "Об утверждении Требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений" [90] рекомендуется с 1 января 2023 года для проектируемых, реконструируемых, капитально ремонтируемых зданий, строений, сооружений, за исключением многоквартирных домов (при наличии технической возможности и технико-экономического обоснования) устанавливать в инженерные системы этих объектов возобновляемые и альтернативные источники энергии и вторичных энергорес-

сурсов. Данное требование созвучно с европейскими требованиями по строительству "пассивных" зданий.

Одним из основных источников возобновляемой энергии является Солнце. При проектировании и строительстве "пассивных" зданий активно применяются солнечные фотоэлектрические батареи [111, 138]. Коэффициент полезного действия (преобразования солнечной энергии в электрическую) фотоэлектрических панелей российского производства находится в диапазоне от 14 до 20 % [44]. Необходимо отметить, что КПД достигает 20 % для панелей промышленного серийного производства, а не только лабораторных экземпляров.

В общемировой практике использования солнечных батарей на наружных поверхностях ограждающих конструкций зданий большая часть данных устройств размещена на стенах, а также на покрытии. Фотоэлектрические фасадные системы в первую очередь используются для облицовки зданий с навесными вентилируемыми фасадами [158].

Следовательно, на данный момент не реализован потенциал выработки электрической энергии при использовании фотоэлектрических панелей, в том числе и тонкопленочных, в светопрозрачных конструкциях, хотя как было описано выше, площадь остекления является значительной, особенно для производственных зданий.

Была разработана и запатентована (патент на полезную модель № 154163 от 20.08.2015 г. [209]) конструкция многофункционального энергоэффективного ставня из теплоотражающих экранов с применением с наружной стороны солнечной батареи. Использование солнечной батареи позволяет вырабатывать электрическую энергию, обеспечивающую не только автономную работу окна с теплоотражающими экранами, но и частично (или полностью) покрывающую электрическую нагрузку потребителя, а также, при больших объемах генерации, подаваемую во внешнюю электрическую сеть. Ставень устанавливается с наружной стороны светопрозрачной конструкции.

На рисунке 2.13 приведен наружный ставень с четырьмя теплоотражающими экранами.

Наружный ставень содержит раму 1, выполненную, например, из пластикового материала, и теплоотражающие экраны 2, выполненные, например, из алюминиевой фольги. Расстояние между соседними теплоотражающими экранами 2 может составлять от 5 до 20 мм. Наружные теплоотражающие экраны 2 выполнены из алюминиевого листа толщиной не менее 200 мкм, для обеспечения надежности конструкции и целостности экранов, внутренние теплоотражающие экраны выполнены из алюминиевой фольги толщиной 7-15 мкм. С наружной стороны ставень снабжен солнечной батареей 3, состоящей, например, из тонкопленочных фотоэлементов [181], которая подключается к контроллеру (или к модульному центру) при помощи токопроводов 4. По периметру рамы 1 со стороны закрываемого проёма закреплен уплотняющий шнур 5. Наружный ставень устанавливают таким образом, чтобы в положении, когда проём закрыт, он плотно примыкал к наружной поверхности светопрозрачной ограждающей конструкции здания и обеспечивал должную герметизацию. Предусмотрено автоматическое (по средствам электропривода) управление, обеспечивающее экономию времени на перемещение ставен при большом количестве окон, например, в производственных помещениях.

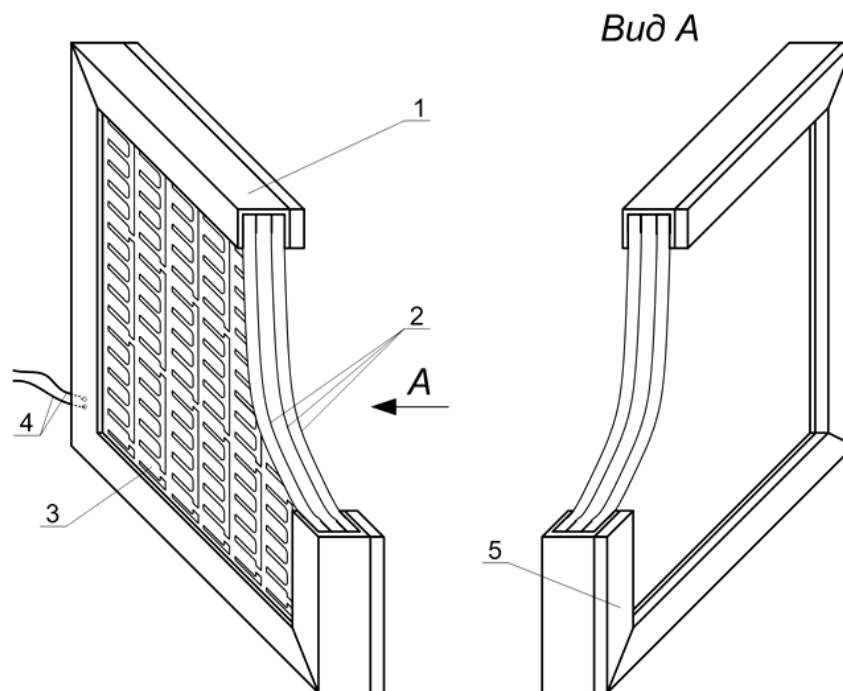


Рисунок 2.13 – Многофункциональный энергоэффективный ставень

Таким образом, применение наружных многофункциональных энергоэффективных ставней обеспечивает повышение теплозащиты, уменьшение тепловых потерь здания через светопрозрачные конструкции и выработку электрической энергии. Рекомендации по графику использования ставней в светопрозрачных конструкциях приведены в подразделе 2.1.

#### **2.4 Автоматизация работы светопрозрачных ограждающих конструкций с теплоотражающими экранами. Новые решения**

Современные мероприятия по снижению затрат ТЭР при организации микроклимата в помещениях различного назначения с помощью систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха дают наибольший энергосберегающий эффект при совместном использовании разработанных конструкторских и технологических решений, а также систем автоматизации. График и условия применения теплоотражающих экранов, в том числе с солнечными батареями, в светопрозрачных ограждающих конструкциях предполагают использование системы автоматизации работы данных устройств.

Автоматизация светопрозрачной конструкции заключается в установке электропривода, перемещающего теплоотражающий экран, и системы управления им. Автоматизация конструкций, естественно, влияет на их стоимость. Тем не менее, подобные затраты оправдывают себя благодаря значительной экономии на отоплении, вентиляции и кондиционировании помещений. Кроме того, если в небольшом помещении ручное управление оконными блоками не представляет затруднений, то в зданиях и сооружениях со значительными отапливаемыми объемами и коэффициентом остекления (производственные цеха, теплицы, учебные аудитории лекционного типа и т. д.) светопрозрачные конструкции, оснащенные системами автоматического управления, позволяют существенно экономить время на поднятие и опускание теплоотражающих экранов.

Были разработаны автоматизированный оконный блок, а также системы управления теплоотражающими экранами оконного блока.

### 2.4.1 Автоматизированный оконный блок

На рисунке 2. 14 представлена разработанная конструкция автоматизированного оконного блока (Патент на полезную модель № 135696 от 20.12.2013 г. [206]).

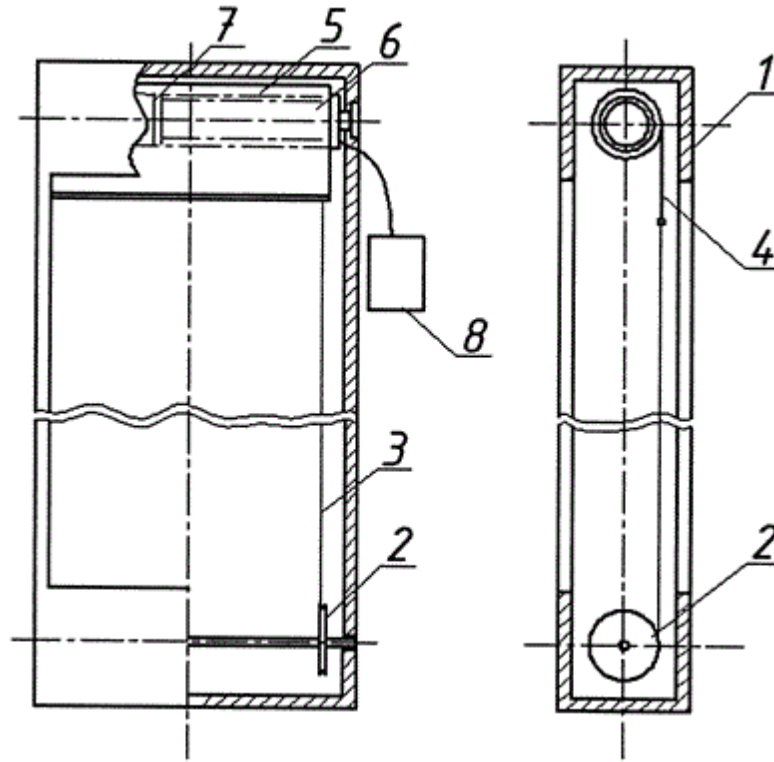


Рисунок 2.14 – Автоматизированный оконный блок: 1 – оконная рама, 2 – шкив, 3 – направляющая, 4 – металлический теплоотражающий экран, 5 – вал, 6 – внутривальный электропривод, 8 – блок управления электроприводом

При использовании внутривального электропривода вал должен быть выполнен пустотелым, а при использовании шагового электропривода вал необходимо изготовить в виде стержня круглого сечения. Металлический экран закреплен и намотан на вал. К электроприводу (внутривальному или шаговому) подключен блок управления электроприводом обеспечивающий поднятие или опускание металлического теплоотражающего экрана. Блок управления может быть соединен с электроприводами каждого окна в одном помещении или во всем зда-

нии. Блок управления может содержать ручной выключатель, например, клавишный, кодовый, замковый и др., предназначенный для ручного управления электроприводом и/или блок дистанционного управления и пульт дистанционного управления, предназначенный для дистанционного управления электроприводом.

Устройство работает следующим образом. Блок управления электроприводом приводит во вращение электропривод внутривальный или шаговый в сторону поднятия металлического экрана в соответствии с графиком или необходимостью при изменении погодных условий.

Электропривод (внутривальный или шаговый) приводится в движение по командам дистанционного или ручного управления.

#### **2.4.2. Системы управления теплоотражающими экранами оконного блока**

Предлагается два принципа управления теплоотражающими экранами: по заданному графику, а также по сигналу от датчика наружной освещенности.

Рассмотрим несколько вариантов функциональных схем управления электроприводами оконных блоков с теплоотражающими экранами.

На рисунке 2.15 показаны функциональные схемы вариантов систем управления теплоотражающим экраном, реализующие принцип управления по заданному графику. В схемах "а", "б" основным элементом системы управления является микропроцессорный контроллер, а в схеме "в" – автоматический выключатель с таймером.

В схемах "а", "б" экран поднимается, только если в помещении находятся люди.



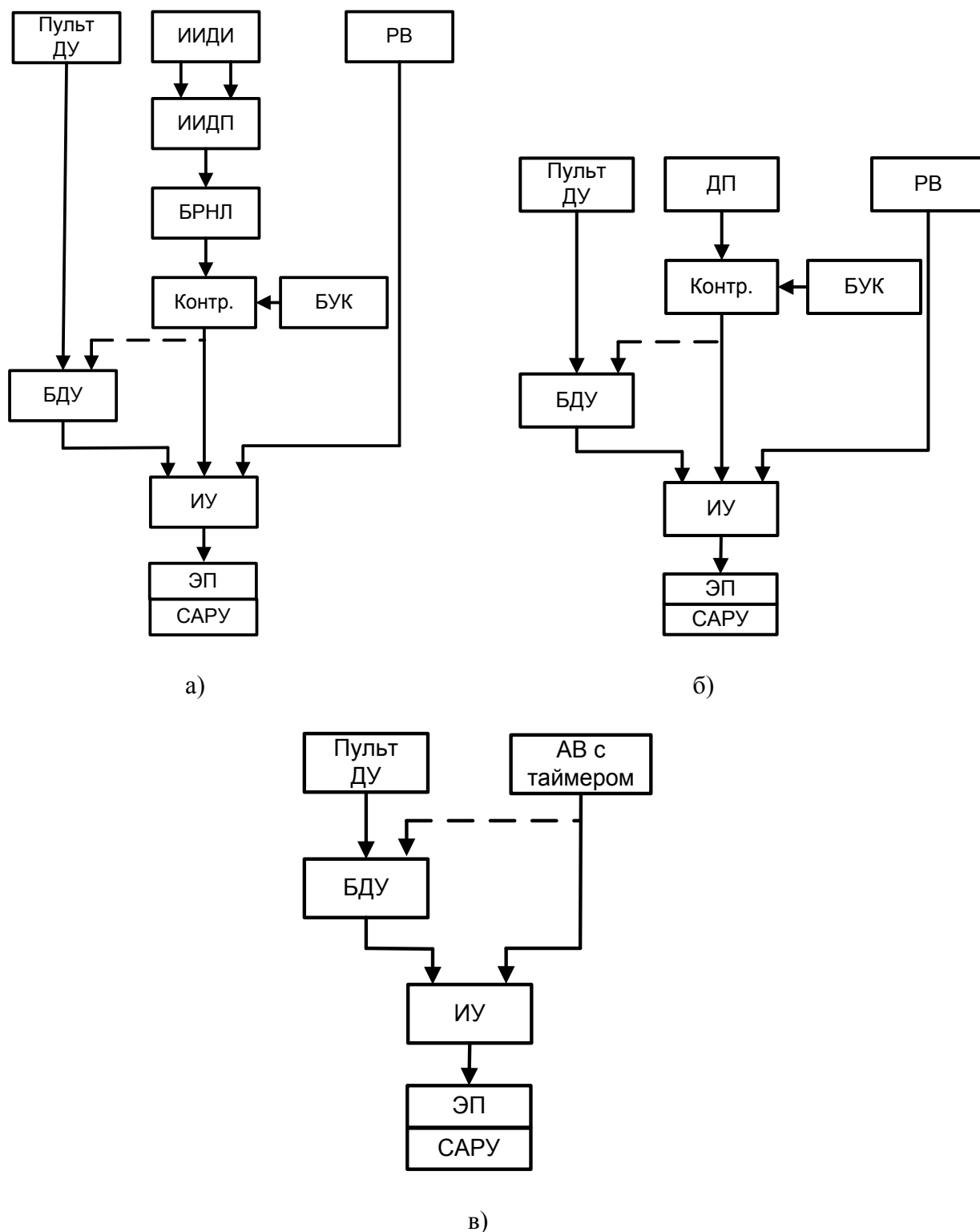


Рисунок 2.15 – Функциональные схемы систем управления электроприводом теплоотражающего экрана по заданному графику: АВ – автоматический выключатель, БДУ – блок дистанционного управления, БРНЛ – блок распознавания наличия людей в помещении, БУК – блок управления микропроцессорным контроллером, ДУ – дистанционное управление, ДП – датчик присутствия, ИИДИ – инфракрасные импульсные датчики-излучатели, ИИДП – инфракрасные импульсные датчики-приемники, ИУ – исполнительное устройство, пульт ДУ – пульт дистанционного управления, РВ – ручной выключатель, САРУ – система аварийного ручного управления электроприводом, ЭП – электропривод

В схеме "а" для определения присутствия людей в помещении используется система, состоящая из инфракрасного импульсного датчика-излучателя, инфракрасного импульсного датчика-приемника и блока распознавания наличия людей в помещении. Блок распознавания наличия людей в помещении содержит определитель направления движения, детектор присутствия, счетчик количества присутствующих, индикатор присутствующих и кнопки прямого управления и коррекции.

Светодиоды датчика-излучателя и датчика приемника устанавливаются на противоположных косяках двери на одинаковом расстоянии от пола, параллельно друг другу. Определение направления движения основано на принципе прерывания двойного луча.

При пересечении луча в направлении, заданном как вход, срабатывает датчик-приемник, выдающий сигнал на определитель направления движения, который в свою очередь изменяет показания счетчика. Причем входящий человек будет увеличивать показания счетчика на единицу, а выходящий – убавлять на единицу. Направление движения определяется по последовательности пересечения лучей. Количество присутствующих в помещении людей отображается на цифровом индикаторе. Кнопки прямого управления и коррекции предназначены для изменения количества присутствующих людей в помещении в ручном режиме.

В схеме "б" для определения присутствия людей в помещении используется инфракрасный датчик присутствия. Принцип работы данного датчика основан на улавливании приемником инфракрасного излучения человека и выдаче сигнала на выходное реле, если человек двигается. Недостатком такого датчика является вероятность ложных срабатываний. Чтобы избежать частых поднятий и опусканий экранов в датчиках устанавливается время задержки. После обнаружения движения запускается отсчет времени. При обнаружении нового движения, результат обнуляется, и отсчет начинается заново.

Блок управления контроллером (БУК) предназначен для его программирования, с помощью него задается алгоритмы обработки входных сигналов и выдачи управляющего воздействия, график поднятия и опускания теплоотражающего экрана.

Блок дистанционного управления (БДУ) предназначен для беспроводного управления электроприводом по сигналу, получаемому от пульта дистанционного управления. БДУ может быть как отдельным устройством, так и встроенным в ручной выключатель, контроллер, исполнительное устройство или электропривод. Снабжение системы дистанционным управлением обеспечивает дополнительное удобство обслуживания.

Ручной выключатель предназначен для управления теплоотражающим экраном в случае отказа контроллера и при появлении необходимости опустить или поднять экран вне заданного графика. Ручной выключатель и контроллер подключаются к исполнительному устройству, предназначенному для управления электроприводом и разделения контуров управления.

Система аварийного ручного управления электроприводом (САРУ) в случае отсутствия электричества позволяет поднимать или опускать теплоотражающий экран вручную.

В схеме "в" поднятие и опускание экранов производится только по графику, заданному в автоматическом выключателе. Автоматический выключатель с таймером является более дешевым решением для реализации принципа управления теплоотражающим экраном по заданному графику, однако имеет ограниченные функциональные возможности.

На рисунке 2.16 приведена разработанная функциональная схема системы управления электроприводом теплоотражающего экрана с датчиком наружной освещенности (Патент на изобретение № 2574997 от 10.02.2016 [210]).

В этой схеме теплоотражающие экраны поднимаются, если в помещении находятся люди и освещенность снаружи здания превышает заданное в контроллере значение. Чувствительным элементом датчика наружной освещенности является фотоэлемент.

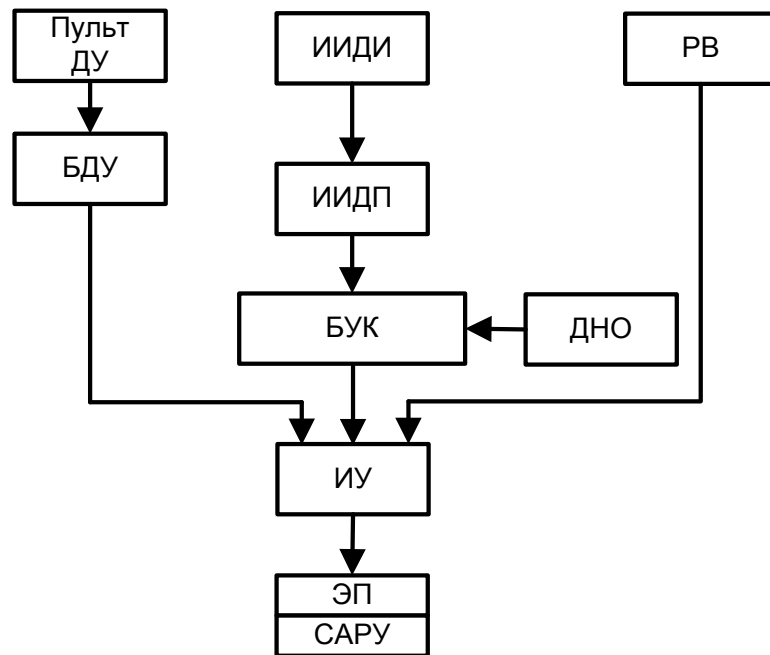


Рисунок 2.16 – Функциональная схема системы управления электроприводом теплоотражающего экрана по сигналу от датчика внешней освещенности: БДУ – блок дистанционного управления, БУК – блок управления микропроцессорным контроллером, ДНО – датчик наружной освещенности, ИИДИ – инфракрасные импульсные датчики-излучатели, ИИДП – инфракрасные импульсные датчики-приемники, ИУ – исполнительное устройство, пульт ДУ – пульт дистанционного управления, РВ – ручной выключатель, САРУ – система аварийного ручного управления электроприводом, ЭП – электропривод

Для снижения теплоступлений предусмотрено также и пофасадное использование экранов в светопрозрачных конструкциях в момент наибольшей инсоляции в светлое время суток при нахождении в помещении людей. Это может быть реализовано в блоке управления микропроцессорным контроллером (БУК).

Сигнал на поднятие или опускание теплоотражающих экранов на исполнительное устройство может также подаваться от ручного выключателя или пульта дистанционного управления через блок дистанционного управления электроприводом. Это необходимо в ряде случаев, например, при ярком солнечном свете, когда необходимо опустить теплоотражающие экраны, хотя по алгоритму работы блока управления электроприводом они должны быть подняты, или в случае поломки блока управления электроприводом.

### 2.4.3. Системы управления группой электроприводов теплоотражающих экранов

На рисунке 2.17 показана функциональная схема системы управления группой электроприводов теплоотражающих экранов, находящейся в одном помещении. В данной схеме управление каждой группой электроприводов осуществляется с помощью отдельного пульта дистанционного управления и отдельного ручного выключателя. Также может быть организовано управление всеми группами электроприводов с помощью одного пульта дистанционного управления и одного ручного выключателя.

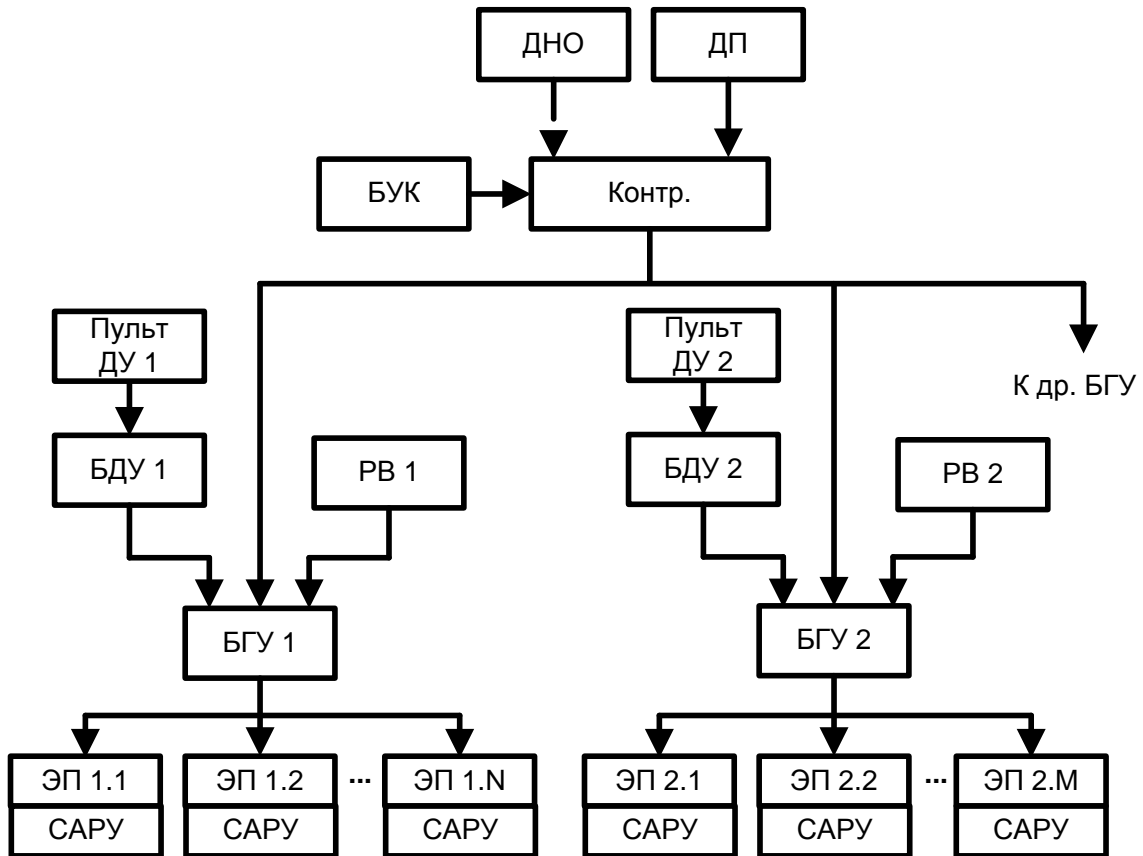


Рисунок 2.17 – Функциональная схема системы управления группой электроприводов теплоотражающих экранов, находящихся в одном помещении: БГУ – блок группового управления, БДУ – блок дистанционного управления, БУК – блок управления микропроцессорным контроллером, ДНО – датчик наружной освещенности, ДП – датчик присутствия, пульт ДУ – пульт дистанционного управления, РВ – ручной выключатель, САРУ – система аварийного ручного управления электроприводом, ЭП – электропривод

Для одновременного управления несколькими электроприводами вместо обычного исполнительного устройства используется блок группового управления (или многоканальное исполнительное устройство).

Целесообразно объединять в группу электроприводы оконных блоков, находящихся в одном помещении (если в помещении оконных блоков с электроприводами больше, чем количество, которым может управлять БГУ, то формируются дополнительные группы по территориальному признаку), и электроприводы одного оконного блока (в случае, если оконный блок имеет несколько экранов, и каждый экран перемещается своим внутривальным электроприводом).

Вышеуказанные схемы автоматизации возможно применять при использовании теплоотражающих экранов в светопрозрачных ограждающих конструкциях не только в производственных, жилых и общественно-административных зданиях, но и в теплицах.

#### **2.4.4 Разработка и реализация экспериментального образца автоматизированной системы управления работой теплоотражающего экрана с солнечной фотоэлектрической батареей для оконного блока**

Для практической реализации предложенных технических решений был разработан демонстрационный стенд «Энергоэффективный оконный блок с применением теплоотражающих экранов и солнечной фотоэлектрической панели».

На рисунке 2.18 приведена электрическая схема разработанного демонстрационного стенда, а на рисунке 2.19 – его внешний вид. Система управления работой теплоотражающего экрана построена на базе устройств компании Nero Electronics [76]. Данные устройства являются наиболее дешевыми и позволяют реализовать необходимые функции, а также передают управляющие команды по питающей сети 220 В, что предоставляет возможность сократить количество кабельных связей и снизить затраты на них.

Демонстрационный стенд позволяет выполнять регулирование положения теплоотражающих экранов по заданному графику, по сигналу наружной освещенности, при помощи дистанционного пульта и выключателя. Электрическая энергия, получаемая за счет преобразования солнечной в фотоэлектрической батарее, расположенной на внешней стороне наружного теплоотражающего экрана, накапливается в аккумуляторе и может быть использована как для работы самого стенда, так и для передачи во внешнюю сеть. Использование теплоотражающих экранов в оконном блоке позволяет значительно снизить трансмиссионные тепловые потери из помещения в окружающую среду.

В качестве светопрозрачной конструкции использовался оконный блок с двухкамерным стеклопакетом формулой СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 в переплете из поливинилхлорида (ПВХ). Теплоотражающие экраны были выполнены из алюминиевой фольги толщиной 100 мкм и закреплены в раме из ПВХ. В конструкции оконного блока предусмотрено перемещение рамы с экранами с помощью металлических направляющих и электропривода. Фотоэлектрические солнечные панели размещены на наружных поверхностях как экранов, так и навесного вентилируемого фасада. Рама с экранами согласно временного графика использования перекрывает световой проем или перемещается в пространство, образованное между стеной и навесным фасадом.

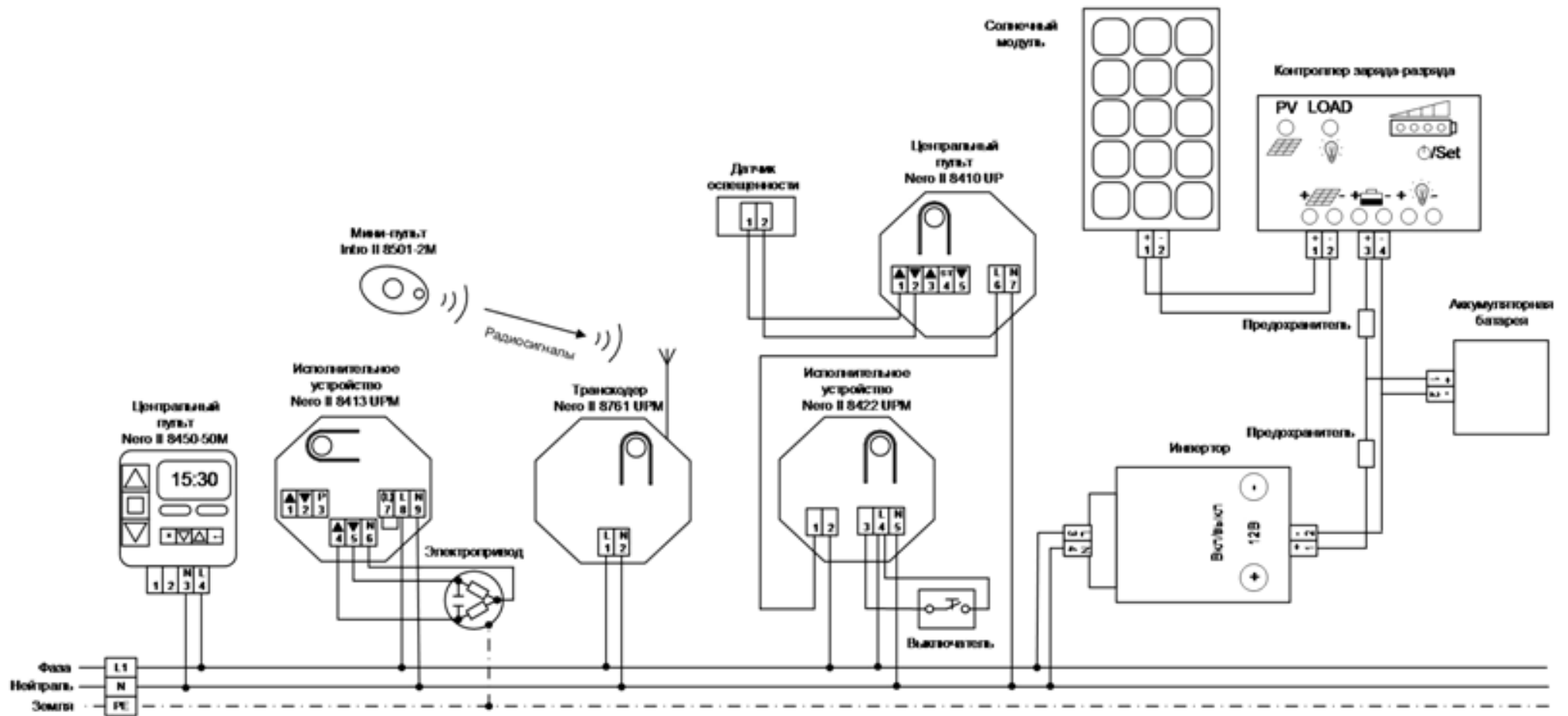


Рисунок 2.18 – Электрическая схема демонстрационного стенда «Энергоэффективный оконный блок с применением теплоотражающих экранов и солнечной фотоэлектрической панели»





Рисунок 2.19 – Внешний вид разработанного экспериментального образца автоматизированной системы управления работой теплоотражающего экрана с солнечной фотоэлектрической батареей для оконного блока

Рассмотрим назначение отдельных компонентов разработанной системы.

Центральный пульт Nero II 8450-50M является центральным управляющим устройством, объединяющим устройства системы Nero II в одно целое. С его помощью выполняется задание режимов управления, а также управление работой теплоотражающих экранов в ручном режиме.

Исполнительное устройство Nero II 8413 UPM предназначено для управления работой электропривода теплоотражающих экранов по командам от центрального пульта или других устройств системы. Электропривод перемещает теплоотражающие экраны с солнечной панелью относительно оконного блока (в режиме открытия - закрытия).

Транскодер Nero II 8716 UPM предназначен для совмещения интеллектуальной системы управления по сети 220 В Nero II и системы радиуправления Intro II. Выполняет преобразование радиокоманд от мини-пульта Intro II 8501-2М.

Мини-пульт двухканальный Intro II 8501-2М предназначен для управления положением теплоотражающих экранов в дистанционном ручном режиме.

Датчик освещенности, центральный пульт Nero II 8410 UP и исполнительное устройство Nero II 8422 UPM предназначены для реализации режима управления перемещения теплоотражающих экранов с солнечной батареей по сигналу от наружной освещенности.

Питание экспериментального образца в нормальном режиме выполняется при помощи энергии, накопленной в аккумуляторной батарее. Аккумуляторная батарея заряжается от солнечного модуля. Контроль заряда-разряда аккумуляторной батареи осуществляет соответствующий контроллер. Инвертор преобразует постоянный ток от аккумуляторной батареи в переменный с повышением напряжения до 220 В. При отсутствии энергии в аккумуляторной батарее возможно питание системы от сети 220 В.

## **2.5 Выводы по второму разделу**

1. На основании анализа климатических условий ряда городов Российской Федерации в течение нескольких месяцев обосновано предложение о применении теплоотражающих экранов, в том числе и с солнечными фотоэлектрическими панелями, в светопрозрачных ограждающих конструкциях в целях снижения трансмиссионных теплопотерь, инсоляции при организации микроклимата в помещении, а также генерации электрической энергии.

2. Предложен график использования теплоотражающих экранов с фотоэлектрическими солнечными панелями в светопрозрачных конструкциях для помещений производственного, общественного и административно-бытового назначения для условий рабочего и выходного дня холодного и теплого периодов года. Данный график позволяет оценить энергоэффективность применения данных конст-

рукций в темное время суток и во время отсутствия людей в помещении, а также в периоды наибольшей инсоляции по различным сторонам света.

3. Предложены новые энергосберегающие решения в светопрозрачных конструкциях, в том числе с использованием теплоотражающих экранов и солнечных фотоэлектрических батарей, которые позволяют не только снижать тепловые трансмиссионные потери и инсоляцию, но и генерировать электрическую энергию. Разработаны теплоотражающие экраны рулонного, панельного и жалюзийного вида, целесообразность применения которых определяется геометрическими и физическими характеристиками ограждающих конструкций зданий и принятыми решениями в области организации микроклимата в помещении.

4. Разработаны новые решения по автоматизации работы теплоотражающих экранов, в том числе и с фотоэлектрическими солнечными панелями, в светопрозрачных конструкциях, позволяющие эффективно использовать предложенные энергоэффективные установки при энергообеспечении помещений различного назначения.

5. Изготовлен экспериментальный образец автоматизированной системы управления работой теплоотражающего экрана с солнечной фотоэлектрической батареей для оконного блока для наглядности представления разработанных энергосберегающих решений. Разработанная система позволяет выполнять управление работой теплоотражающих экранов по заданному графику, по сигналу наружной освещенности, при помощи дистанционного пульта и выключателя. Питание экспериментального образца выполняется от возобновляемого источника электроэнергии (солнечного модуля) при помощи разработанной системы электроснабжения. Энергия, вырабатываемая солнечным модулем, может использоваться не только для обеспечения работы системы автоматического управления тепло- и электроснабжением, но и других потребителей электроэнергии.

6. Разработанные технические решения рекомендованы к внедрению на эксплуатируемых объектах техническими службами Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ), а также энергобюро машиностроительной компании АО "ПСК", г. Иваново. Демонстрационный стенд «Энергоэффективный

оконный блок с применением теплоотражающих экранов и солнечной фотоэлектрической панели» (см. рисунки 2.18, 2.19), а также технические решения по совершенствованию светопрозрачных ограждающих конструкций внедрены во всех видах учебной и научно-исследовательской деятельности на кафедре промышленной теплоэнергетики ИГЭУ, в том числе в виде раздела в учебнике "Системы кондиционирования, вентиляции и отопления" [212]. Соответствующие акты внедрения приведены в Приложении В.

Материалы второго раздела опубликованы в работах [189, 190, 191, 193, 196, 197, 200, 202, 204-210, 212].

### **3 Экспериментальное исследование теплозащитных свойств окон с теплоотражающими экранами**

Целью данного исследования является экспериментальное изучение влияния применения теплоотражающих экранов на теплотехнические характеристики оконных блоков, и, в большей степени, на характеристики светопрозрачной части окна.

Для выполнения данной цели были поставлены задачи исследования влияния на теплотехнические характеристики окна:

- места расположения экранов относительно остекления;
- совместного использования теплоотражающих экранов и покрытия на стёкла;
- количества применяемых экранов;
- угла поворота ламели жалюзийного экрана;
- нанесения лакокрасочных покрытий;
- температурных режимов эксплуатации энергосберегающей конструкции;
- инерционных свойств экранов.

#### **3.1 Описание экспериментальной установки**

Основная экспериментальная программа была выполнена в сертифицированной климатической камере испытательной лаборатории АНО «Ивановостройиспытания» (автономная некоммерческая организация). Полномочия и техническая компетентность АНО «Ивановостройиспытания» для проведения сертификационных испытаний по определению приведенного сопротивления теплопередаче блоков оконных подтверждаются Аттестатом аккредитации испытательной лаборатории № РОСС RU.0001.21СМ44 от 30.09.2010 г., выданным Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии Российской Федера-

ции. Предварительный эксперимент проводился на испытательной установке в лаборатории кафедры промышленной теплоэнергетики ИГЭУ.

Климатическая камера АНО «Ивановостройиспытания» изготовлена в соответствии с ГОСТ 26602.1-99 «Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче» [31] (действующий), а также ГОСТ Р 54861-2011 «Окна и наружные двери. Методы определения сопротивления теплопередаче» [37] (отменен 01.06.2019).

Камера (рисунок 3.1, рисунок 3.2) состоит из двух отделений (холодного и теплого), разделенных смежной теплоизолированной перегородкой с проемом для установки испытуемого изделия. Исследуемые оконные блоки крепились в проеме с помощью шпилек и прижимных рамок через уплотняющую прокладку. Размер рам исследуемых оконных блоков составлял 1500x1250 мм.

Температура воздуха в тёплом отделении камеры задаётся в пределах от плюс 17 до плюс 21 °С и поддерживается с помощью электрического нагревателя, подключённому к измерителю-регулятору температуры ИРТ-8/16. Температура в холодном отделении задаётся от плюс 5 до минус 30 °С и обеспечивается с помощью двухступенчатой холодильной установки, подключённой к измерителю-регулятору температуры ИРТ-8/16. Отвод теплоты из холодного отделения осуществляется в первой ступени холодильной установки с помощью конденсатора 2 воздуху, находящемуся в промежуточной камере (рисунок 3.3). Отвод теплоты во второй ступени холодильной установки осуществляется с помощью конденсатора проточной воде системы городского водопровода. Для интенсификации теплообмена в промежуточной воздушной камере холодильной установки установлен дополнительный вентилятор 3.

Для моделирования условий окружающей среды в холодном отделении воздух циркулирует вдоль поверхности испытуемого образца, обеспечивая теплообмен с интенсивностью теплоотдачи  $15 \div 24 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ , а в теплом отделении теплообмен обеспечивается естественной циркуляцией воздуха и излучением от ограждений климатической камеры с интенсивностью теплоотдачи  $7 \div 11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ .

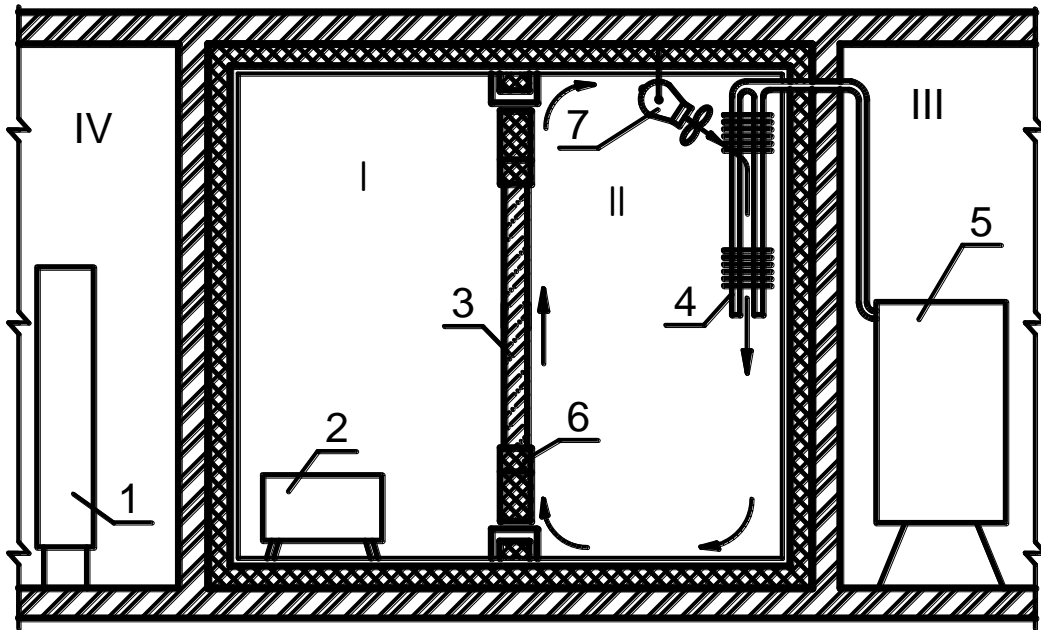


Рисунок 3.1 – Схема климатической камеры для проведения испытаний:

I – «теплое» отделение камеры; II – «холодное» отделение камеры; III – промежуточная камера двухступенчатой холодильной установки; IV – помещение с ЭВМ; 1 – система автоматического сбора данных; 2 – нагревательные приборы; 3 – испытываемый образец; 4 – испаритель; 5 – компрессорно-конденсаторный блок 1 ступени холодильной установки; 6 – теплоизоляционный слой по периметру проема; 7 – вентилятор



Рисунок 3.2 – Общий вид климатической камеры испытательной лаборатории:

1 – теплое отделение камеры; 2 – ЭВМ; 3 – теплоизолированная перегородка с проемом под испытываемый образец

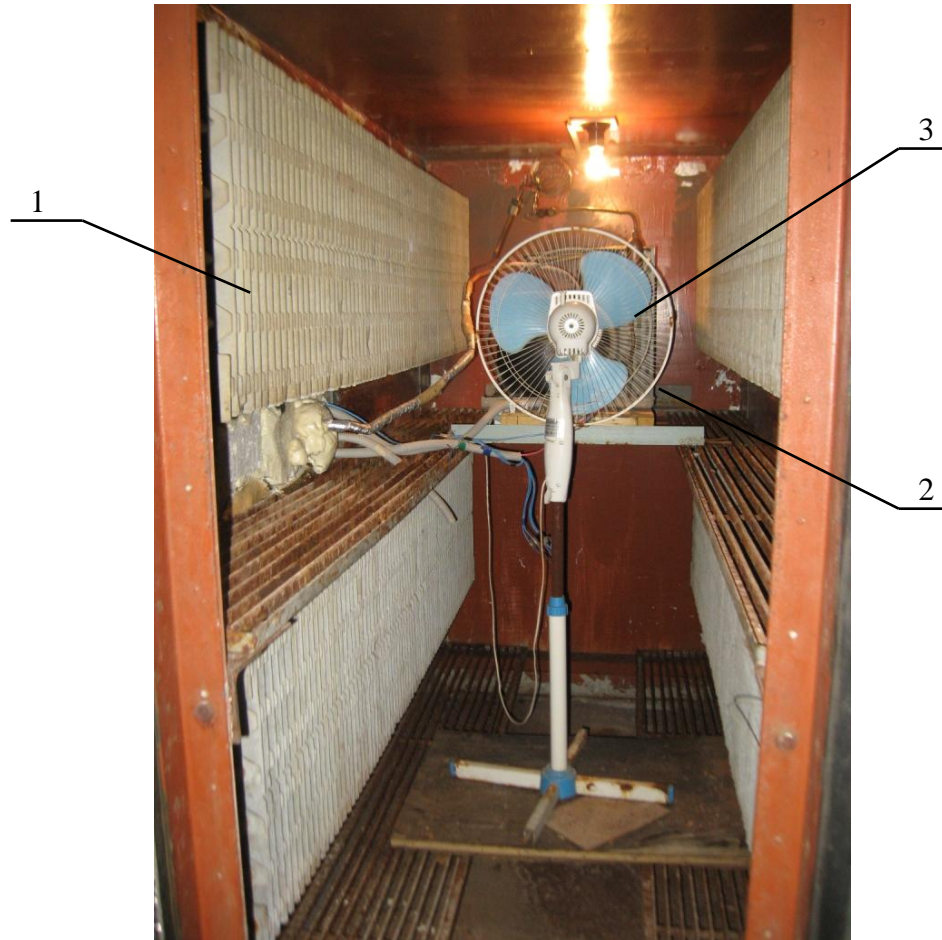


Рисунок 3.3 – Промежуточная камера двухступенчатой холодильной установки: 1 – испаритель второй ступени; 2– компрессорно-конденсаторный блок первой ступени; 3 – вентилятор для интенсификации теплообмена

Для определения теплотехнических характеристик светопрозрачных конструкций и фрагментов кирпичной кладки в испытательной лаборатории АНО «Ивановстройиспытания» смонтирована автоматизированная Система измерений сопротивления теплопередаче (сопротивления теплового) ограждающих конструкций IV поколения (СИСТОК-IV) (см. рисунок 3.4.), разработанная сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева) [120, 121]. Данная система была смонтирована, отлажена и аттестована для использования в климатической камере АНО «Ивановстройиспытания» инженерами и научными сотрудниками ВНИИМ им. Д.И. Менделеева под руководством Учёного хранителя государственного эта-



лона теплопроводности, профессора ВНИИМ им. Менделеева, д.т.н. Соколова Н.А.. СИСТОК-IV является высокоточной современной аттестованной системой по измерению сопротивления теплопередаче конструкций [117, 118, 119].

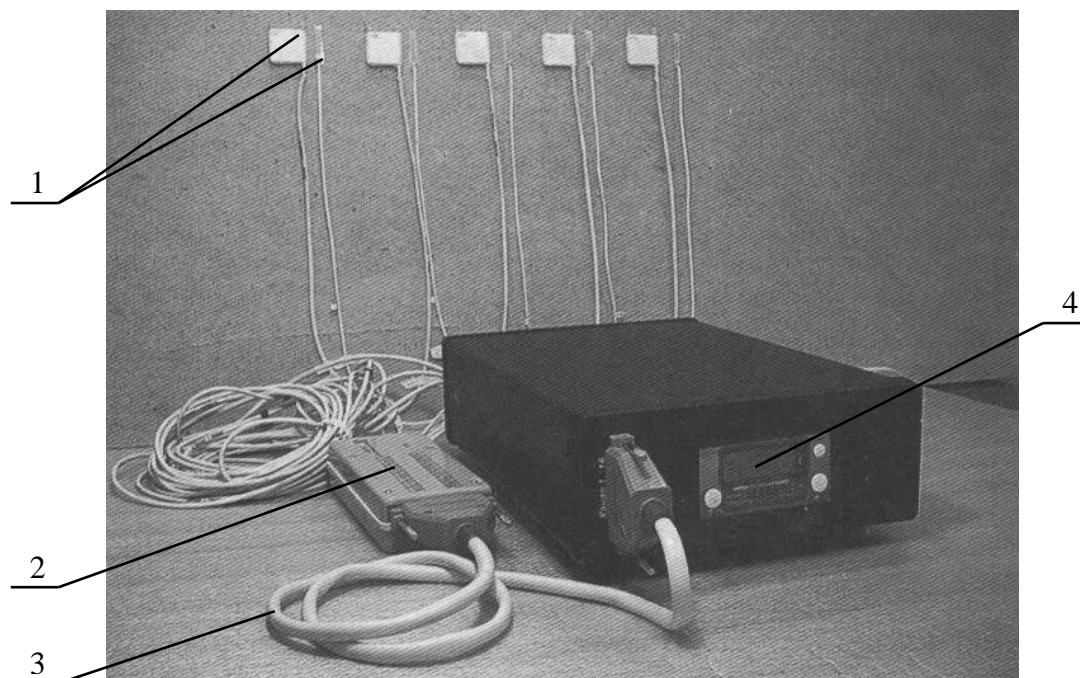


Рисунок 3.4 – Общий вид системы СИСТОК-IV: 1– датчики; 2 – устройство компенсации УК-4; 3 – соединяющий кабель; 4 – контроллер ИТ-2-16

В качестве датчиков используются преобразователи термоэлектрические (далее термопары) и преобразователи тепловых потоков.

Термопары (см. рисунок 3.5) выполнены из хромель-копелевой проволоки согласно ГОСТ 1790-77 [28]. Диапазон измерений от минус 40 до 50 °С.

Тепловые потоки измерялись преобразователями тепловых потоков (далее тепломеры) (см. рисунок 3.6) на основе термобатареи PE-128-10-08-S-GL с размерами 35x35 мм.

Толщина тепломера составляет 2,1 мм. Преобразователи тепловых потоков, как и термопары изготовлены ВНИИМ им. Менделеева. Данные тепломеры обладают высокой чувствительностью в пределах от 3,5 до 3,7 Вт/(мВ·м<sup>2</sup>).

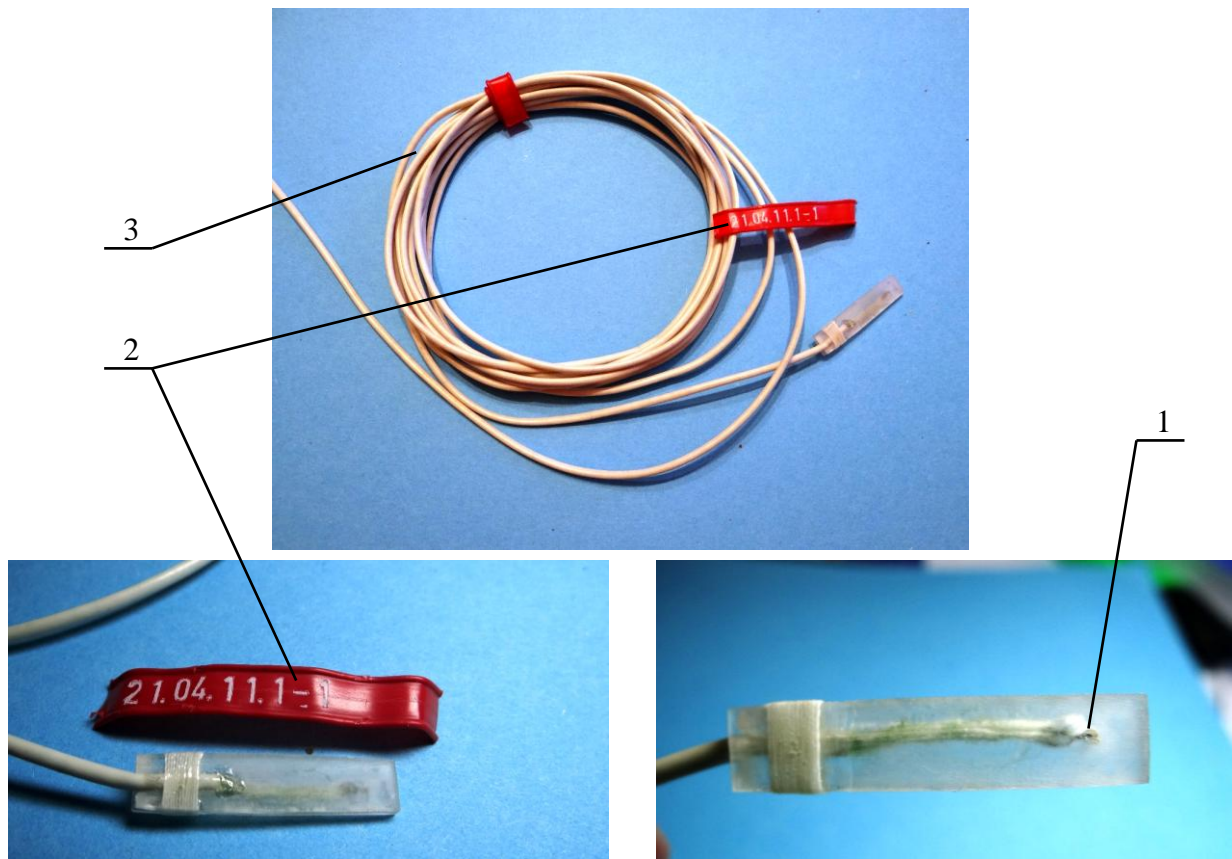


Рисунок 3.5 – Термопара хромель-копелевая: 1 – королёк термопары; 2 - номер термопары;  
3 – хромель-копелевая проволока

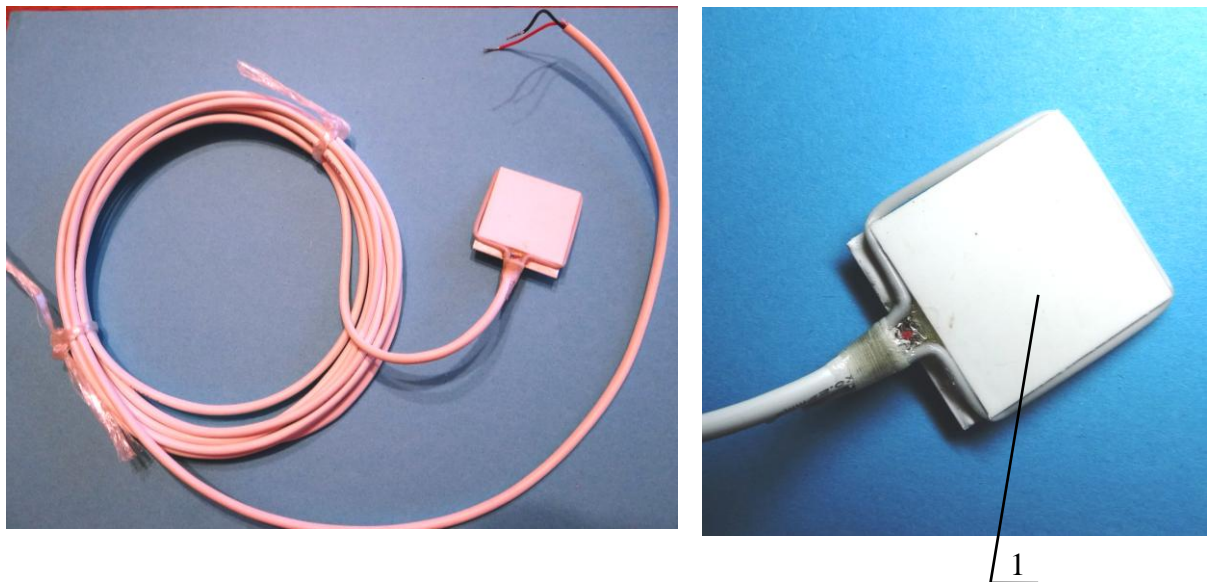


Рисунок 3.6 – Тепломер: 1 – термобатарея PE-128-10-08-S-GL

Действие преобразователей тепловых потоков, выполненных в виде вспомогательной стенки, основано на использовании физической закономерности возникновения разности температур на стенке при прохождении через неё теплового потока [83]. Датчик выполнен в виде монолитной жесткой конструкции и состоит из батареи термоэлементов, заформованной электроизоляционным заливочным компаундом в корпус – металлический прямоугольник с отверстиями для вывода двух потенциалосъёмных проводников.

Согласно ГОСТ 26602.1-99 [31] спай термопар и тепломеры крепились к поверхностям образца (см. рисунок 3.7) при помощи липкой ленты. На рабочую поверхность тепломера предварительно наносили тонкий слой вазелина.

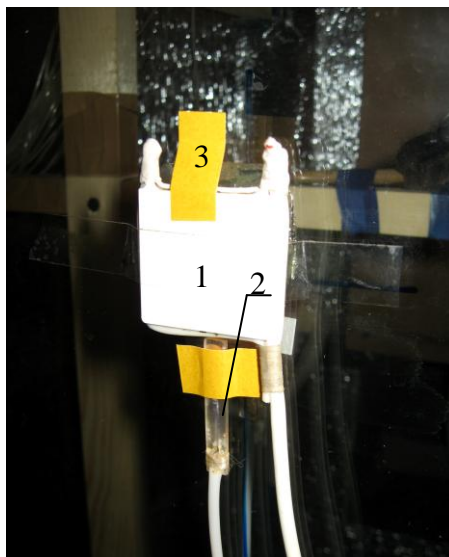


Рисунок 3.7 – Схема крепления тепломера и термопары к стеклу: 1– тепломер; 2 – спай термопары; 3 – липкая лента

Термопары на поверхностях образца оконного блока были установлены по вертикальной и горизонтальным осям в центрах однородных температурных зон светопрозрачной и непрозрачной частей. При испытаниях стеклопакета термопары были установлены в центральной и краевых зонах поверхностей стеклопакета (см. рисунок 3.8).

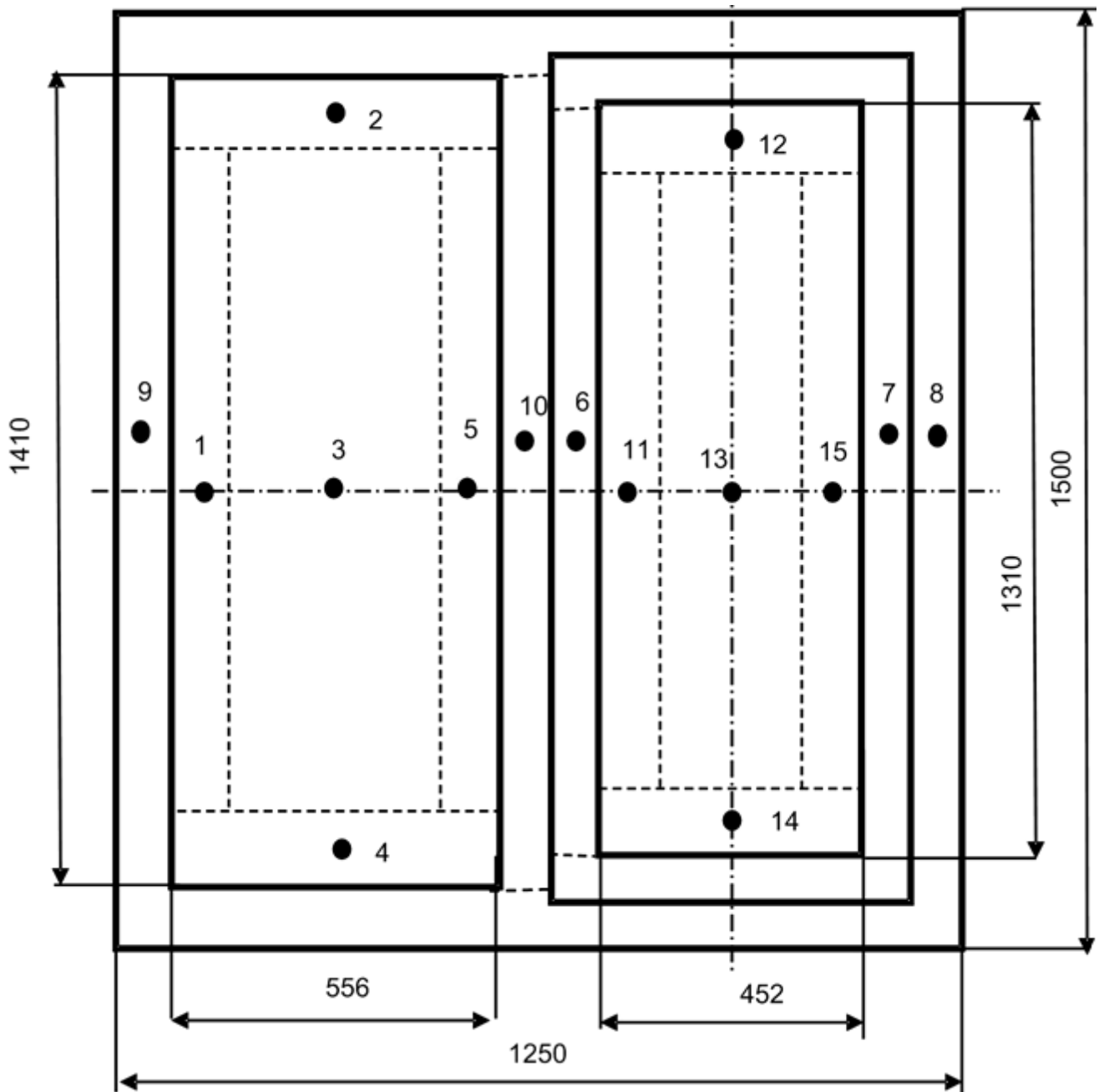


Рисунок 3.8 – Схема размещения термопар и тепломеров на образце оконного блока (цифрами указаны номера точек замера температур и тепловых потоков)

Спары термопар располагаются на наружной и внутренней поверхностях стеклопакета и профиля напротив друг друга (см. рисунок 3.9).

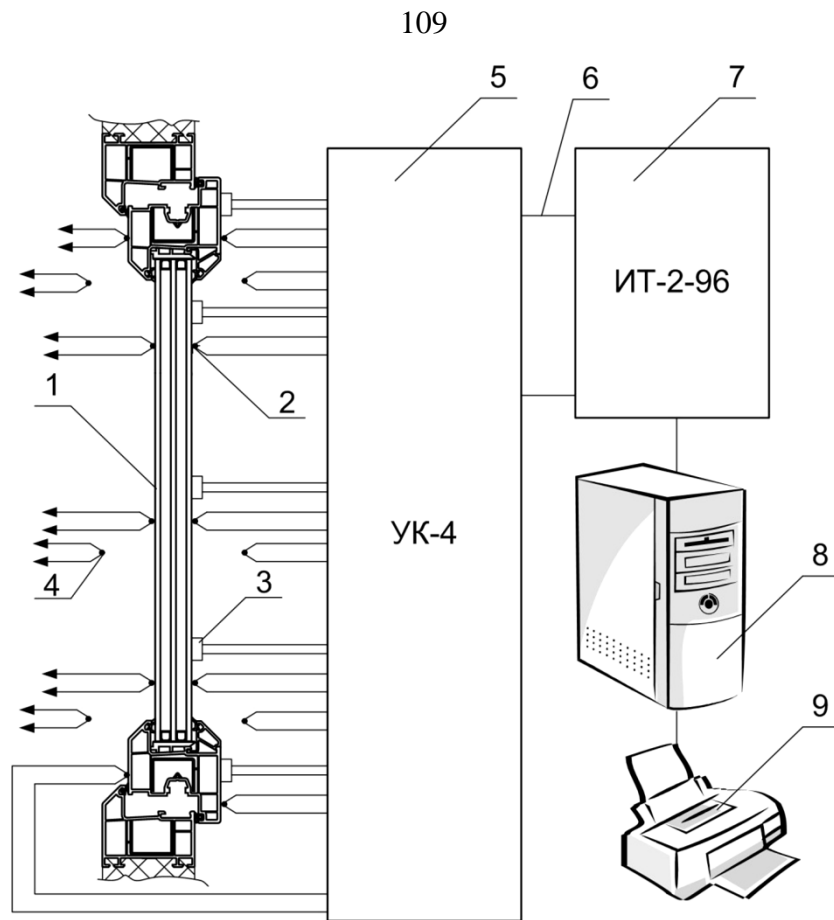


Рисунок 3.9 – Схема СИСТОК-IV на базе ИТ-2-96: 1 – оконный блок; 2 – спай термопары на поверхности материала; 3 – термомер; 4 – спай термопары для измерения температуры воздуха в отделениях; 5 – устройство компенсации УК-4; 6 – соединительный кабель; 7 – ИТ-2-96; 8 – ЭВМ; 9 – принтер; 10 – планки крепления окна; 11 – передвижная планка для размещения термопар

Для измерения температуры воздушной среды [31] с теплой и холодной сторон образца оконного блока установлены термопары на расстоянии 0,15 м от наружной и внутренней поверхностей. Для измерения плотности тепловых потоков тепломеры установлены в центрах однородных зон на внутренней поверхности окна со стороны теплого отделения (см. рисунок 3.9).

СИСТОК-IV, установленная в АНО «Ивановостройиспытания», снабжена разработанным ВНИИМ им. Менделеева совместно с Омским заводом «Эталон» контроллером ИТ-2-96 [120], предназначенным для измерения напряжения, поверхностной плотности теплового потока или температуры по 96 каналам при помощи подключаемых к прибору датчиков с индивидуальной градуировкой. В прибор входит устройство компенсации УК-4 для подключения входных сигналов от датчиков к прибору. Датчики подключаются через клеммы устройства компенсации УК-4. В состав УК-4 также входит датчик температуры, с помощью которого осуществляется измерение температуры холодных концов термопар.

Предел допускаемой основной погрешности прибора  $\Delta$ , мкВ, (в диапазоне от минус 99,9 до +99,9 мВ) определяют по формуле:

$$\Delta = \pm(5 + 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot |U_{\text{изм}}|), \quad (3.1)$$

где  $U_{\text{изм}}$  - измеренное напряжение, мкВ.

Абсолютная погрешность измерения температуры «холодных» и «рабочих» спаев термопар составляет  $\pm 0,5$  °С ( в диапазоне температур от минус 50 до +50° С ).

Программа обслуживания прибора обеспечивает выполнение следующих функций [120]:

- а) считывание измеренных значений в реальном масштабе времени с возможностью последующей обработки;
- б) выбор режима измерений: непрерывное измерение или заданное количество циклов измерений (от 1 до 1000);
- в) выбор интервала времени между циклами измерений (0...60 минут);
- г) выбор опрашиваемых каналов (от 1 до 96);
- д) вывод в таблицу температуры «холодных» спаев термопар  $T_x$ , °С;

- е) вывод в таблицу времени измерения или номера текущего измерения;
- ж) вывод в таблицу результатов измерений в виде:

1) напряжения  $U_{изм}$ , мВ;

2) поверхностной плотности теплового потока

$$A_0 + A_1 \cdot U_{изм} + A_2 \cdot (U_{изм})^2 + A_3 \cdot (U_{изм})^3 + A_4 \cdot (U_{изм})^4, \text{ Вт/м}^2; \quad (3.2)$$

3) температур

$$A_0 + A_1 \cdot U + A_2 \cdot U^2 + A_3 \cdot U^3 + A_4 \cdot U^4, \quad (3.3)$$

$$U = U_{изм} + B_0 + B_1 \cdot T_x + B_2 \cdot (T_x)^2 + B_3 \cdot (T_x)^3 + B_4 \cdot (T_x)^4, [^\circ\text{C}], \quad (3.4)$$

где  $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4$  и  $B_0, B_1, B_2, B_3, B_4$ , - коэффициенты полинома. Вывод в таблицу измеренных значений производится с разрешением 0,001 мВ, 0,01 Вт/м<sup>2</sup> или 0,01 °С, соответственно. Способ вывода в таблицу и вид градуировочной характеристики определяется индивидуально для каждого канала.

з) сохранение данных в файле, который может быть обработан как посредством программы обслуживания, так и любыми стандартными средствами, позволяющими работать с текстовыми файлами, например, Microsoft Excel.

и) вывод данных на печать;

к) проведение подстройки прибора.

Согласно данным исследований Учёного хранителя государственного эталона теплопроводности, профессора ВНИИМ им. Менделеева, д.т.н. Соколова Н.А. [120] отклонение измеренного сопротивления теплопередаче от значения эталонного образца в подавляющем большинстве испытательных лабораторий с СИСТОК IV не превышает 4 % и находится в пределах, допускаемых ГОСТ 26602.1-99 в 5 %.

Поверочные аттестационные испытания, выполненные в лаборатории АНО «Ивановстройиспытания» при подтверждении аккредитации лаборатории, показали, что отклонение измеренных значений приведенного сопротивления теплопередаче и теплопроводности от эталонного были не более 4 % (для диапазона температур от минус 40 до +50 °С), что также удовлетворяет требованиям ГОСТ 26602.1-99 [31].

Абсолютная погрешность измерения геометрических размеров (ширины, длины и высоты) составила 1 мм.

Климатическая камера также укомплектована источником постоянного тока, стеклянными термометрами, психрометром аспирационным МВ-4М, рулеткой РЗУЗД, а также мерой теплопроводности из органического стекла согласно ГОСТ 17622-72 [27].

### **3.2 Разработка методики испытаний окон с теплоотражающими экранами**

При разработке методики испытания окон с теплоотражающими экранами за основу были взяты положения ГОСТ 26602.1-99 «Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче» [31]. В стандартную методику проведения эксперимента были внесены изменения, учитывающие специфику расположения теплоотражающих экранов относительно слоев остекления в экспериментальных светопрозрачных конструкциях и применение переменных температурных режимов испытаний.

Эксперимент проводили в следующей последовательности.

#### **3.2.1 Подготовка к работе**

Перед проведением комплекса экспериментов выполняли поверку измерительного оборудования климатической камеры с помощью образцовой меры теплопроводности ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. В случае необходимости, осуществляли индивидуальную градуировку датчиков (тепломеров, термопар).

Были рассмотрены три базовых варианта конструкции оконных блоков. Вариант 1 – оконный блок с однокамерным стеклопакетом СПО 4М1-10-4М1 и стеклом 4М1 в отдельных деревянных переплетах. Вариант 2 – стеклопакет двухкамерный СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 в переплете из поливинилхлорида (ПВХ). Вариант 3 – стеклопакет двухкамерный с мягким селективным покрытием



СПД 4М1-10-4М1-10-И4 в переплете из поливинилхлорида (ПВХ). Испытания оконных блоков проводили на образцах полной заводской готовности, изготовленных в соответствии с нормативной и технической документацией на светопрозрачные конструкции. Оконный блок монтировался в проем перегородки, причём монтажные зазоры уплотняли специальным теплоизоляционным шнуром на липкой основе. Стыки также герметизировали мастикой.

Размещали термопары на внутренних и наружных поверхностях светопрозрачной (остеклении) и непрозрачной (профиль) частей оконного блока (см. рисунок 3.9) в соответствии со схемой расположения датчиков (см. рисунок 3.8). Тепломеры устанавливали на внутренней поверхности оконного блока. При измерении температуры воздуха в тёплом и холодном отделениях термопары устанавливали на расстоянии 150 мм от остекления с помощью передвижной планки.

### **3.2.2 Проведение испытаний базового варианта конструкции оконного блока**

Для обеспечения необходимых значений температуры включали систему автоматического поддержания параметров воздуха, холодильное, нагревательное, вентиляционное и другое оборудование. Для выполнения требований ГОСТ 26602.1-99 [31] в данной камере обеспечивалась разность температур воздуха в тёплом и холодном отделении не менее 30 °С, поэтому с помощью прибора ИРТ-8/16 в тёплом отделении задавалась температура  $t_{\text{в}}$  около +20 °С, в холодном  $t_{\text{н}}$  – от минус 15 до минус 22 °С.

Измерения температуры и теплового потока при испытаниях в климатической камере проводили одновременно при помощи дистанционных приборов (ИТ-2-96) и компьютера. Нахождение людей и не используемой при испытаниях измерительной аппаратуры в тёплом и холодном отделениях климатической камеры во время проведения измерений не допускалось.

Режим теплопередачи через испытываемый образец считался стационарным, если результаты повторных, с интервалом не менее 0,5 ч, измерений температуры на поверхностях однородных зон образца со стороны теплого отделения отличались друг от друга не более чем на 0,3 °С, а значения термического сопротивления, вычисленные по результатам последовательных измерений сигналов термодатчиков, отличались друг от друга не более чем на 5%. В среднем время выхода на стационарный режим с момента запуска системы автоматического поддержания параметров воздуха составляло от 5 до 6 часов.

Измерение температуры и плотности тепловых потоков проводили не менее трех раз с интервалом не менее 1 ч.

Для получения качественной картины распределения температур на поверхности остекления и определения границ однородных температурных зон также использовался вспомогательный тепловизионный метод обследования [99]. Результаты, полученные с его помощью, в дальнейшем проверяются стандартизированным методом. Термограмма, полученная с помощью тепловизора, после соответствующей компьютерной обработки даёт достаточно подробную картину распределения температурных полей по плоскости окна. Градация выделенных изотермических поверхностей определяется разрешающей способностью тепловизора (до 0,1 К). Кроме того, при проведении экспериментов с помощью тепловизора определялись места плохой теплоизоляции (герметизации) оконного блока в районе стыков и данные дефекты устранялись.

Проводилась тепловизионная съёмка с помощью тепловизора TESTO-882 [117]. Предел допускаемой погрешности диапазоне измеряемых температур от минус 20 до + 100 °С составлял  $\pm 2$  °С.

### **3.2.3 Обработка результатов испытаний базового варианта конструкции оконного блока**

Обработка результатов прямых многократных измерений температуры поверхностей и воздуха, тепловых потоков осуществлялась на основании требова-

ний ГОСТ Р 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения» [38], а также ГОСТ 26602.1-99 «Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче» [31]. Система проводила по 60 измерений значений величин при каждом установившемся режиме. Опытные данные обрабатывались методами математической статистики с использованием критерия Стьюдента.

Термическое сопротивление  $i$ -й однородной зоны испытываемого образца  $R_{ki}$  при измерении плотности тепловых потоков с помощью тепломеров определяли по формуле

$$R_{ki} = (\tau_{vi} - \tau_{ni}) / q_i, \quad (3.5)$$

где  $\tau_{vi}$ ,  $\tau_{ni}$  — средние температуры соответственно внутренней и наружной поверхностей  $i$ -й зоны за период измерений, °С;

$q_i$  — средняя плотность теплового потока, проходящего через  $i$ -ю зону за период измерений, Вт/м<sup>2</sup>.

Приведенное термическое сопротивление светопрозрачной  $R_{\kappa}^{ct}$  и непрозрачной  $R_{\kappa}^p$  частей оконного блока определяли по формулам:

$$R_{\kappa}^{ct} = \sum_{i=1}^m A_i / \sum_{i=1}^m (A_i / R_{ki}) \quad (3.6)$$

$$R_{\kappa}^p = \sum_{j=1}^n A_j / \sum_{j=1}^n (A_j / R_{kj}), \quad (3.7)$$

где  $m$ ,  $n$  — число однородных зон соответственно в светопрозрачной и непрозрачной частях блока;

$A_i$  — расчетная площадь  $i$ -й однородной зоны светопрозрачной части блока, м<sup>2</sup>;

$R_{ki}$  — термическое сопротивление  $i$ -й однородной зоны с светопрозрачной части блока, м<sup>2</sup>·°С/Вт;

$A_j$  — расчётная площадь  $j$ -й однородной зоны непрозрачной части блока, м<sup>2</sup>;

$R_{kj}$  — термическое сопротивление  $j$ -й однородной зоны непрозрачной части блока,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ .

Приведенное термическое сопротивление испытанного оконного блока  $R_k^{\text{np}}$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , определяли по формуле

$$R_k^{\text{np}} = (A_{\text{ст}} + A_p) / [(A_{\text{ст}} / R_k^{\text{ст}}) + (A_p / R_k^{\text{p}})], \quad (3.8)$$

где  $A_{\text{ст}}$ ,  $A_p$ , — площади расчётной поверхности светопропускающей и непрозрачной частей оконного блока,  $\text{м}^2$ .

Приведенное сопротивление теплопередаче испытанного оконного блока  $R_0^{\text{np}}$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , определяли по формуле

$$R_0^{\text{np}} = 1 / \alpha_{\text{в}} + R_k^{\text{np}} + 1 / \alpha_{\text{н}}, \quad (3.9)$$

где  $R_k^{\text{np}}$  — приведенное термическое сопротивление испытанного оконного и дверного блоков,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ;

$\alpha_{\text{в}}$ ,  $\alpha_{\text{н}}$  — коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей блока, принимаемые равными  $\alpha_{\text{в}} = 8,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ,  $\alpha_{\text{н}} = 23,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$  [31].

Согласно ГОСТ 26602.1-99 [31] результаты теплотехнических испытаний оконного блока могут быть распространены на типоразмерный ряд изделий (серию), отличающихся габаритными размерами и относительной площадью остекления. Значения приведенного термического сопротивления оконных блоков типоразмерного ряда можно определить по формуле

$$R_k^{\text{np}} = \frac{1}{\beta / R_k^{\text{ст}} + (1 - \beta) / R_k^{\text{p}}}, \quad (3.10)$$

где  $R_k^{\text{ст}}$  — приведенное термическое сопротивление светопрозрачной части испытанного оконного блока, определенное по формуле (6),  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ;

$R_k^{\text{p}}$  — приведенное термическое сопротивление непрозрачной части испытанного оконного блока, определенное по формуле (7),  $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ;

$\beta$  — отношение площади остекления к площади заполнения светового проема рассчитываемого оконного блока типоразмерного ряда.

Приведенное сопротивление теплопередаче оконных блоков типоразмерного ряда вычисляют по формуле (3.9) с учетом значений приведенного термического сопротивления.

Как следует из формулы (3.9) при определении приведенного сопротивления теплопередаче испытанного оконного блока к термическому сопротивлению окна также добавляются нормируемые сопротивления теплопередаче воздуха со стороны тёплого отделения и холодного, причём коэффициенты теплоотдачи принимаются равными  $\alpha_{\text{в}} = 8,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ,  $\alpha_{\text{н}} = 23,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ , причём нормируемое сопротивление теплопередаче с наружной и внутренней стороны окна можно определить как

$$R_{\text{г}} + R_{\text{н}} = 1/\alpha_{\text{г}} + 1/\alpha_{\text{н}} = 1/8 + 1/23 = 0,168 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}. \quad (3.11)$$

Согласно исследованиям проф. Н.А. Соколова [120] и М.И. Низовцева [71] при значительном увеличении интенсивности теплообмена за счёт повышения скорости движения воздуха в холодном отделении, весомом понижении температуры наружного воздуха термическое сопротивление оконного блока уменьшается. Так, при увеличении интенсивности теплообмена и снижении сопротивления со стороны внутреннего и наружного воздуха  $R_{\text{г}} + R_{\text{н}}$  с 0,168 до 0,134 (м<sup>2</sup>·°C)/Вт (или на 20,2 %) термическое сопротивление центральной зоны стеклопакета 4М1-Аг15-И4 снизилось с 0,487 (м<sup>2</sup>·°C)/Вт до 0,465 (м<sup>2</sup>·°C)/Вт, или на 4,5 %, поэтому при проведении испытаний в климатической камере АНО «Ивановостройиспытания» в обязательном порядке нами производилась оценка соответствия коэффициентов теплоотдачи нормируемым значениям. Для этого определялись экспериментальные коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей блока  $\alpha_{\text{г}}^{\text{ЭК}}$ ,  $\alpha_{\text{н}}^{\text{ЭК}}$  в центральной зоне остекления, Вт/(м<sup>2</sup>·°C):

$$\alpha_{\text{г}}^{\text{ЭК}} = \frac{\overline{q^{4.3.}}}{t_{\text{г}} - \overline{\tau_{\text{г}}^{4.3.}}}; \quad (3.12)$$

$$\alpha_{\text{н}}^{\text{ЭК}} = \frac{\overline{q^{4.3.}}}{\overline{\tau_{\text{н}}^{4.3.}} - t_{\text{н}}}, \quad (3.13)$$

где  $\overline{q^{u.z.}}$  – усреднённый тепловой поток в центральной однородной зоне стеклопакета, Вт/м<sup>2</sup>;

$t_в, t_н$  – температуры воздуха соответственно в тёплом и холодных отделениях камеры, °С;

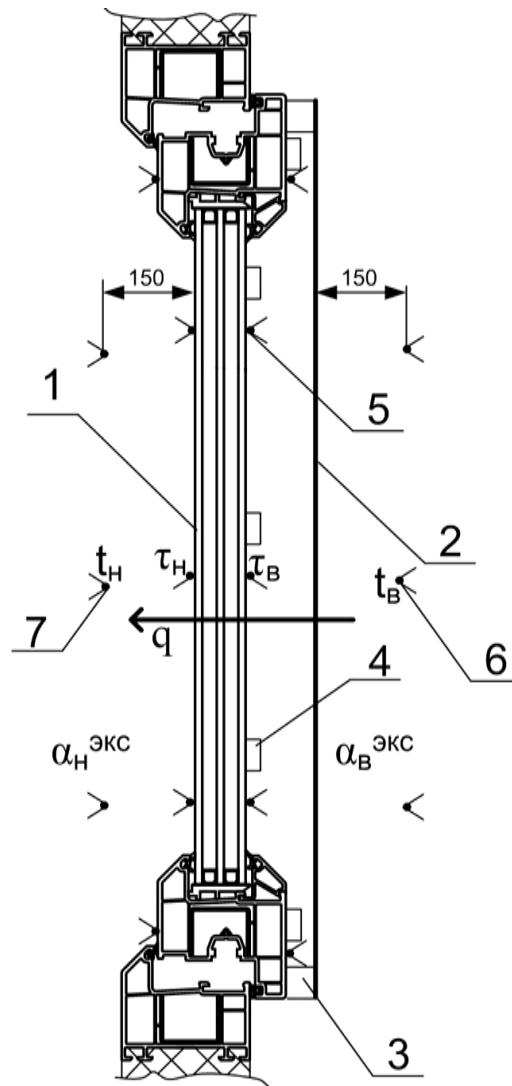
$\overline{\tau_в^{u.z.}}, \overline{\tau_н^{u.z.}}$  – средние температуры соответственно внутренней и наружной поверхностей центральной однородной зоны остекления, °С.

По формуле (3.11) определялись экспериментальные тепловые сопротивления теплопередачи внутренней и наружной поверхности однородной зоны  $R_в^{экс}$  и  $R_н^{экс}$ , затем они сравнивались с нормативными. В случае большого расхождения (более 10 %) принимались меры по приведению коэффициентов сопротивления теплопередачи к нормируемым путём регулирования скорости и направления потоков воздушных масс в отделениях камеры.

### **3.2.4 Проведение испытаний оконного блока с теплоотражающими экранами и обработка результатов**

После проведения испытаний контрольного оконного блока производилось крепление теплоотражающих экранов разного вида в различных комбинациях количества, типа, материала и места расположения. Термопары и тепломеры оставляли на прежних позициях (на остеклении) за исключением набора термопар, измерявших температуру внутреннего и наружного воздуха  $t_в$  и  $t_н$  – с помощью передвижной планки их располагали на расстоянии 150 мм от ближайшей со стороны внутреннего и наружного воздуха поверхности (см. рисунок 3.10).

Для снижения свободного доступа воздуха в пространство между экраном и стеклом и задания необходимого расстояния между слоём остекления и экраном использовали планки из полистирола, которые крепили по периметру профиля светопрозрачной части.



1 – оконный блок; 2 – экран; 3 – планка из полистирола; 4 – тепломер; 5 – термопары на остеклении; 6, 7- термопары для измерения температуры внутреннего и наружного воздуха

Рисунок 3.10 – Схема расположения датчиков при испытании окон с экраном

В местах прохода проводов от измерительных датчиков сквозь полистирольные рамки делали дополнительную герметизацию с помощью липкой ленты. Дело в том, что в ходе предварительных испытаний было выяснено, что свободный доступ внешнего воздуха в пространство между стеклом и экраном значительно снижает эффективность работы теплоотражающих экранов, повышая конвективную составляющую теплообмена, но речь не ведется о полной герметизации.

Как и при испытании оконного блока на регулирующей аппаратуре устанавливали заданные значения температур, включали систему автоматического поддержания параметров воздуха, холодильное, нагревательное,

вентиляционное и другое оборудование. Задавали необходимую разность температур и дожидались выхода системы на стационарный режим, после чего снимали показания с приборов, в том числе температуры на поверхностях стекла и профиля  $\tau_g$  и  $\tau_n$ , температуры воздуха  $t_g$  и  $t_n$ , тепловые потоки  $q$  в центрах однородных зон.

Термическое сопротивление окна с экранами определяли в следующей последовательности.

Находили приведённое экспериментальное сопротивление теплопередаче по каждой зоне по формуле

$$R_{0,i}^{np.экc} = (t_g - t_n) / q_i, \quad (3.14)$$

где  $t_{вн}$ ,  $t_{нв}$  — температуры соответственно внутреннего и наружного воздуха, °С;  
 $q_i$  — средняя плотность теплового потока, проходящего через  $i$ -ю зону за период измерений, Вт/м<sup>2</sup>.

Определяли приведенное сопротивление теплопередаче светопропускающей  $R_0^{ст}$  и непрозрачной  $R_0^p$  частей оконного блока с экранами по формулам:

$$R_0^{ст.экc} = \sum_{i=1}^m A_i / \sum_{i=1}^m (A_i / R_{0,i}^{np.экc}); \quad (3.15)$$

$$R_0^{p.экc} = \sum_{j=1}^n A_j / \sum_{j=1}^n (A_j / R_{0,j}^{np.экc}), \quad (3.16)$$

где  $R_{0,i}^{np.экc}$  — приведенное экспериментальное сопротивление  $i$ -й однородной зоны светопрозрачной части блока, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;

$R_{0,j}^{np.экc}$  — приведенное экспериментальное сопротивление  $j$ -й однородной зоны непрозрачной части блока, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт.

Определяли термическое сопротивление светопрозрачной и непрозрачной части оконного блока по формулам:

$$R_k^{ст} = R_0^{ст.экc} - R_g^{экc} - R_n^{экc}; \quad (3.17)$$

$$R_k^p = R_0^{p.экc} - R_g^{экc} - R_n^{экc}. \quad (3.18)$$



Определяли приведенное сопротивление теплопередаче светопропускающей  $R_0^{ct}$  и непрозрачной  $R_0^p$  частей оконного блока с экранами в соответствии с нормируемыми коэффициентами теплоотдачи по формулам:

$$R_0^{ct} = 1/\alpha_e + R_k^{cm} + 1/\alpha_n; \quad (3.19)$$

$$R_0^p = 1/\alpha_e + R_k^p + 1/\alpha_n, \quad (3.20)$$

где  $\alpha_e, \alpha_n$  — коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей блока, принимаемые по ГОСТ 26602.1-99 равными  $\alpha_e = 8,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ,  $\alpha_n = 23,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ .

Определяли приведенное сопротивление теплопередаче оконного блока с экраном (с нормируемыми коэффициентами теплоотдачи) по формуле:

$$R_0^{np} = (A_{ct} + A_p) / [(A_{ct} / R_0^{ct}) + (A_p / R_0^p)]. \quad (3.21)$$

ГОСТ 26602.1-99 [31] устанавливает требования о том, что при испытаниях должна обеспечиваться разность температур воздуха в тёплом и холодном отделении климатической камеры не менее  $30 \text{ °C}$ , причем значение температуры в холодном отделении необходимо «задавать согласно программе испытаний». В ходе выполнения предварительного эксперимента было установлено, что сопротивление теплопередаче оконного блока с использованием теплоотражающих экранов существенно зависит от разности температур воздуха в теплом и холодных отделениях, причем эта зависимость носит нелинейный характер. Вследствие данного обстоятельства в стандартную методику определения сопротивления теплопередаче оконных блоков [31] также были внесены изменения, касающиеся температурного режима испытаний. Так, при установлении количественной характеристики нелинейности зависимости приведенного сопротивления теплопередаче оконных блоков с теплоотражающими экранами от разности температур (см. подраздел 3.5), значение температуры воздуха в холодном отделении климатической камеры варьировали от минус  $15$  до  $+5 \text{ °C}$ . Перепад температур воздуха в отделениях составлял от  $35$  до  $15 \text{ °C}$ , соответственно (в теплом отделении поддерживалось значение температуры воздуха, равное  $+20 \text{ °C}$ ). Сопротивление теплопередаче данных конструкций значительно изменялось (см. рисунок 3.27).

Следовательно, при сертификационных испытаниях [31] светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами необходимо проводить ряд исследований по определению приведенного сопротивления теплопередаче при нескольких температурных режимах, обеспечивая различные значения разности температур между воздухом в теплом и холодном отделениях, в том числе и менее 30 °С.

### 3.3 Экспериментальные исследования влияния установки теплоотражающих экранов в оконных блоках на теплозащитные характеристики светопрозрачных ограждающих конструкций при стационарных условиях

При проведении исследований были рассмотрены три базовых варианта конструкции оконных блоков. **Вариант 1** – оконный блок с однокамерным стеклопакетом СПО 4М1-10-4М1 [133] (прозрачное листовое бесцветное стекло марки М1, толщиной 4 мм [25]; воздушная прослойка толщиной 10 мм; прозрачное стекло марки М1) и стеклом 4М1 в отдельных деревянных переплетах. **Вариант 2** – стеклопакет двухкамерный СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 [29] (три прозрачных стекла марки М1 [25], толщиной 4 мм, разделенных между собой воздушными прослойками, толщиной 10 мм) в переплете из поливинилхлорида (ПВХ). **Вариант 3** – стеклопакет двухкамерный с мягким селективным покрытием СПД 4М1-10-4М1-10-И4 [29] (два прозрачных стекла марки М1 [25] и одно с низкоэмиссионным мягким покрытием [33], толщиной 4 мм, разделенных между собой воздушными прослойками, толщиной 10 мм) в переплете из поливинилхлорида (ПВХ). Размеры оконного блока: 1,25 x 1,5 м (см. рисунок 3.8). Общая площадь оконного блока составила 1,875 м<sup>2</sup>, в том числе 1,376 м<sup>2</sup> – светопрозрачная часть  $A_{ст}$ , 0,499 м<sup>2</sup> – непрозрачная  $A_p$ .

В качестве дополнительных элементов (экранов), повышающих теплозащитные характеристики оконных блоков, использовались: прозрачная пленка из поливинилхлорида, толщиной 100 мкм; деревянная ставня толщиной 16 мм, выполненная из сосны; тканевые жалюзи светлого тона (см. рисунок 3.11); металли-

ческие жалюзи, изготовленные из ламелей, толщиной 150 мкм; металлические сплошные экраны.

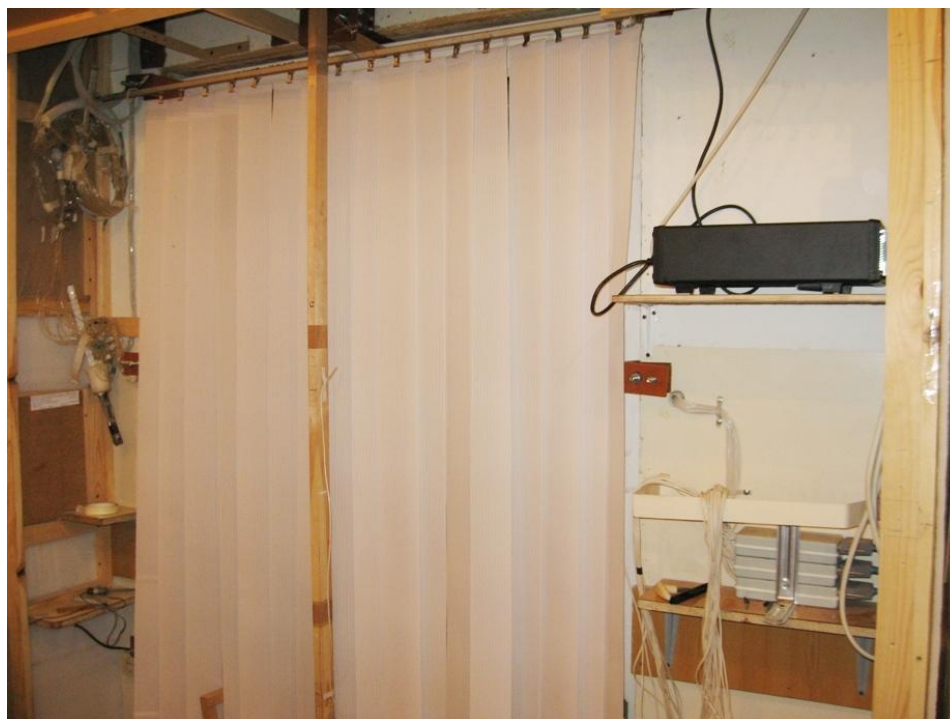


Рисунок 3.11 – Размещение тканевых жалюзи с вертикальными ламелями относительно оконного блока со стороны теплого отделения камеры

В рамках работы исследовалась энергетическая эффективность применения в оконных блоках металлических жалюзи, представленных на современном рынке данного вида продукции. На предприятии розничной торговли были приобретены два образца эмалированных жалюзи с горизонтальными ламелями. С одного из опытных образцов химическим и механическим путями было удалено лакокрасочное покрытие. При проведении испытаний эмалированные и очищенные от краски жалюзи были размещены на одном оконном блоке, причем ламели располагались под углом  $90^\circ$  к горизонту, то есть жалюзи были закрыты и полностью перекрывали светопрозрачную часть оконного блока (см. рисунок 3.12). Данный экран жалюзийного типа находился на расстоянии 10 мм от поверхности стекла, обращенного в теплое отделение камеры.



Рисунок 3.12 – Размещение эмалированных и очищенных от лакокрасочного покрытия жалюзи на оконном блоке со стороны теплого отделения климатической камеры

Металлические экраны сплошного типа были изготовлены из алюминиевой фольги толщиной 70 мкм. Сплошные экраны были размещены относительно оконного блока как со стороны теплого отделения камеры (см. рисунок 3.13), так и холодного (см. рисунок 3.14).



Рисунок 3.13 – Размещение экрана на окне со стороны теплого отделения



Рисунок 3.14 – Размещение двух экранов сплошного типа из алюминиевой фольги на оконный блок со стороны холодного отделения камеры при помощи дистанционной рамки из полистирола

Было проведено исследование влияния количества применяемых теплоотражающих экранов из алюминиевой фольги на изменение теплотехнических характеристик данной энергосберегающей ограждающей конструкции. Число применяемых экранов изменялось от одного до трех. Расстояние между экранами было 10 мм, причем это достигалось при помощи дистанционных рамок квадратного сечения, выполненных из полистирола (см. рисунок 3.14).

При установке теплоотражающих экранов на оконном блоке со стороны теплого отделения камеры практически во всех случаях (кроме использования тканевых жалюзи) наблюдался процесс выпадения конденсата на поверхности внутреннего стекла, обращенного в ТО (см. рисунок 3.15). Это было вызвано охлаждением поверхности стекла ниже значения температуры точки росы для воздуха в ТО из-за использования экранов. При проведении испытаний влажность в теплом отделении поддерживалась в пределах от 40 до 50 %.



Рисунок 3.15 – Наличие конденсата на поверхности стекла, обращенного в теплое отделение камеры, в случае использования теплоотражающих экранов со стороны ТО

В качестве примера в Приложении А приведены результаты экспериментального исследования оконного блока «Стильпласт краус» (двухкамерный стеклопакет СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 в переплете из ПВХ (Вариант 2)) в климатической камере АНО «Ивановостройиспытания». Представлены журнал испытаний (см. рисунок А.1), выполненный в соответствии с требованиями ГОСТ 26602.1-99 [31], а также графики изменения температуры воздуха в отделениях и поверхностей остекления и удельных тепловых потоков во времени (рисунки А.2 и А.3).

На основании испытаний были определены значения приведенного  $R_0^{cm}$  и относительного  $\widetilde{R}_0^{cm}$  сопротивления теплопередаче светопрозрачной части в зависимости от конструкции базового оконного блока (Варианты 1, 2, 3), вида и количества экранов, а также места их размещения относительно остекления. Относительное сопротивление  $\widetilde{R}_0^{cm}$  представляет собой отношение значений текущего (с экранами) и базового (без экранов) приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной части оконного блока  $R_0^{cm}$ . В теплом отделении (ТО) камеры поддерживалась температура  $t_b$  в диапазоне  $+20,5 \div +20,7$  °С, в холодном отделении (ХО) камеры температура  $t_n$  была около  $-15$ °С. Теплозащитные элементы крепились к оконному блоку со стороны теплового и холодного отделений. Значения сопротивлений  $R_0^{cm}$  и  $\widetilde{R}_0^{cm}$  представлены в таблице 3.1, а также на рисунках 3.16 и 3.17.

Таблица 3.1 – Приведенное,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°С})/\text{Вт}$ , и относительное сопротивления теплопередаче светопрозрачной части в зависимости от конструкции оконного блока

Описание размещения элементов относительно оконного блока	Приведенное $R_0^{cm}$ / относительное $\widetilde{R}_0^{cm}$ сопротивление теплопередаче светопрозрачной части		
	Вариант 1 (СПО 4М1-10-4М1 и стекло 4М1)	Вариант 2 (СПД 4М1-10-4М1- 10-4М1)	Вариант 3 (СПД 4М1-10-4М1- 10-И4)
Базовый вариант	<b>0,57</b> / 1,00	<b>0,47</b> / 1,00	<b>0,61</b> / 1,00
Прозрачная пленка из ПВХ со стороны ХО	<b>0,69</b> / 1,21	<b>0,57</b> / 1,22	<b>0,75</b> / 1,23
Деревянная ставня со стороны ХО	<b>0,79</b> / 1,38	<b>0,68</b> / 1,44	<b>0,87</b> / 1,43
Тканевые жалюзи со стороны ТО	<b>0,62</b> / 1,09	<b>0,52</b> / 1,11	<b>0,66</b> / 1,08
Эмалированные металлические жалюзи со стороны ТО	<b>0,66</b> / 1,16	<b>0,55</b> / 1,17	<b>0,71</b> / 1,17
Очищенные металлические жалюзи со стороны ТО	<b>0,81</b> / 1,42	<b>0,67</b> / 1,43	<b>0,86</b> / 1,41
1 мет. экран со стороны ТО	<b>0,86</b> / 1,51	<b>0,78</b> / 1,66	<b>1,03</b> / 1,69
1 мет. экран со стороны ХО	<b>0,85</b> / 1,49	<b>0,78</b> / 1,66	<b>1,10</b> / 1,80
2 мет. экран со стороны ХО	<b>1,28</b> / 2,25	<b>1,21</b> / 2,57	<b>1,76</b> / 2,88
3 мет. экран со стороны ХО	<b>1,77</b> / 3,11	<b>1,67</b> / 3,55	<b>2,31</b> / 3,79

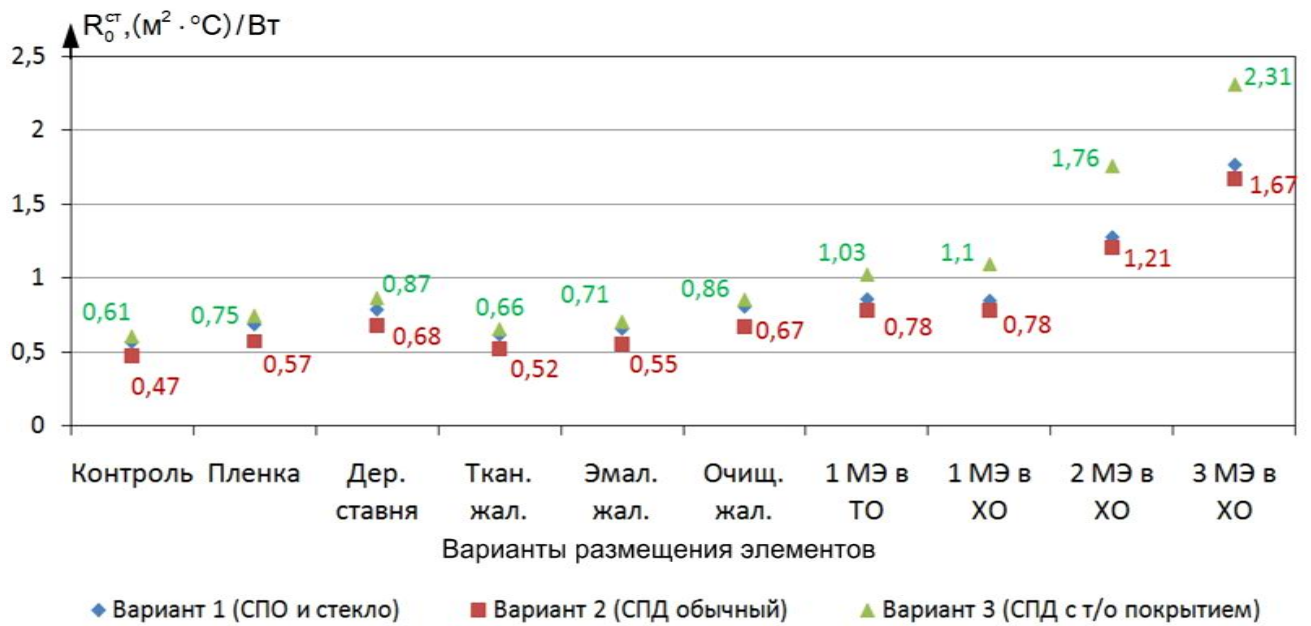


Рисунок 3.16 – Приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной части  $R_0^{cm}$  в зависимости от конструкции оконного блока

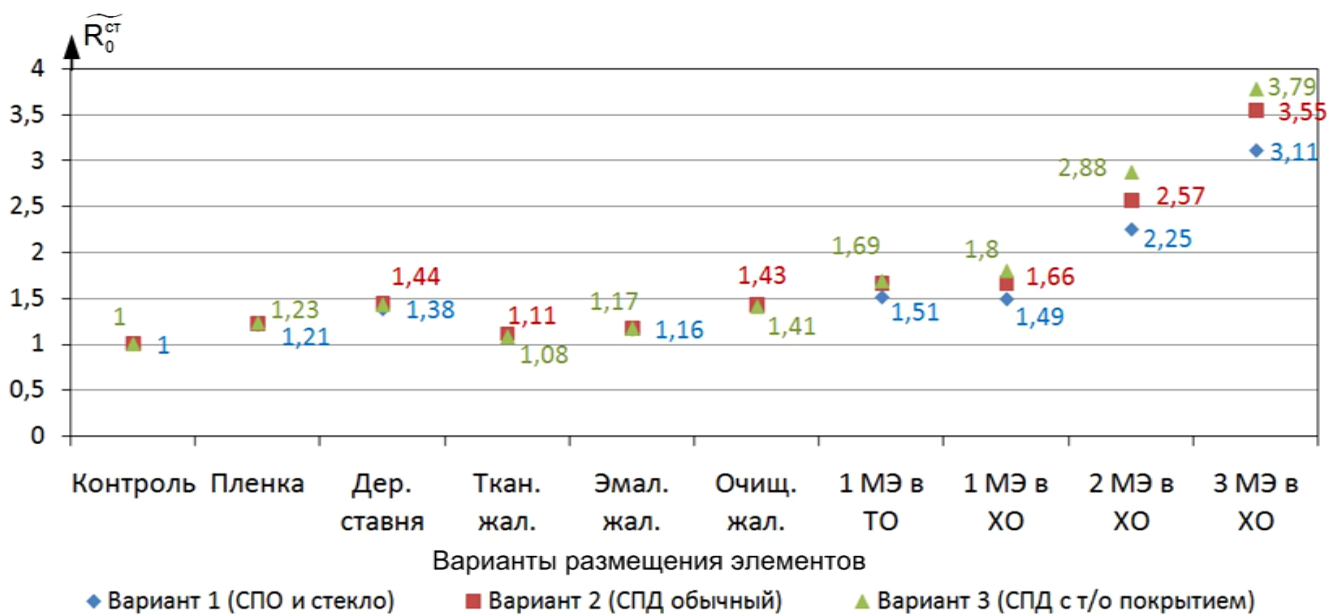


Рисунок 3.17 – Относительное сопротивление теплопередаче светопрозрачной части  $\widetilde{R}_0^{np}$  в зависимости от конструкции оконного блока

Верификация экспериментальных данных была произведена путем сравнения со справочным значением приведенного сопротивления теплопередачи стеклопакетов, приведенного в Приложении А ГОСТ 24866-99 «Стеклопакеты клееные строительного назначения. Технические условия» [30], а также с результата-



ми исследований д.т.н. М.И. Низовцева [72] и к.т.н. Е.В. Петрова [83]. Так, для стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 (Вариант 2) справочное значение  $R_0^{cm}$  равняется 0,49 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, экспериментальное – 0,47 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (отклонение составляет 0,02 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт или 4 %). Для стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-И4 (Вариант 3) справочное значение  $R_0^{cm}$  равняется 0,64 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, экспериментальное – 0,61 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (отклонение составляет 0,03 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт или 4,6 %).

Согласно данным таблицы 3.1 для всех конструкций оконных блоков применение пленки из ПВХ, деревянной ставни и эмалированных металлических, тканевых жалюзи увеличивает термическое сопротивление теплопередаче незначительно: в 1,21 ÷ 1,23 раза для пленки из ПВХ, в 1,38 ÷ 1,44 раза для деревянной ставни, в 1,08 ÷ 1,11 раза для тканевых жалюзи и 1,16 ÷ 1,17 раза для эмалированных металлических жалюзи.

Установка одного алюминиевого экрана приводит к росту термического сопротивления теплопередаче для всех вариантов оконных блоков в 1,49 ÷ 1,8 раза и место установки практически не влияет на эффективность экранирования. Установка двух алюминиевых экранов увеличивает  $R_0^{cm}$  в 2,25 ÷ 2,88 раза, а установка трех таких же экранов увеличивает  $R_0^{cm}$  в 3,11 ÷ 3,79 раза. Анализ данных показывает, что наибольшая эффективность была получена при установке трех металлических экранов со стороны холодного отделения на двухкамерном стеклопакете с мягким селективным покрытием СПД 4М1-10-4М1-10-И4 в переплете из ПВХ (вариант 3). В этом случае приведенное сопротивление теплопередаче возросло от 0,61 до 2,31 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт или в 3,79 раза.

Следует отметить тот факт, что использование мягкого теплоотражающего И-покрытия в стеклопакете (Вариант 3) также дало дополнительное приращение приведенного сопротивления теплопередаче  $R_0^{cm}$  (см. рисунок 3.16), так как в данном случае появилась дополнительная воздушная прослойка с низким значением приведенной степени черноты ограждающих её поверхностей. В данной воздушной прослойке лучистая составляющая теплообмена значительно меньше конвективной. Было установлено, что при увеличении количества применяемых

экранов возрастало и термического сопротивление стеклопакета с И-покрытием, что объясняется уменьшением разности температур на границах воздушной прослойки с теплоотражающим покрытием, приводящим к увеличению сопротивления теплопередаче прослойки (см. подраздел 3.5). Для Вариантов 1 и 2 такая тенденция не прослеживается.

Применение жалюзи из металла без покрытия также увеличивает приведенное термическое сопротивление теплопередаче ( $\widetilde{R}_0^{cm} = 1,41 \div 1,43$ ), но несколько меньше, чем при использовании одного сплошного металлического экрана, выполненного из алюминиевой фольги ( $\widetilde{R}_0^{cm} = 1,49 \div 1,80$ ) (см. рисунок 3.17). Данное обстоятельство объясняется наличием небольших щелей между краями ламелей, образующих конструкцию жалюзи, приводящим к нарушению герметичности воздушной прослойки, образованной поверхностью стекла и жалюзи.

В ходе испытания эмалированного образца жалюзи (табл. 3.1), проводившегося при  $\alpha = +90^\circ$  (угол поворота жалюзи в закрытом состоянии), мы получили увеличение сопротивления теплопередаче окна лишь на  $16 \div 17$  %, а при испытании очищенных жалюзи, установленных также с внутренней стороны окна –  $41 \div 43$  %. Данный факт объясняется высокой степенью черноты лакокрасочного покрытия, значение которой лежит в пределах  $0,91 \div 0,93$ , что в несколько раз превышает степень черноты алюминия, изменяющейся в пределах от  $0,04$  (полированный металл) до  $0,2$  (окисленный металл).

В ходе проведения испытаний было определено, что приведенное термическое сопротивление  $R_k^p$  ПВХ профиля «Стильпласт Краус» (оконные блоки «Вариант 2» и «Вариант 3») составило  $0,56$  ( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )/Вт; следовательно, приведенное сопротивление теплопередаче непрозрачной части  $R_0^p$  равнялось  $0,73$  ( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )/Вт. Для оконного блока в отдельных деревянных переплетах («Вариант 3») было определено, что  $R_k^p$  составило  $0,79$  ( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )/Вт,  $R_0^p$  –  $0,96$  ( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )/Вт. На основании полученных данных были рассчитаны приведенные  $R_0^{np}$  и относи-

тельные  $\widetilde{R}_0^{np}$  сопротивления теплопередаче оконных блоков по формуле (3.21), значения которых приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Приведенное,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , и относительное сопротивления теплопередаче оконного блока в зависимости от конструкции

Описание размещения элементов относительно оконного блока	Приведенное $R_0^{np}$ / относительное $\widetilde{R}_0^{np}$ сопротивление теплопередаче конструкции		
	Вариант 1 (СПО 4М1-10-4М1 и стекло 4М1), деревянная рама	Вариант 2 (СПД 4М1-10-4М1-10-4М1), профиль ПВХ	Вариант 3 (СПД 4М1-10-4М1-10-И4), профиль ПВХ
Базовый вариант	<b>0,64</b> / 1,00	<b>0,52</b> / 1,00	<b>0,64</b> / 1,00
Прозрачная пленка из ПВХ со стороны ХО	<b>0,75</b> / 1,17	<b>0,61</b> / 1,17	<b>0,74</b> / 1,16
Деревянная ставня со стороны ХО	<b>0,83</b> / 1,3	<b>0,69</b> / 1,33	<b>0,83</b> / 1,30
Тканевые жалюзи со стороны ТО	<b>0,68</b> / 1,06	<b>0,56</b> / 1,08	<b>0,68</b> / 1,06
Эмалированные металлические жалюзи со стороны ТО	<b>0,72</b> / 1,13	<b>0,59</b> / 1,13	<b>0,72</b> / 1,13
Очищенные металлические жалюзи со стороны ТО	<b>0,85</b> / 1,33	<b>0,68</b> / 1,31	<b>0,82</b> / 1,28
1 мет. экран со стороны ТО	<b>0,88</b> / 1,38	<b>0,77</b> / 1,48	<b>0,93</b> / 1,45
1 мет. экран со стороны ХО	<b>0,88</b> / 1,38	<b>0,77</b> / 1,48	<b>0,97</b> / 1,52
2 мет. экран со стороны ХО	<b>1,18</b> / 1,84	<b>1,03</b> / 1,98	<b>1,28</b> / 2,00
3 мет. экран со стороны ХО	<b>1,45</b> / 2,27	<b>1,24</b> / 2,38	<b>1,47</b> / 2,30

Необходимо отметить, что в случае применения большинства экранирующих элементов (кроме двух и трех металлических экранов) в оконных блоках «Вариант 1» и «Вариант 2» учет непрозрачной части способствовал повышению значения приведенного сопротивления теплопередаче всей конструкции (вследствие значительно большего термического сопротивления рамы относительно остекления). Для оконного блока «Вариант 3» с высоким значением приведенного сопротивления стеклопакета с теплоотражающим покрытием, конструкция переплета

выполняла скорее роль сдерживающего фактора в росте приведенного сопротивления теплопередаче всей конструкции.

На рисунке 3.18 представлены термограммы и внешний вид поверхности оконного блока на основе стеклопакета формулой 4М1-10-4М1-10-И4 (Вариант 3), обращенной в теплое отделение камеры, при использовании в теплом и холодном отделениях различного количества металлических сплошных теплоотражающих экранов (МЭ). На термограммах также указаны значения температуры поверхности остекления, удельных тепловых потоков и приведенного сопротивления теплопередаче в центральной зоне стеклопакета (точки замеров 3 и 13). Из рисунка следует, что наибольшие значения температур на поверхности остекления достигаются в случае использования одного ( $\tau_{\text{пов}} = 17,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) и двух ( $\tau_{\text{пов}} = 18,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) МЭ со стороны холодного отделения камеры. При использовании МЭ в теплом отделении температура на внутренней поверхности стеклопакета  $\tau_{\text{пов}}$  снижается до значения  $3,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ , причем происходит выпадения конденсата (см. рисунок 3.18). В краевой зоне стеклопакета, прилегающей к раме, во всех случаях наблюдается некоторое снижение температуры поверхности, вызванное наличием в торцевой части стеклопакета дистанционной металлической рамки (другое название – спейсер), представляющей собой с точки зрения теплопередачи «мостик холода».

На рисунке 3.19 приведены графики распределение температур на внутренней (ТО) поверхности остекления, удельных тепловых потоков и приведенного сопротивления теплопередаче по высоте двухкамерных стеклопакетов 4М1-10-4М1-10-4М1 (Вариант 2) и 4М1-10-4М1-10-И4 (Вариант 3) при использовании различного количества металлических экранов в теплом и холодном отделениях. Разность температур воздуха в теплом и холодном отделениях поддерживалась в диапазоне  $35,5 \div 36,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Температура воздуха в теплом отделении была диапазоне от  $+20,5$  до  $+20,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

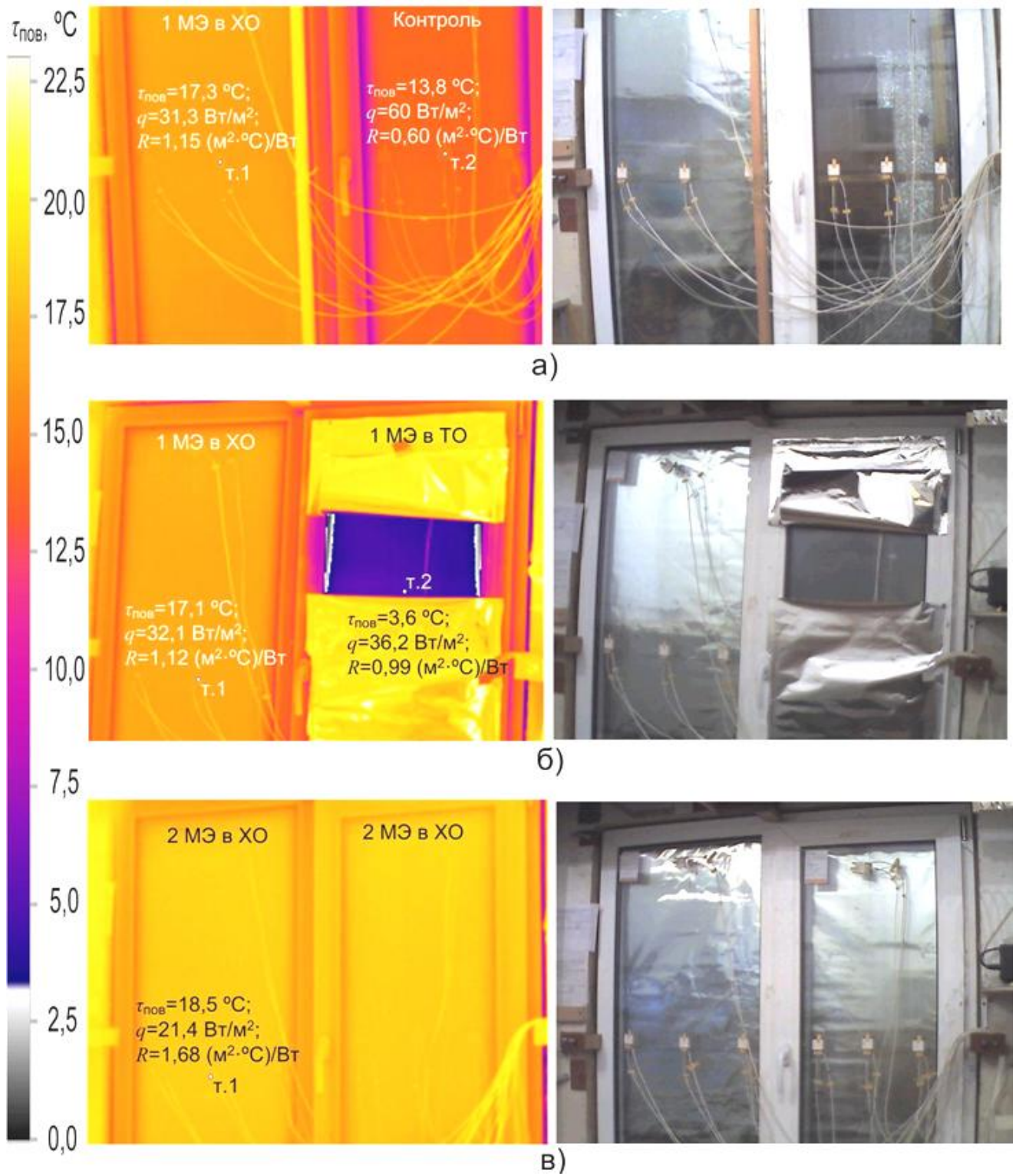
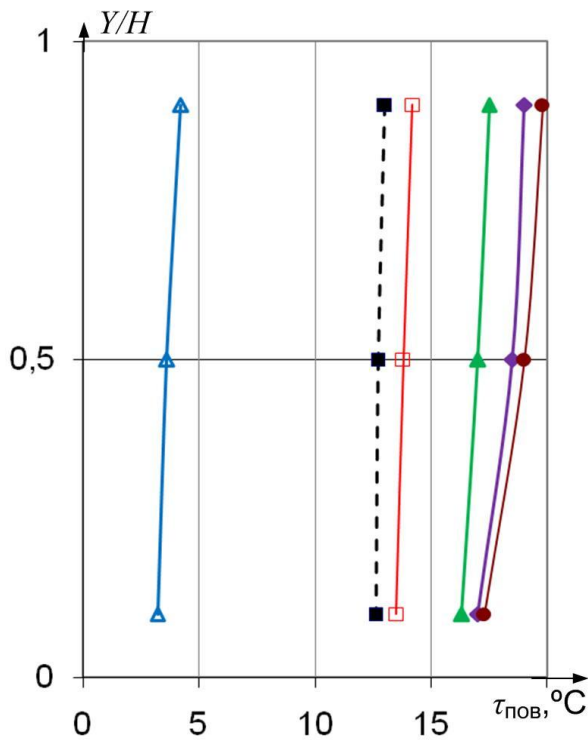
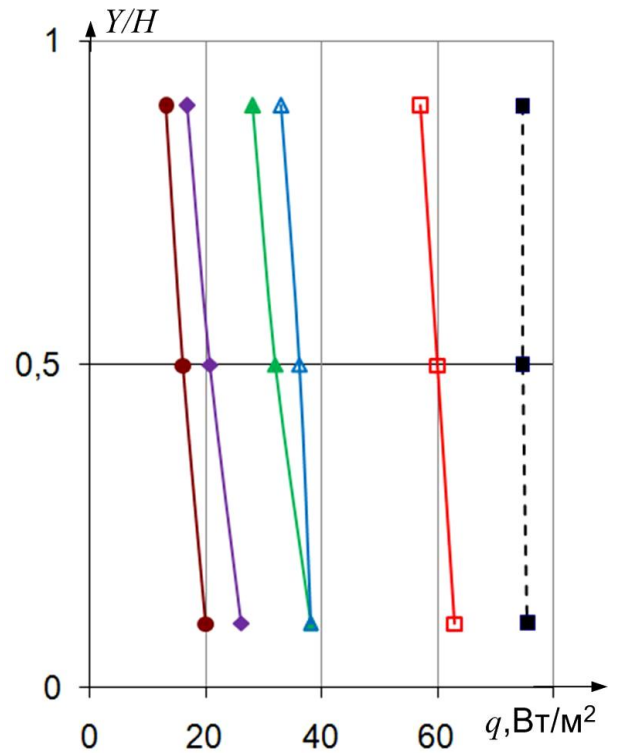


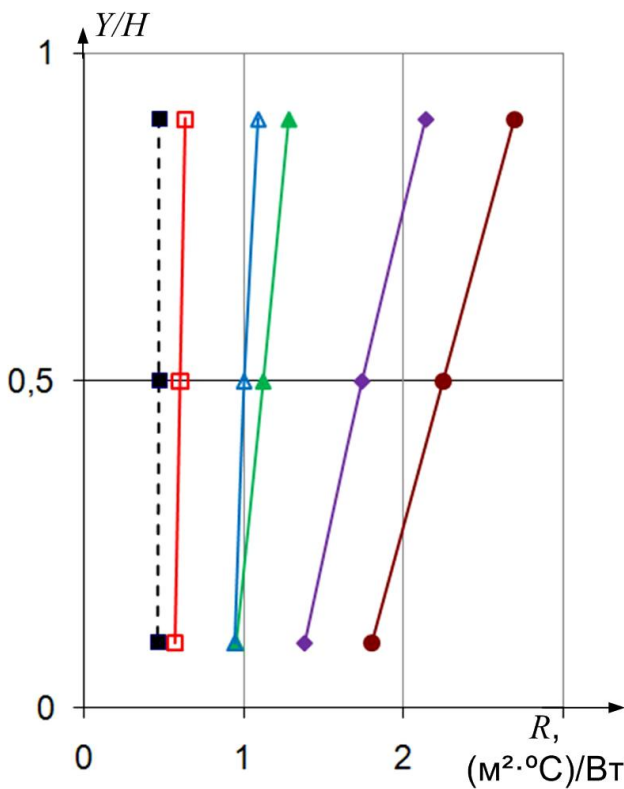
Рисунок 3.18 – Термограммы и внешний вид поверхности оконного блока на основе стеклопакета формулой 4М1-10-4М1-10-И4 (Вариант 3), обращенной в теплое отделение камеры, где  $\tau_{\text{пов}}$  – температура поверхности,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q$  – удельный тепловой поток,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $R$  – приведенное сопротивление теплопередаче,  $(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ . Опыт (а): слева – 1 металлический экран (МЭ), установленный в холодном отделении (ХО); справа – контроль. Опыт (б): слева – 1 МЭ в ХО, справа – 1 МЭ в ТО. Опыт (в): 2 МЭ в ХО



а)



б)



в)

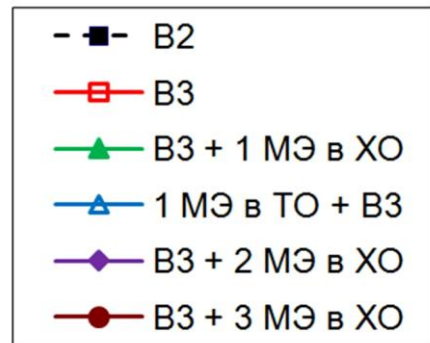


Рисунок 3.19 – Распределение температур  $\tau_{пов}$  на внутренней (ТО) поверхности остекления (а), удельных тепловых потоков  $q$  (б) и приведенного сопротивления теплопередаче  $R$  (в) по высоте двухкамерных стеклопакетов 4М1-10-4М1-10-4М1 (**В2**) и 4М1-10-4М1-10-И4 (**В3**) при использовании различного количества металлических экранов (**МЭ**) в теплом (**ТО**) и холодном (**ХО**) отделениях

На основании анализа рисунка 3.19 можно заметить, что минимальная температура на остеклении также фиксируется при размещении теплоотражающего металлического экрана в теплом отделении камеры относительно остекления. В большинстве случаев наблюдается рост температуры поверхности остекления  $\tau_{\text{пов}}$  по высоте стеклопакета, причем приращение температуры не превышает  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для обычного двухкамерного стеклопакета 4M1-10-4M1-10-4M1 (Вариант 2) удельный тепловой поток практически не изменяется по высоте остекления (см. рисунок 3.19, б). При использовании теплоотражающего покрытия в стеклопакете (Вариант 3) тепловой поток уменьшается на  $6\text{ Вт/м}^2$  (или на 9 %). При использовании теплоотражающих экранов удельный тепловой поток значительно уменьшался с увеличением высоты расположения тепломера, причем в случае использования трех металлических экранов, установленных в теплом отделении, понижение потока составило  $7\text{ Вт/м}^2$  (или 41 %). Минимальное значение удельного теплового потока было достигнуто в случае использования трех металлических экранов.

Сопротивление теплопередаче по высоте остекления (см. рисунок 3.19, в) было минимальным ( $R = 0,47\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$ ) и практически не изменялось для стеклопакета 4M1-10-4M1-10-4M1 (Вариант 2). Использование теплоотражающего покрытия увеличило сопротивление в центральной зоне до  $0,60\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$  (или на  $0,13\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$ ), а также привело к росту сопротивления по высоте стеклопакета на  $0,06\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$  (или на 10 %). Использование металлических теплоотражающих экранов еще больше увеличивало приращение сопротивления по высоте. Так, при использовании одного МЭ, установленного в холодном отделении, приращение составило  $0,33\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$  (или 29 %); трех МЭ –  $0,90\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$  (или 39 %).

Аналогичную закономерность с распределением удельных тепловых потоков и сопротивления теплопередаче по высоте остекления в случае использования теплоотражающих покрытий и теплоотражающих экранов можно отметить и в результатах исследований д.т.н. М.И. Низовцева [72] и к.т.н. Е.В. Петрова [83]. Так, распределение сопротивлений теплопередаче по высоте остекления по данным М.И. Низовцева приведено на рисунке 3.20, Е.В. Петрова – на рисунке 3.21.

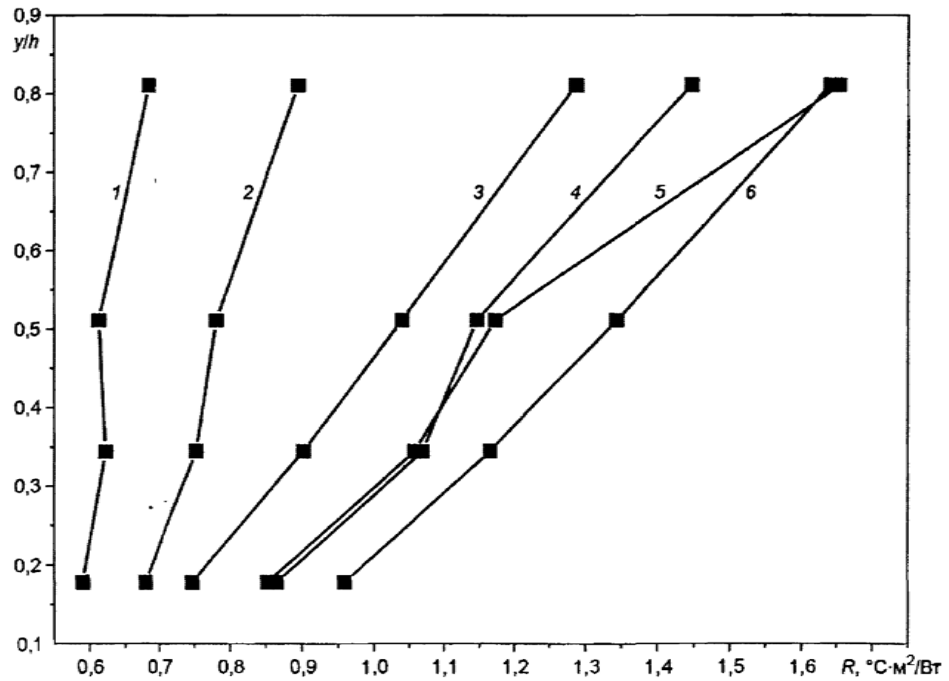


Рисунок 3.20 – Сопротивление теплопередаче остекления при установке экранов (по данным М.И. Низовцева [72]): 1 – окно без экранов; 2 – экран из ткани "Crankwhite" без покрытия; 3 – экран из ткани "Crankwhite" односторонним алюминиевым (AL) покрытием; 4 – экран из лавсановой пленки (ПН4-КТ1) с односторонним AL покрытием; 5 – экран из лавсановой пленки (ПН4-КТ1) с двухсторонним AL покрытием; 6 – экран №5 + №2 с внутренней стороны

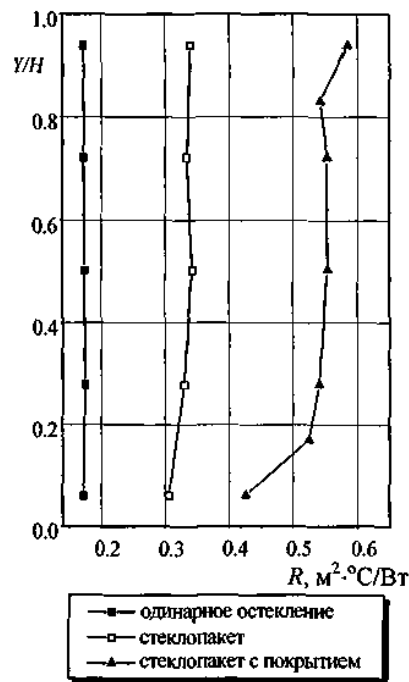


Рисунок 3.21 – Сравнение сопротивления теплопередаче стеклопакетов (по данным Е.В. Петрова [83])



Было также проведено сравнение значений сопротивления теплопередачи для центральной зоны стеклопакета (точки замера 3 и 13) и для всей его площади  $R_0^{cm}$  в контрольном варианте и при использовании теплоотражающих экранов. На рисунке 3.22 приведено данное сравнение для двухкамерного стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-И4 (Вариант 3). Следует отметить, что значения приведенного сопротивления теплопередаче  $R_0^{cm}$  для всего остекления и для его центральной  $R_{ц}$  (локальной) зоны практически совпадали (расхождение не превысило 8 %).

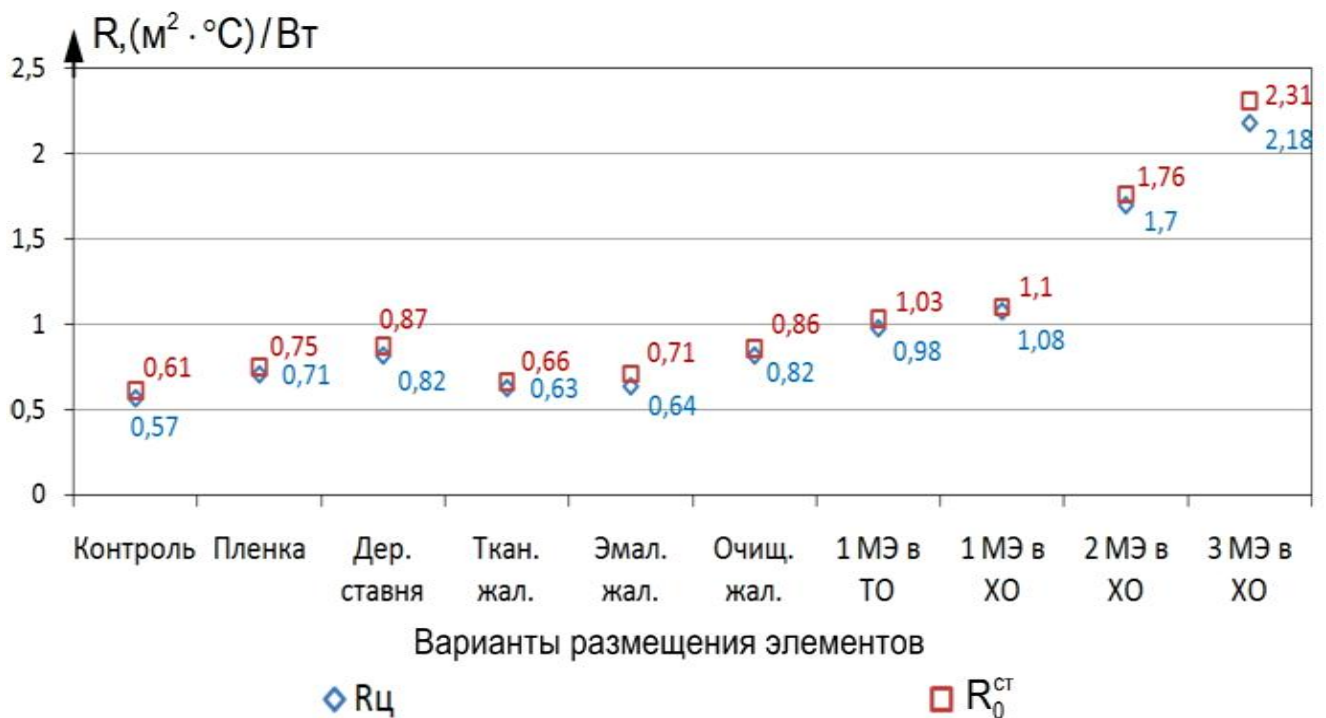


Рисунок 3. 22 – Сопоставление приведенного сопротивления теплопередаче для центральной зоны  $R_{ц}$  (точки замеров № 3, 13) и для всего  $R_0^{cm}$  двухкамерного стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-И4 (Вариант 3) при установке экранов

В исследованиях Низовцева М.И. [72] (см. рисунок 3.23) значения среднего сопротивления теплопередаче трехслойного остекления при применении различных теплоотражающих элементов для центральной зоны остекления  $R_{ц}$  и для всего остекления также близки между собой, что подтверждает полученную в диссертации закономерность.

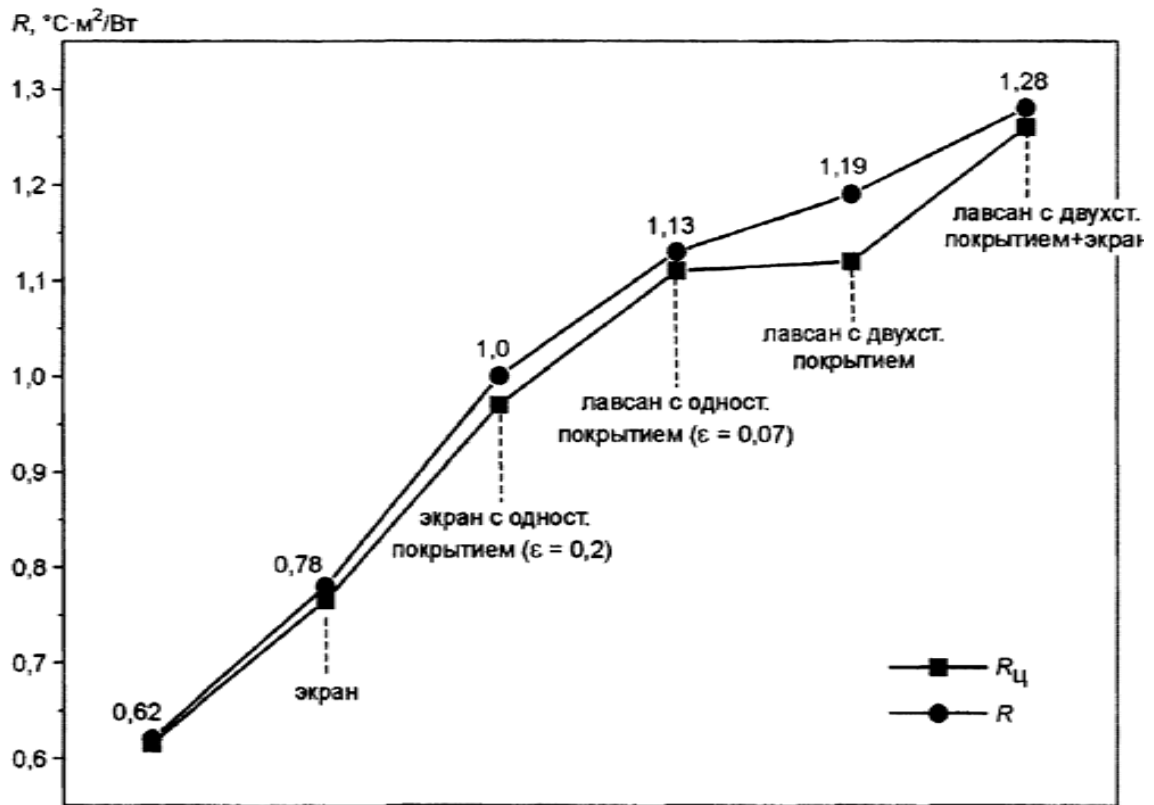


Рисунок 3.23 – Среднее  $R$  сопротивление и сопротивление теплопередаче в центральной зоне  $R_{ц}$  остекления при установке экранов (по данным М.И. Низовцева [72])

В рамках диссертационной работы было проведено исследование влияние угла наклона к горизонту поворотных элементов жалюзи (ламелей)  $\alpha$  на приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной части окна. Испытания проводились на оконном блоке с однокамерным стеклопакетом СПО 4М1-10-4М1 [29] и стеклом 4М1 в отдельных деревянных переплетах (Вариант 1). Со стороны теплого отделения климатической камеры были установлены очищенные от лакокрасочного покрытия жалюзи. Результаты испытаний представлены на рисунке 3.24.

При закрывании металлических жалюзи, установленных на оконном блоке (Вариант 1), приведенное сопротивление теплопередаче увеличивается от 0,59 до 0,81 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт.

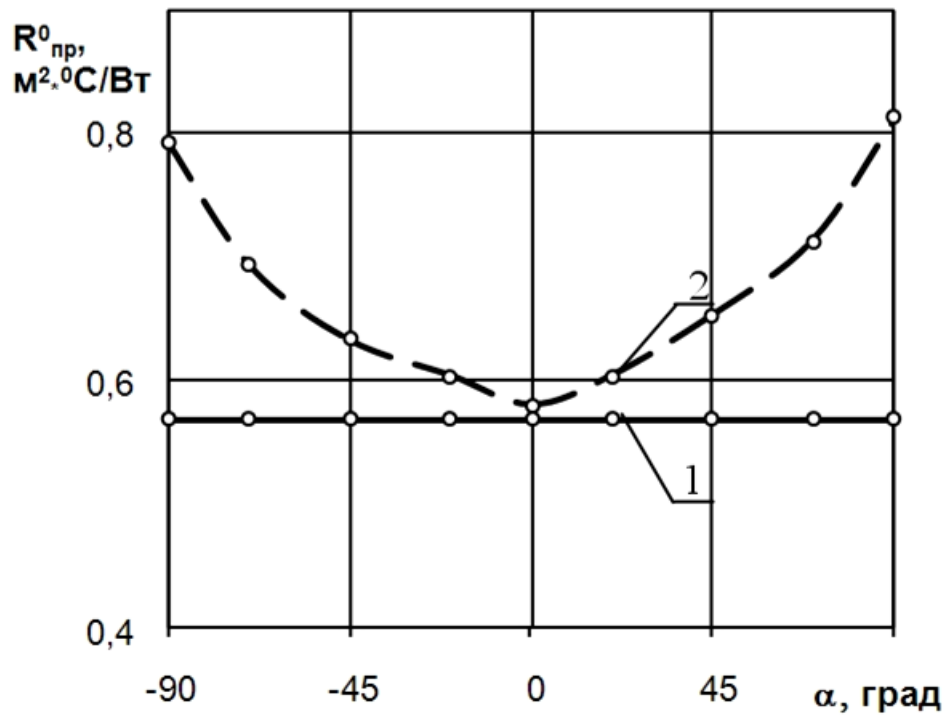


Рисунок 3.24 – Зависимость приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной части оконного блока от угла наклона к горизонту поворотных элементов жалюзи  $\alpha$ , град.:

1 – оконный блок без жалюзи (Вариант 1); 2 – оконный блок с жалюзи

### 3.4 Исследование динамики изменения тепловых потоков, проходящих через оконный блок при использовании теплоотражающих экранов, во времени

При практическом использовании теплоотражающих экранов в светопрозрачных конструкциях особую важность имеют не только их теплозащитные характеристики, определенные при стационарных условиях, но и также их инерционные свойства. Теплоотражающие экраны применяются в различные периоды времени, являются перемещаемыми элементами в светопрозрачной конструкции (поднятие / опускание рулонного и панельного экранов, поворот ламелей в жалюзи, закрытие / открытие экрана, выполненного в виде ставней и т.д). Для оперативного поддержания необходимых параметров микроклимата в обслуживаемом помещении и, соответственно, правильного выбора оборудования для обеспечения работы систем отопления, вентиляции и

кондиционирования воздуха необходимо учитывать изменение теплотехнических свойств светопрозрачных ограждающих конструкций с теплоотражающими экранами во времени.

В проведенных экспериментах фиксировалось время перехода на стационарный режим теплообмена при установке дополнительного термического сопротивления теплопередаче на светопрозрачных конструкциях. В качестве контрольного образца использовался оконный блок, включающий в себя стеклопакет двухкамерный СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 в переплете из ПВХ (Вариант 2). В качестве дополнительного термического сопротивления теплопередаче использовались очищенные от лакокрасочного покрытия металлические жалюзи, рулонный металлический экран из алюминиевой фольги толщиной 70 мкм (см. рисунок 3.25), а также тройной металлический рулонный экран. Рулонные экраны перемещались с помощью троса управления в ручном режиме.



Рисунок 3. 25 – Опускание рулонного теплоотражающего металлического экрана

Результаты исследований инерционных свойств теплоотражающих экранов представлены на рисунке 3.26. При закрытии жалюзи стационарный режим теплообмена наступал через 14 минут, при опускании одного экрана – через 18 минут, а трех экранов – через 23 минуты, что объясняется малой теплоемкостью дополнительных экранирующих ограждений.

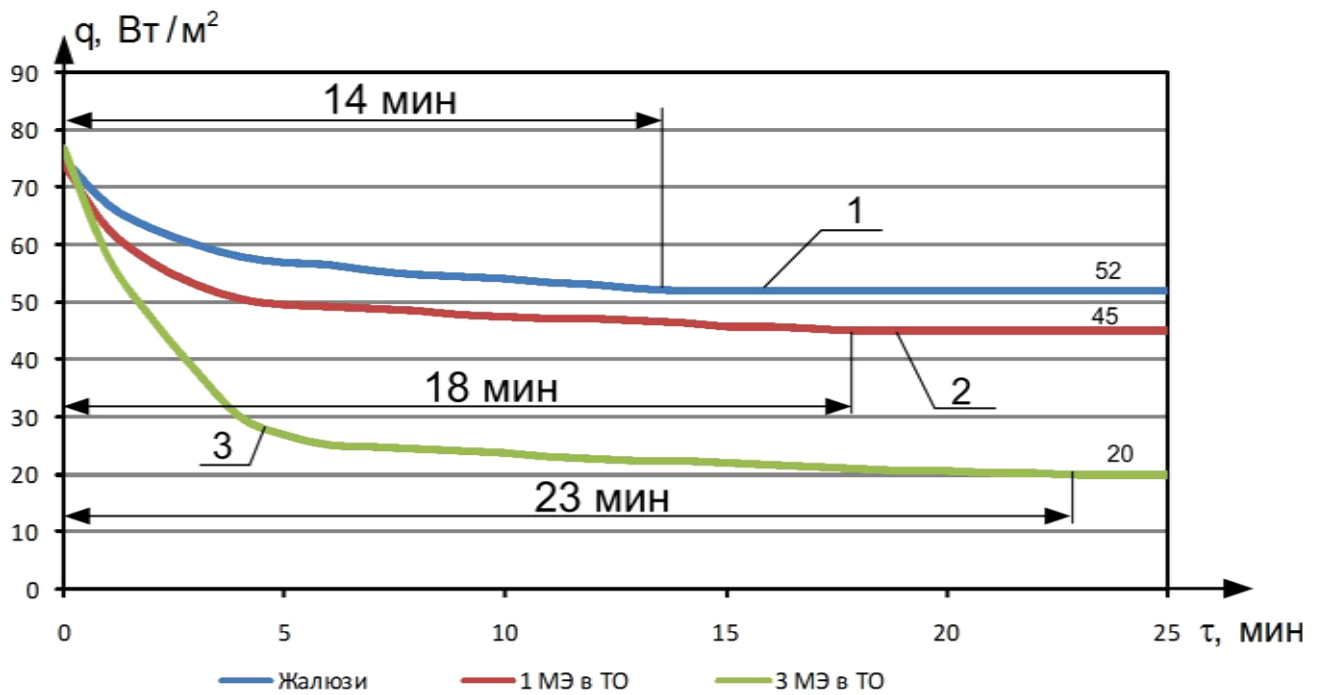


Рисунок 3.26 – Время перехода на стационарный режим теплообмена при использовании в двухкамерном стеклопакете (Вариант 2) со стороны теплого отделения камеры (ТО) жалюзи (1), одного (2) и трех (3) металлических экранов (МЭ)

Для сравнения инерционных свойств энергосберегающих элементов оболочки здания в климатической камере испытательной лаборатории кафедры промышленной теплоэнергетики ИГЭУ были проведены исследования по определению эффективности использования теплоотражающих экранов на непрозрачной ограждающей конструкции. В качестве базовой конструкции использовался фрагмент стены (размер 280 x 250 x 380 мм) из пористого ячеистого силикатного 11-дырочного кирпича с отверстиями, заполненными пенополиуретаном с 25÷26 % керамзитовых включений. Толщина кирпичной кладки составила 380 мм. В качестве теплоотражающих элементов применялись

алюминиевая фольга толщиной 70 мкм, а также фальшпанель, выполненная из древесностружечной плиты (ДСП), толщиной 16 мм. При проведении эксперимента было отмечено, что стационарный процесс теплопередачи при изменении условий и конструкции стены достигался в течение 3-4 суток.

В результате исследований было установлено, что оконные блоки с теплоотражающими экранами являются малоинерционными ограждающими конструкциями с точки зрения теплозащиты.

### **3.5 Экспериментальное исследование зависимости приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока с экранами от температурных режимов испытаний**

В рамках программы экспериментальных исследований была изучена зависимость приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока с экранами от перепада температур между теплым и холодным отделениями климатической камеры. В качестве контрольного образца использовался стеклопакет формулой 4M1x10x4M1x10x4M1 и алюминиевые экраны, установленные на расстоянии 10 мм друг от друга в холодном отделении камеры.

В таблицах 3.1 и 3.2 приведены результаты эксперимента при температуре +20,5 °С в теплом отделении климатической камеры и при температуре -15°С – в холодном отделении. В этом случае перепад температур составляет около 35,5 °С. При проведении данной серии экспериментов температуру в холодном отделении  $t_n$  повышали с шагом 10 °С (до -5°С и до +5°С), причем получали перепады температур в 25,5 °С и 15,5 °С, соответственно.

Тепловизионная съёмка внутренних поверхностей окна осуществлялась с помощью тепловизора TESTO 882. Термограммы и температурные графики по секущей линии центральной части стеклопакета можно увидеть на рисунке 3.27, причём слева в холодном отделении установлен один алюминиевый сплошной панельный экран на расстоянии 10 мм от наружного стекла стеклопакета, справа – только стеклопакет. «Всплески» температур на графиках обусловлены находке-

нием в исследуемой зоне окна шины для крепления термопар и соединительных проводов, которые располагаются на некотором удалении от поверхности стекла, обращенного в теплое отделение.

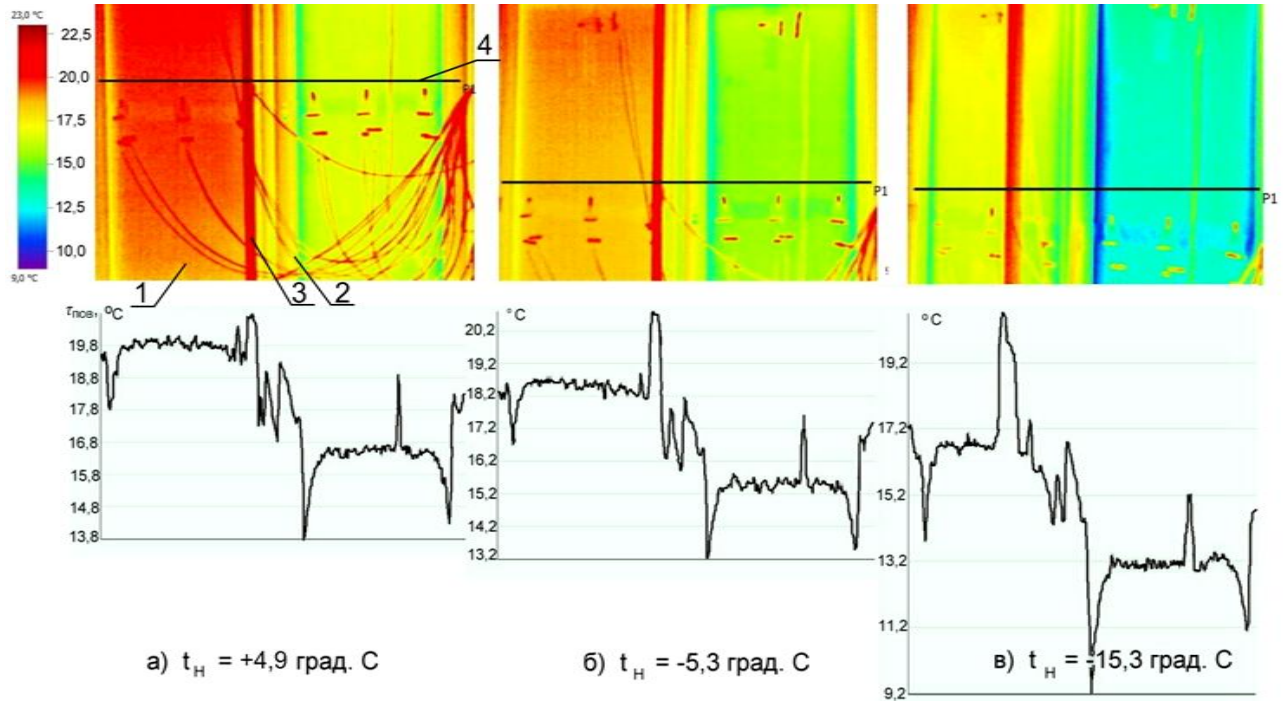


Рисунок 3.27 – Термограммы и температурные графики по секущей линии на внутренней поверхности центральной зоны стеклопакета при поддержании в холодном отделении климатической камеры температуры воздуха  $t_n$ , равной  $+4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а), минус  $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б) и минус  $15,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в): 1 – внутренняя поверхность стеклопакета, причём в холодном отделении камеры установлен 1 теплоотражающий экран; 2 – переплёт из профиля ПВХ; 3 – шина для крепления термопар, измеряющих  $t_B$ ; 4 – секущая линия, для построения температурных графиков на поверхности

Отличие значений температуры на поверхности стеклопакета  $\tau_{\text{пов}}$  при изменении температуры воздуха в холодном отделении  $t_n$  больше в контрольном варианте (стеклопакет без экранов). В зоне, где установлен металлический экран, снижение температуры на поверхности внутреннего стекла  $\tau_{\text{пов}}$  при изменении  $t_n$  меньше. Значения температуры  $\tau_{\text{пов}}$  в зоне СПД и металлического экрана значительно выше температур в контрольной зоне (без МЭ).

На термограммах отчётливо видны краевые зоны стеклопакета, где, вследствие образования «мостиков холода» за счёт внутренних алюминиевых рамок, температура на поверхности  $\tau_{\text{пов}}$  снижается на  $2\div 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  в контроле, и на  $2\div 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  –

в варианте с установкой экрана. В нижней части стеклопакета на снижение температуры в краевой зоне дополнительное влияние оказывает повышенный конвективный теплообмен. Для улучшения температурного режима краевых зон производителями окон [57] предлагается смещать дистанционные рамки вместе с герметиками внутрь переплётов на  $10 \div 15$  мм, а также в качестве материала дистанционной рамки использовать не металлы, а, например, высококачественный полипропилен, обеспечивающий повышенные теплоизоляционные свойства (технология «тёплых краёв»).

На термограммах (рисунок 3.27) также видно, что приращение температуры поверхности стекла по вертикальной оси снизу-вверх больше в зоне установки снаружи металлического экрана.

Результаты эксперимента для двухкамерного стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 (Вариант 2) в части определения приведенного сопротивления теплопередаче приведены на рисунке 3.28.

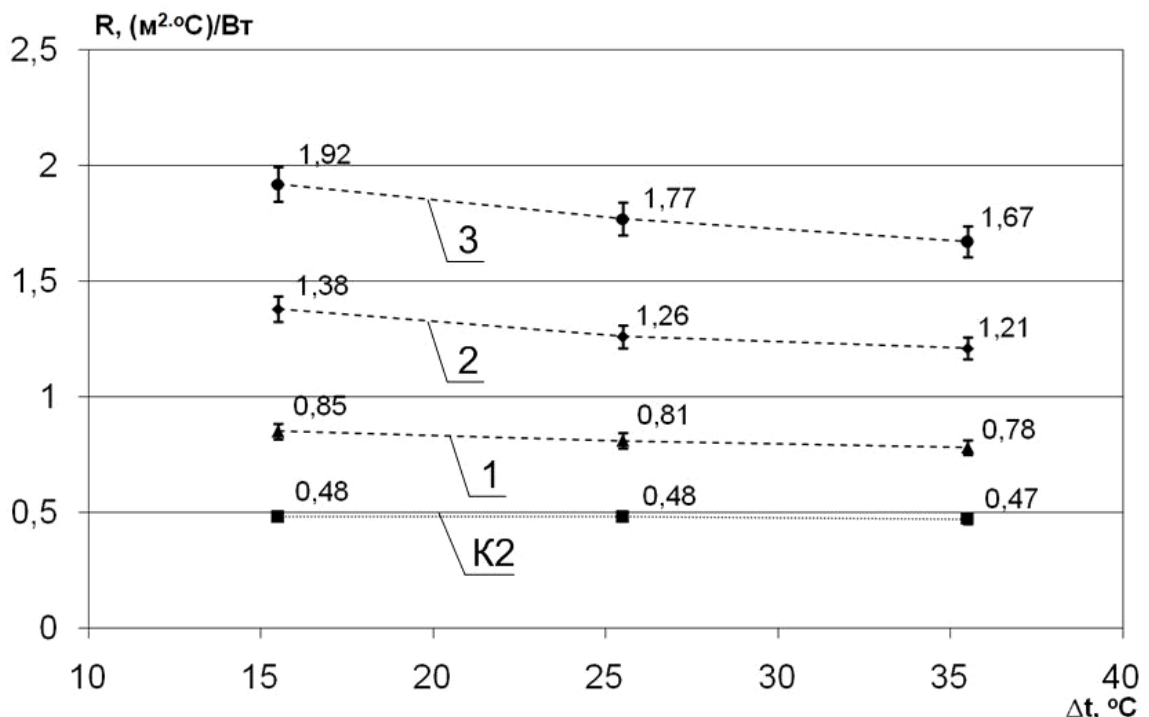


Рисунок 3.28 – Зависимость приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной части окна от разности температур в теплом и холодном отделениях камеры: K2 – вариант 2 (СПД 4М1-10-4М1-10-4М1); 1, 2, 3 – СПД с установкой 1-го, 2-х и 3-х алюминиевых экрана



Анализ данных рисунка 3.28 показывает, что приведенное сопротивление теплопередаче стеклопакета без экранов практически не изменяется (линия К2), а установка экранов приводит к снижению сопротивления (линии 1, 2 и 3) при увеличении разности температур. Так, в случае использования одного металлического экрана снаружи при изменении разности температур от 15,5 до 35,5 °С сопротивление окна уменьшается с 0,85 до 0,78 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}$ )/Вт (или на 8,2 %). При применении трех металлических экранов данное снижение становится ещё более заметным – сопротивление уменьшается с 1,92 до 1,67 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}$ )/Вт (или на 13 %). Данное обстоятельство можно объяснить значительным преобладанием в воздушной прослойке, образованной экранами, конвективного теплового потока над лучистым потоком.

Таким образом, выявлен нелинейный характер зависимости приведенного сопротивления теплопередаче при установке металлических экранов от температурных режимов испытаний.

Необходимо отметить, что методика по определению сопротивления теплопередаче оконных блоков, описанная в ГОСТ 26602.1-99 [31], не учитывает зависимость светопрозрачных конструкций с экранами от температурного режима эксплуатации и требует модернизации, которая описана выше.

Информация о результатах экспериментальных исследований новых энергосберегающих конструкций окон с теплоотражающими экранами передана в АНО "Ивановостройиспытания" в виде Акта передачи результатов диссертационной работы (см. Приложение В); предложения по изменению Методики испытания оконных блоков с экранами, приведенной в ГОСТ 26602.1-99 "Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче" [31], в части установки первичных измерительных приборов, алгоритма выполнения расчетов по определению приведенного сопротивления теплопередаче, а также организации температурных режимов в климатической камере приняты к внедрению в данной организации.

### 3.6 Выводы по третьему разделу

1. Разработана методика по испытанию оконных блоков с теплоотражающими экранами, учитывающая особенности установки первичных измерительных приборов и алгоритма выполнения расчетов по определению приведенного сопротивления теплопередаче, а также зависимость сопротивления  $R_0$  данных светопрозрачных ограждающих конструкций от температурных режимов испытаний в климатической камере.

2. Получены новые экспериментальные данные о влиянии применения теплоотражающих экранов различной конфигурации и свойств на теплотехнические характеристики оконных блоков, в том числе на температуру поверхности остекления, удельный тепловой поток, приведенное сопротивление теплопередаче. Было установлено, что использование в рассмотренных оконных блоках металлических теплоотражающих экранов сплошного типа позволяет увеличить приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной части в  $1,5 \div 3,8$  раза (в зависимости от количества экранов). Выявлено значительное увеличение локального сопротивления теплопередаче по высоте остекления при установке теплоотражающих экранов: при использовании одного МЭ, установленного в холодном отделении, приращение составило  $0,33 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$  (или 29 %); трех МЭ –  $0,90 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$  (или 39 %).

3. Получена зависимость приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной части оконного блока от угла наклона к горизонту поворотных элементов жалюзи: при полном перекрытии светового проема ламелями сопротивление  $R_0$  увеличивается с  $0,59$  до  $0,81 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$  (или на 37 %).

4. Установлено, что значения приведенного сопротивления теплопередаче для всего остекления и для его центральной зоны практически совпадают (расхождение не превысило 8 %).

5. В процессе определения времени перехода на стационарный режим теплообмена при установке дополнительного термического сопротивления на светопрозрачные конструкции выявлено, что оконные блоки с теплоотражающими ме-

таллическими экранами сплошного типа и в виде жалюзи являются малоинерционными элементами: при закрытии жалюзи стационарный режим теплообмена наступал через 14 минут, при опускании одного экрана – через 18 минут, а трех экранов – через 23 минуты.

6. Выявлен количественный характер зависимости приведенного сопротивления теплопередаче при установке металлических экранов в оконных блоках от температурных режимов испытаний: в случае использования одного металлического экрана на двухкамерном стеклопакете при изменении разности температур воздуха в отделениях климатической камеры от 15,5 до 35,5 °С сопротивление теплопередаче уменьшается с 0,85 до 0,78 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (или на 8,2 %); при применении трех металлических экранов данное снижение становится ещё более заметным – сопротивление уменьшается с 1,92 до 1,67 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (или на 13 %).

7. Предложения по изменению методики испытания оконных блоков с экранами, приведенной в ГОСТ 26602.1-99 "Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче", в части установки первичных измерительных приборов, алгоритма выполнения расчетов по определению приведенного сопротивления теплопередаче, а также организации температурных режимов в климатической камере приняты к внедрению в АНО "Ивановостройиспытания".

Материалы третьего раздела опубликованы в работах [188, 189, 190, 194, 196, 197, 198].

## **4 Разработка математической модели динамического микроклимата для зданий с регулируемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций**

Для оценки влияния разработанных в диссертации энергосберегающих мероприятий на комфортность внутренней среды помещений и потребление топливно-энергетических ресурсов сформулирована математическая модель микроклимата для зданий с регулируемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций (при использовании теплоотражающих экранов).

Для математического моделирования процессов тепломассопереноса при формировании микроклимата, в том числе и динамического, в помещениях с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями разработана и верифицирована математическая модель теплопередачи через стеклопакет с теплоотражающими экранами; выполнено численное трехмерное моделирование данного процесса в программно-вычислительном комплексе (ПВК) Phoenix; разработан инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции в текущий момент времени на основе аппроксимации результатов математического моделирования.

### **4.1 Разработка и программная реализация математической модели теплопередачи через стеклопакет с теплоотражающими экранами**

Математическое описание процессов теплопередачи в светопрозрачных ограждающих конструкциях изложено в ряде статей, монографий и учебных пособий, например в [8, 56, 69, 93, 101, 104, 105, 137, 151, 157, 174, 175]. Отдельно необходимо выделить методики расчета окна и процессов происходящих в нем, разработанные Научно-исследовательским институтом строительной физики (НИИСФ) [105, 100], а также Европейского общества ЕСО [132]. Методика Европейского общества позволяет учитывать возможность использования стекол с селек-

тивными покрытиями, а также газов или смеси газов применяемых для заполнения промежуточных пространств в стеклопакетах [83].

При разработке математической модели теплопередачи через стеклопакет с теплоотражающими экранами было принято допущение об адиабатности в зоне контакта стеклопакета с дистанционной рамкой и о малости инсоляционной составляющей лучистого теплообмена.

Для большинства окон приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной части для теплотехнических расчетов принимается постоянным, причем данные берутся из результатов сертификационных испытаний приведённого термического сопротивления окна. Приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной части окна  $R_o$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ , определяется по формуле

$$R_o = R_b + \sum R_i + R_n, \quad (4.1)$$

где  $R_b$ ,  $R_n$  – сопротивления теплообмену на внутренней и внешней поверхностях ограждения, соответственно,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ ;

$\sum R_i$  – сумма термических сопротивлений отдельных слоев стеклопакета и экранов, называемая термическим сопротивлением светопрозрачной части окна  $R_m$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ .

После подстановки в (4.1) выражений для сопротивлений теплообмену на внутренней и внешней поверхностях ограждения получим

$$R_o = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_b} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{\alpha_b^k + \alpha_b^l} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_n^k + \alpha_n^l}, \quad (4.2)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ;  $\alpha_b$ ,  $\alpha_n$  – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях ограждения соответственно,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ;

$\alpha_b^k$ ,  $\alpha_n^k$  – коэффициенты теплоотдачи конвекцией на внутренней и наружной поверхностях ограждения, соответственно,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ ;

$\alpha_b^l$ ,  $\alpha_n^l$  – коэффициенты (условные) теплоотдачи излучением на внутренней и наружной поверхностях ограждения соответственно,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ .

В нормативной литературе при теплотехнических расчетах коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях ограждения принимают постоянными, независимыми от внешних факторов и распределения температур. Согласно рекомендациям [69, 127], для окон  $\alpha_{\text{в}} = 8,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ ,  $\alpha_{\text{н}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ . В действительности, коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{\text{в}}$  и  $\alpha_{\text{н}}$  не являются постоянными величинами, а зависят от параметров внутреннего и наружного воздуха.

#### 4.1.1 Теплообмен на наружной поверхности окна

Описание процесса теплообмена на наружной поверхности производилось на основе результатов исследований учёных-теплофизиков, таких как В.К. Савина [104, 105], К.Ф. Фокина [151], Е.Г. Малявиной [69] с использованием формул Франка (4.3) и Стефана-Больцмана (4.4):

$$\alpha_{\text{н}}^{\text{к}} = 7,34 \cdot v_{\text{н}}^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_{\text{н}}}; \quad (4.3)$$

$$\alpha_{\text{н}}^{\text{л}} = 5,67 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \frac{\left(\frac{t_{\text{i}} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{\text{i}+1} + 273}{100}\right)^4}{t_{\text{i}} - t_{\text{i}+1}}, \quad (4.4)$$

где  $v_{\text{н}}$  – скорость ветра снаружи, м/с;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент излучения [69];

$t_{\text{i}}$ ,  $t_{\text{i}+1}$  – температура серых тел, в данном случае, температура поверхности  $\tau_{\text{н}}$  и окружающей среды  $t_{\text{н}}$ , соответственно,  $^\circ\text{С}$ .

Приведённый коэффициент излучения, согласно рекомендациям профессора МГСУ Е.Г. Малявиной [69] при произвольном расположении поверхностей удобнее считать по формуле

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{i}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{i}+1}} - 1} \quad (4.5)$$

где  $\varepsilon_{\text{i}}$ ,  $\varepsilon_{\text{i}+1}$  – коэффициенты излучения двух серых поверхностей.

На основе исследований процесса теплопередачи через окна представители Американского общества инженеров по отоплению, холодоснабжению и конди-

ционированию (ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) Н. Ито (N. Ito), К. Кимура ( K. Kimura) [174], Д.К. Арастех (D.K. Arasteh), М.С. Райли (Reilly M.S.) [157] предлагают следующие формулы для определения коэффициента теплоотдачи конвекцией на наружной поверхности.

Если окно располагается с наветренной стороны

при скорости ветра  $v_H < 2$  м/с :  $\alpha_H^k = 12,27$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

при скорости ветра  $v_H > 2$  м/с:

$$\alpha_H^k = 8,07 \cdot v_H^{0,605}. \quad (4.6)$$

Если окно располагается с подветренной стороны

$$\alpha_H^k = 18,64 \cdot (0,3 + 0,05 \cdot v_H)^{0,605}. \quad (4.7)$$

#### 4.1.2 Теплообмен на внутренней поверхности окна

Теплообмен на внутренней поверхности окна в большей степени определяется видом течения воздушных масс, обтекающих внутреннюю поверхность остекления, и разностью температур между внутренним воздухом  $t_B$  и на поверхности стекла  $\tau_B$ , скоростью воздушных потоков  $v_B$ .

Для вертикальных внутренних поверхностей в случае естественной конвекции  $\alpha_B^k$  в отапливаемых помещениях В.Н. Богословским [8] предложено определять по формуле

$$\alpha_B^k = 1,66 \cdot \sqrt[3]{(t_B - \tau_B)}. \quad (4.8)$$

Профессор Савин В.К. [104] на основе исследований предлагает определять коэффициент для подкупольного пространства зенитных фонарей по формуле:

$$\alpha_B^k = 2,5 \cdot \sqrt[3]{(t_B - \tau_B)}. \quad (4.9)$$

В случае расположения светопрозрачного ограждения отличного от вертикального, В.К. Савин предлагает изменять коэффициент в формуле (4.9) согласно нижеприведённой таблицы:

Таблица 4.1 – Зависимость постоянного коэффициента в формуле (11) от угла наклона конструкции относительно горизонта

Угол наклона конструкции относительно горизонта	0	15	30	45	60	90
Постоянный коэффициент в формуле	2,5	2,2	2,1	2,0	1,8	1,7

Исследователи из ASHRAE [157, 174] предлагают при данных условиях определять  $\alpha_b^k$  по формуле

$$\alpha_b^k = 1,77 \cdot \sqrt[4]{(t_b - \tau_b)}. \quad (4.10)$$

Если в помещении работает рециркуляционный вентиляционный аппарат или приток в помещение осуществляется механической вентиляцией, конвекцию следует считать вынужденной (при скорости воздуха выше 0,3 м/с) и коэффициент конвективного теплообмена можно определить по формуле или по зависимости, рекомендуемой ASHRAE [174]:

$$\alpha_b^k = 5,6 + 3,8 \cdot v_b, \quad (4.11)$$

где  $v_b$  – скорость воздуха у внутренней поверхности ограждения, м/с.

### 4.1.3 Термическое сопротивление стеклопакета

Термическое сопротивление стеклопакета можно определить как

$$R_T = \sum R_i = \sum (R_{ст.i} + R_{пр.j}), \quad (4.12)$$

где  $R_{ст.i}$  – сопротивление теплопередаче  $i$ -го стекла,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ , определяемое отношением толщины стекла  $\delta_{ст.i}$  к его теплопроводности  $\lambda_{ст.i}$ , т.е.

$$R_{ст.i} = \frac{\delta_{ст.i}}{\lambda_{ст.i}}; \quad (4.13)$$

$R_{пр.j}$  – сопротивление теплопередаче  $j$ -ой воздушной (газовой) прослойки, ограниченной стёклами или теплоотражающими экранами,  $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ .

Так как стекло является полупрозрачным телом, то уместно использовать эффективную теплопроводность  $\lambda_{\text{эф}}$ , учитывающую проникающее излучение [104].



#### 4.1.4 Теплообмен в газовой прослойке

Прослойки между стеклами, теплоотражающими экранами могут быть заполнены не только воздухом, но и малотеплопроводными газами, например, аргон, криптоном.

Сопротивление теплопередаче для газовой прослойки  $R_{\text{пр}}$  можно определить по следующей формуле:

$$R_{\text{пр}} = \frac{1}{\alpha_{\text{пр}}^{\text{л}} + \alpha_{\text{пр}}^{\text{к}}}, \quad (4.14)$$

где  $\alpha_{\text{пр}}^{\text{л}}$  – лучистая составляющая теплообмена в прослойке;  $\alpha_{\text{пр}}^{\text{к}}$  – конвективная составляющая теплообмена внутри прослойки стеклопакета.

Лучистая составляющая теплообмена в газовой прослойке описывается также уравнением Стефана-Больцмана

$$\alpha_{\text{пр}}^{\text{л}} = 5,67 \times \varepsilon_{\text{пр}} \frac{\left(\frac{t_i + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{i+1} + 273}{100}\right)^4}{t_i - t_{i+1}}, \quad (4.15)$$

где  $t_i$  – температура на поверхности стекла (экрана), ограничивающей прослойку, с тёплой стороны;

$t_{i+1}$  – температура на поверхности стекла (экрана), ограничивающей в прослойку с холодной стороны.

Расчёт конвективной составляющей теплообмена внутри воздушной (газовой) прослойки стеклопакета является довольно сложной задачей, но в общем случае определяется по формуле

$$\alpha_{\text{пр}}^{\text{к}} = \frac{\lambda}{h} \cdot Nu, \quad (4.16)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха (газов), Вт/(м·°С);  $h$  – толщина прослойки, м;  $Nu$  – критерий подобия Нуссельта.

В иностранной литературе [157, 175] при расчёте вертикальных газовых прослоек в окнах при значении числа Релея  $Ra < 2 \cdot 10^5$  принято использовать следующую формулу для определения числа Нуссельта:

$$Nu = (1 + (0,0303 \cdot Ra^{0,402})^{11})^{0,091}. \quad (4.17)$$

Для прослоек, расположенных не вертикально, также предлагаются соответствующие формулы [175].

Профессором Савиным В.К. [104, 105] при соотношении высоты прослойки  $H$ , м, к её толщине  $h$ , м, больше восьми ( $\frac{H}{h} > 8$ ), что наиболее характерно для большинства современных стеклопакетов, было предложено использовать зависимости среднего конвективного коэффициента теплоотдачи для горизонтальных ( $\psi = 0$ ), вертикальных ( $\psi = \frac{\pi}{2}$ ) и наклонных ( $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$ ) газовых прослоек в виде

$$\alpha_{\text{ср}}^k = \frac{\lambda}{h} \cdot Nu, \text{ где } Nu = 0,21 \cdot \frac{\lambda}{h} \cdot (1 + \psi)^{-0,33} \cdot Gr_h^{0,25} \quad (4.18)$$

где  $\psi$  – угол наклона стеклопакета относительно горизонта, радиан.

При  $\frac{H}{h} < 1$  критерий подобия Нуссельта можно определить как

$$Nu = 0,21 \cdot (1 + \psi)^{-0,25} \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^{0,6} \cdot Gr_h^{0,25}, \quad (4.19)$$

при условии  $1 < \frac{H}{h} < 8$

$$Nu = 0,21 \cdot (1 + \psi)^{-0,25} \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^{-0,12} \cdot Gr_h^{0,25}. \quad (4.20)$$

Критерий Грасгоффа  $Gr$  определяется как

$$Gr = \frac{g \cdot h^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2}, \quad (4.21)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент объёмного расширения,  $K^{-1}$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $m/s^2$ ;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/s$ ;

$\Delta t$  – разность температур поверхностей, ограничивающих газовую прослойку,  $^{\circ}C$ .

Следовательно, для вертикальных прослоек с  $\frac{H}{h} > 8$

$$\alpha_{\text{пр}}^{\text{к}} = 0,272 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{\beta}{\nu^2}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\Delta t}{h}\right)^{0,25} = 0,272 \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta t}{h}\right)^{0,25}. \quad (4.22)$$

Был выполнен расчёт значения коэффициента  $A = \lambda \cdot \left(\frac{\beta}{\nu^2}\right)^{0,25}$  для средней температуры среды в прослойке  $t_{\text{ср}}$  в диапазоне от минус 20 до +20 °С (см. рисунок 4.1, таблицу 4.2), причём было установлено, что для воздуха в данном температурном интервале значение  $A$  отличается от  $A_{t=0^\circ\text{C}}$ , определенном при 0 °С, на  $\pm 2,1\%$ , для аргона – на  $\pm 3,5\%$ , для криптона – на  $\pm 3,6\%$ .

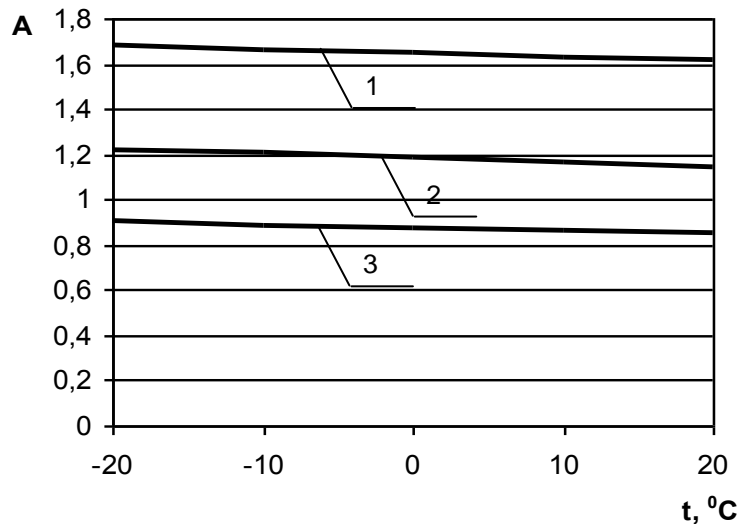


Рисунок 4.1 – Зависимость коэффициента  $A$  от средней температуры среды для: 1 – воздуха, 2 – аргона, 3 – криптона

Для удобства расчётов средний коэффициент теплоотдачи конвекцией в газовой прослойке при средней температуре в прослойке  $t_{\text{ср}} = 0$  °С,  $\frac{H}{h} > 8$  и её вертикальном положении был определён как,

$$\text{для воздуха } \alpha_{\text{пр}}^{\text{к}} = 0,447 \cdot \left(\frac{\Delta t}{h}\right)^{0,25}; \quad (4.23)$$

$$\text{для аргона } \alpha_{\text{пр}}^{\text{к}} = 0,334 \cdot \left(\frac{\Delta t}{h}\right)^{0,25}; \quad (4.24)$$

$$\text{для криптона } \alpha_{\text{пр}}^{\text{к}} = 0,246 \cdot \left(\frac{\Delta t}{h}\right)^{0,25}. \quad (4.25)$$

Таблица 4.2 – Значения коэффициента  $A$  в зависимости от средней температуры газов в прослойке

Среда	$t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	Значение коэффициента $A$ ( $A = \lambda \cdot \left(\frac{\beta}{\nu^2}\right)^{0,25}$ )	Расхождение с коэффициентом $A_{t=0^\circ\text{C}}$ при $t_{\text{ср}} = 0 ^\circ\text{C}$ , %
Воздух	-20	1,68	1,7
	-10	1,66	0,9
	0	1,65	0
	10	1,63	-1,3
	20	1,61	-2,1
Аргон	-20	1,22	3,5
	-10	1,20	1,8
	0	1,18	0
	10	1,16	-1,6
	20	1,15	-3,0
Криптон	-20	0,904	3,6
	-10	0,887	1,7
	0	0,872	0
	10	0,860	-1,4
	20	0,850	-2,6

#### 4.1.5 Расчётная схема модели

Была составлена расчётная схема модели, описывающей стационарный процесс теплопередачи через светопрозрачную часть окна с использованием теплоотражающих экранов при соотношении

$\frac{H}{h} > 8$  (см. рисунок 4.2).

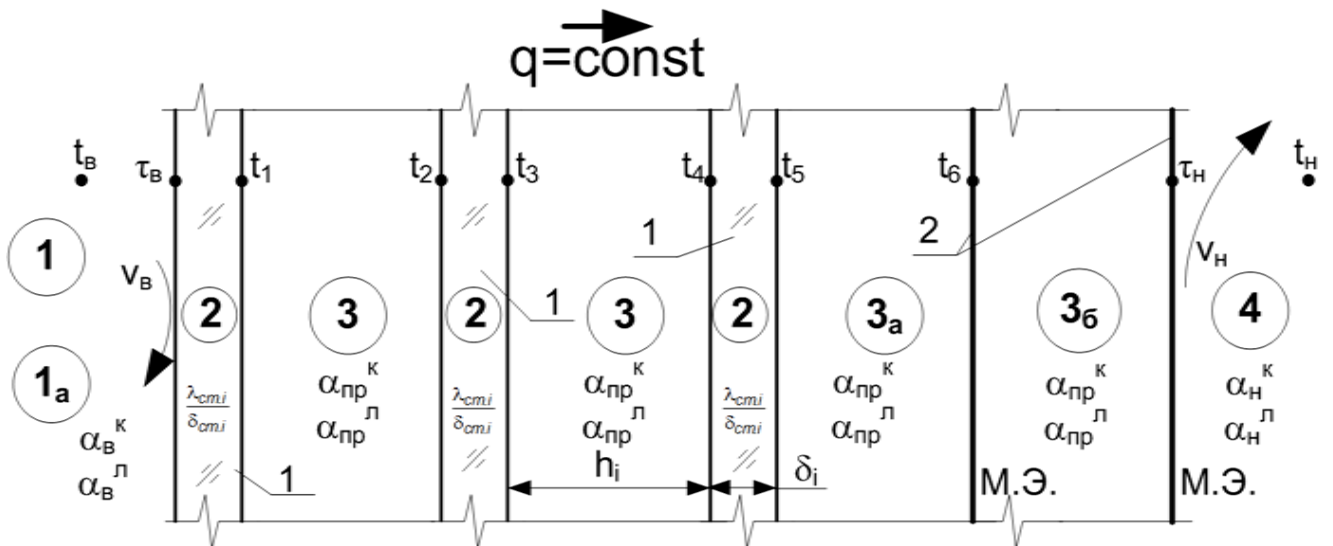


Рисунок 4.2 – Расчётная схема модели, описывающей процесс теплопередачи через окно с экранами: 1 – стекла; 2 – металлические экраны

Математическая модель теплообмена через оконную систему с экранами рассматривается как многослойная безинерционная система [101], состоящая из слоев остекления, металлических экранов и замкнутых воздушных прослоек. Каждый слой имеет свои физико-геометрические параметры, определяемые применяемым материалом остекления и экранов, типом заполнения воздушных прослоек, толщиной слоев ( $h$ ,  $\delta_{ст.и}$ ) и т.д. На границах раздела сред (слоёв) принято равенство температур и тепловых потоков. В каждой воздушной прослойке, а также на внутренней и наружной поверхностях конструкции был рассчитан коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{i(j)}$ , представляющий собой сумму конвективного  $\alpha_{i(j)}^k$  и лучистого  $\alpha_{i(j)}^l$  теплообмена:

$$\alpha_{i(j)} = \alpha_{i(j)}^k + \alpha_{i(j)}^l. \quad (4.26)$$

Около внутренней поверхности остекления конвективный теплообмен рассчитывался в зависимости от вида вентиляции в помещении (естественная или принудительная).

На рисунке 4.2 и в таблице 4.3 в окружностях приведены блоки уравнений, используемых для описания теплообмена в соответствующем слое.

В качестве общего связующего уравнения в математической модели было использовано уравнение постоянства удельного теплового потока

$$q = \frac{(t_6 - t_n)}{R_o} = \frac{\lambda_{cm.i}}{\delta_{cm.i}} \cdot (t_{cm.i} - t_{cm.i+1}) = \alpha_{np.j} \cdot (t_j - t_{j+1}) = \alpha_6 \cdot (t_6 - \tau_6) = \alpha_n \cdot (\tau_n - t_n) = const. \quad (4.27)$$

Таблица 4.3 – Блоки уравнений, описывающие составляющие коэффициента теплоотдачи  $\alpha_i$  и сопротивления стекла  $R_{ст.i}$  в слоях расчётной схемы модели

№ блока	Вид теплообмена	Описывающие уравнения*
1	От внутреннего воздуха к стеклу (экрану), естественная конвекция	(4.8), (4.9), (4.10), (4.4), (4.5) [(4.8), (4.4), (4.5)]
1а	От внутреннего воздуха к стеклу (экрану), вынужденная конвекция	(4.11), (4.4), (4.5) [(4.11), (4.4), (4.5)]
2	Внутри стекла	$\frac{\lambda_{cm.i}}{\delta_{cm.i}}$
3	Внутри воздушной прослойки между стёклами	(4.16), (4.17), (4.18), (4.22), (4.15), (4.5) [(4.20), (4.15), (4.5)]
3а	Внутри воздушной прослойки между стеклом и экраном	(4.16), (4.17), (4.18), (4.22), (4.15), (4.5) [(4.22), (4.15), (4.5)]
3б	Внутри воздушной прослойки между экранами	(4.16), (4.17), (4.18), (4.22), (4.15), (4.5) [(4.22), (4.15), (4.5)]
4	От стекла (экрана) к наружному воздуху, вынужденная конвекция	(4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) [(4.3), (4.4), (4.5)]

\* – В квадратных скобках указаны уравнения, применяемые в разработанной программе «Стеклопакет+Экраны» (см. подраздел 4.1.6)

Таким образом, решение задачи определения значений температур поверхностей, теплового потока, приведённого сопротивления теплопередаче через многослойную оконную конструкцию с теплоотражающими экранами состоит в решении системы уравнений в каждом слое. В математической модели не учитывались лучистые потоки от нагретого оборудования, расположенного внутри помещения, солнечная инсоляция, толщина теплоотражающих экранов, инертность конструкций, а также процессы происходящие в зоне сопряжения стеклопакета с рамой.

#### 4.1.6 Программная реализация математической модели

Математическая модель теплопередачи через стеклопакет (см. подраздел 4.1.5) с граничными условиями третьего рода была реализована в программно-вычислительном комплексе (ПВК) Matlab, в том числе для частного случая светопрозрачной конструкции (при условии вертикального расположения стеклопакета и соотношения воздушной прослойки  $H$  к ее толщине  $h$ , заданной как  $\frac{H}{h} > 8$ ) была разработана компьютерная «Программа для расчёта процесса теплопередачи для двухкамерного стеклопакета с металлическими теплоотражающими экранами» (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016615250 от 19 мая 2016 г.) [211]. Листинг программы приведен в Приложении Б.

Была создана функция описания процесса теплообмена для каждого слоя энергосберегающей конструкции на основе вышеуказанных уравнений (см. таблицу 4.3).

В качестве начальных данных в программе указываются параметры сред, такие как теплопроводность, степень черноты. Приводятся значения (диапазон значений) температуры и скорости внутреннего и наружного воздуха, а также вид конвекции на внутренней поверхности окна (естественная или вынужденная). Указывается число слоев остекления, число металлических экранов, воздушных прослоек, а также их последовательность расположения. Указывается геометрия оконной конструкции за счёт введения таких данных, как толщина стекла, толщина (диапазон толщин) прослойки  $h$  между экранами, стёклами.

Для начала работы итерационного решателя, написанного на языке Matlab, задаются начальные приближённые значения теплового потока и температур на поверхностях. Программа на основе начальных данных определяет текущие значения коэффициентов теплоотдачи, тепловых потоков и определяет уточнённые значения температур поверхностей. С помощью функции *fsolve* вызывается оптимизатор и находятся искомые значения удельного теплового потока и температур поверхностей. Рассчитываются значения термических сопротивлений всех

слоёв оконной конструкции и приведенное сопротивление стеклопакета с экранами.

#### 4.1.7 Результаты моделирования процесса теплопередачи через стеклопакет в ПВК Matlab

При моделировании процесса теплопередачи в ПВК Matlab [84] в качестве светопрозрачной конструкции использовался стеклопакет двухкамерный (далее СПД) формулой 4М1-10-4М1-10-4М1. Для стекла степень черноты  $\varepsilon_{ст}$  задавалась равной 0,96, теплопроводность  $\lambda_{ст} - 0,76$  Вт/(м·°С). Снаружи, на одинаковом расстоянии друг от друга, равном  $h=10$  мм, моделировалась установка сплошных теплоотражающих металлических экранов (далее МЭ), выполненных из полированного алюминия со степенью черноты  $\varepsilon$  равной 0,05. Следовательно, формулу оконной конструкции можно записать как 4М1-10-4М1-10-4М1-10-МЭ-10-МЭ.

В первом случае, температура внутреннего воздуха  $t_в$  задавалась равной 20 °С, наружного  $t_н$  – минус 15 °С. Скорость воздушного потока снаружи  $v_н$  была принята равной 5 м/с (вынужденная конвекция). С внутренней стороны конструкции моделировалась естественная конвекция. Результаты моделирования наглядно представлены на рисунке 4.3.

Невязка в расчётах температур поверхностей изменялась от 0,04 до 0,18 °С (или от 0,1 до 0,5 %). Температура на внутренней поверхности окна  $\tau_в$  (см. рисунок 4.3) составила 16,3 °С, на внешней поверхности стеклопакета  $t_5= 7,3$  °С, на первом экране  $t_6= - 2,95$  °С, на втором  $\tau_н = - 13,6$  °С. Удельный тепловой поток  $q$  составил 29,5 Вт/м<sup>2</sup>, приведенное сопротивление теплопередаче  $R_o - 1,18$  (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, что на 0,70 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (или на 146 %) больше сопротивления СПД формулой 4М1-10-4М1-10-4М1 без экранов ( $R_o=0,48$  (м<sup>2</sup>·°С)/Вт). Необходимо отметить, что численное моделирование процесса теплопередачи для вышеуказанного стеклопакета без экранов было проведено для аналогичных метеорологических условий внутреннего и наружного воздуха.





Далее в программе была определена зависимость сопротивления теплопередаче стеклопакета СПД формулой 4М1-10-4М1-10-4М1 и металлических экранов, выполненных из алюминия, от изменении разницы температур между внутренним и наружным воздухом от 30 до 50 °С (при условии естественной конвекции внутри и  $v_n=5$  м/с (см. рисунки 4.4, 4.5).

Как следует из данных компьютерного моделирования (рисунок 4.4) при изменении разницы температур приведенное сопротивление теплопередаче  $R_o$  остаётся условно постоянным для самого стеклопакета, так как изменения лучистого и конвективного коэффициентов теплоотдачи в воздушных прослойках взаимно компенсируются. Если же в конструкцию окна добавляются металлические экраны, установленные снаружи, то приведенное сопротивление объекта не только значительно увеличивается, но и становится зависимым от температурного режима эксплуатации. Так, в случае использования одного металлического экрана снаружи при изменении  $\Delta t$  от 30 до 50 °С сопротивление конструкции  $R_o$  уменьшается с 0,83 до 0,79 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (или на 0,04 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ )). При применении 3 металлических экранов данное снижение становится ещё более заметным: сопротивление  $R_o$  уменьшается с 1,72 до 1,58 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (или на 0,14 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ )). Свойство изменения  $R_o$  от  $\Delta t$  придают стеклопакету металлические экраны с высокой отражательной способностью, сводящие лучистый тепловой поток в воздушной прослойке к минимуму (см. рисунок 4.3), причём чем больше число экранов, тем значительнее эффект. Дело в том, что при использовании экранов конвективный тепловой поток в воздушной прослойке увеличивается до 80-97 %, и её термическое сопротивление согласно формуле (4.22) становится в большей степени зависимым от разницы температур на границах слоя и толщины прослойки. Если экраны в прослойке определённой толщины отсутствуют, то её термическое сопротивление остаётся неизменным. Данное утверждение наглядно проиллюстрировано на рисунках 4.4 и 4.5, а также подкрепляется данными экспериментальных исследований, приведенных в подразделе 3.5.

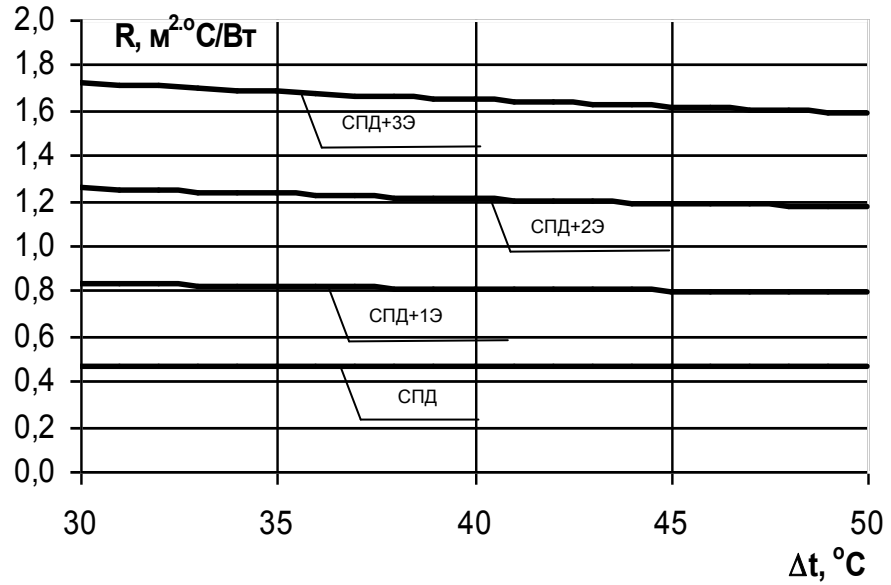


Рисунок 4.4 – Зависимость приведенного сопротивления теплопередаче  $R_o$  от разности температур между внутренним и наружным воздухом: СПД – стеклопакет двухкамерный формулой 4М1-10-4М1-10-4М; СПД+1Э – стеклопакет с установленным снаружи 1 металлическим экраном; СПД+2Э – тоже, с 2 экранами; СПД+3Э – тоже с 3 экранами

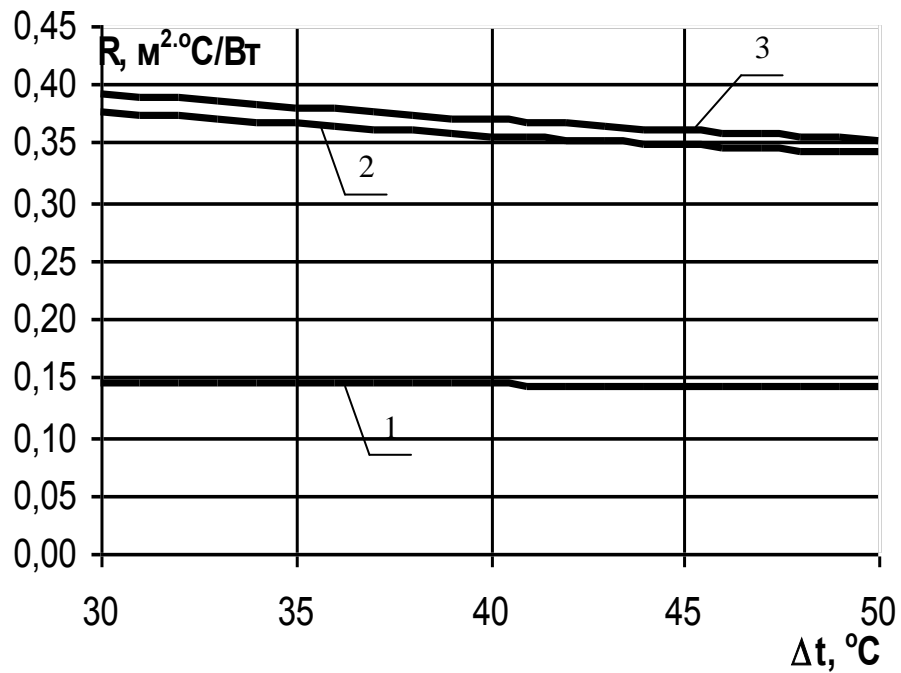


Рисунок 4.5 – Зависимость термического сопротивления теплопередаче воздушных прослоек  $R_{np}$  от разности температур  $\Delta t$  между внутренним и наружным воздухом для оконной конструкции в виде стеклопакета двухкамерного и 2 установленных снаружи металлических экранов (4М1-10-4М1-10-4М1-10-МЭ-10-МЭ): 1 – прослойка между стёклами; 2 – между стеклом и экраном; 3 – между экранами

Также было выполнено моделирование изменения толщины воздушной прослойки как в стеклопакете, так и в воздушном слое, образованном металлическими экранами (при скорости наружного воздуха  $v_H=5$  м/с и разности температур между внутренним и наружным воздухом, равной  $35$  °С ( $t_в=20$  °С,  $t_н=-15$  °С)). Результаты влияния толщины прослойки  $h$  на термическое сопротивление воздушной прослойки  $R_{np}$  можно увидеть на рис. 4.6. Данные приведены для конструкции формулой 4М1- $h$ -4М1- $h$ -4М1- $h$ -МЭ- $h$ -МЭ.

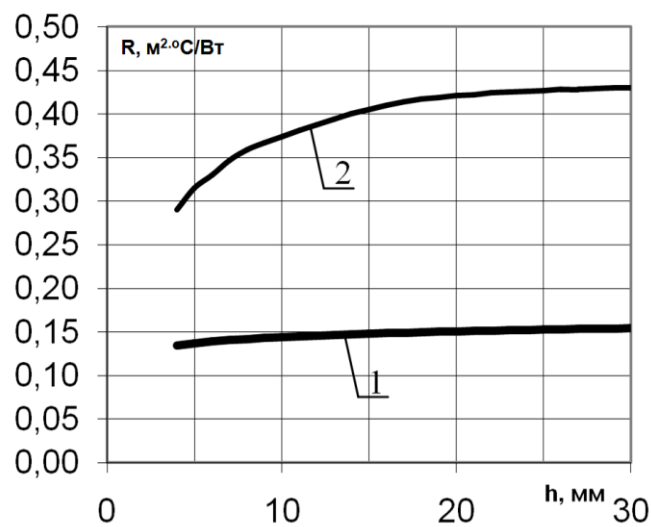


Рисунок 4.6 – Зависимость термического сопротивления  $R_{np}$  от толщины  $h$  воздушной прослойки, ограниченной: 1 – стеклами; 2 – экранами

Согласно полученным данным, при изменении значения толщины прослойки  $h$  от 5 до 30 мм термическое сопротивление воздушной прослойки  $R_{np}$ , ограниченной двумя стёклами, незначительно увеличилось с 0,135 до 0,154 (м²·°С)/Вт, т.е. на 15 %, а  $R_{np}$  прослойки между двумя экранами возросло от 0,28 до 0,43 (м²·°С)/Вт, т.е. на 53 %. Следовательно, термическое сопротивление воздушных прослоек в стеклопакете и между экранами зависит как от её ширины, так и от приведенной величины степени черноты  $\varepsilon_{np}$ . Чем ниже  $\varepsilon_{np}$ , тем большее приращение в термическом сопротивлении мы получаем от увеличения толщины прослойки. При небольших  $\varepsilon_{np}$ , преобладающую роль в теплообмене играет

конвективный теплообмен, который, в свою очередь, зависит от толщины прослойки (формула (4.22)).

В воздушной прослойке в стеклопакете градиент увеличения сопротивления теплопередаче в диапазоне изменения  $h$  от 16 до 30 мм незначительный, следовательно, оптимальной толщиной прослойки будет значение в 16 мм. В воздушной прослойке между экранами градиент увеличения сопротивления теплопередаче в диапазоне изменения  $h$  от 23 до 30 мм незначительный, следовательно, оптимальной толщиной прослойки будет значение в 23 мм. Но, целесообразно было бы разбивать данную прослойку на несколько. Так если мы разобьем воздушную прослойку толщиной в 25 мм на 2 прослойки по 12 мм, то термическое сопротивление данной конструкции увеличится с 0,43 до 0,80 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт. Дополнительное разбиение воздушной прослойки на несколько приводит к уменьшению разницы температур на поверхностях слоя, и тем самым ещё более увеличится его сопротивление.

Следовательно, чем больше слоёв в панели из металлических экранов, тем выше прирост сопротивления оконной конструкции.

Было произведено моделирование теплообмена для окон с теплоотражающими экранами в случае окисления и запыления внешних сторон панели из металлических листов. Моделирование было произведено при расчётной скорости наружного воздуха  $v_n=5$  м/с и разности температур между внутренним и наружным воздухом  $\Delta t$ , равной 35 °С ( $t_e=20$  °С,  $t_n=-15$  °С).

Так, в случае окисления внешних поверхностей металлических листов теплоотражающей панели, состоящей из трёх алюминиевых экранов с воздушной прослойкой в 10 мм, приведённое сопротивление теплопередаче конструкции формулой 4М1-10-4М1-10-4М1-10-МЭ-10-МЭ-10хМЭ снизилось с 1,68 (неокисленный алюминий) до 1,57 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (или на 6%). При высоком запылении теплоотражающих экранов и их сильном окислении сопротивление теплопередаче снизится до значения 1,40 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (или на 17 %).

Было смоделировано заполнение панели из трёх теплоотражающих экранов малотеплопроводными газами, такими как аргон и криптон. В случае заполнения

прослойка между экранами аргоном приведенное сопротивление стеклопакета с экранами формулой 4М1-10-4М1-10-4М1-10-МЭ-10-МЭ-10-МЭ при вышеуказанных условиях возрастало до 1,90 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (или на 13 %), в случае с криптоном сопротивление увеличивалось до значения 2,25 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (или на 34 %).

#### **4.2 Трехмерное моделирование процесса теплопередачи через стеклопакет в программно-вычислительном комплексе Phoenix**

Альтернативный вариант численного моделирования процесса теплопередачи через светопрозрачную часть стеклопакета с использованием металлических экранов был осуществлён методом конечных элементов [150] с помощью программно-вычислительного комплекса Phoenix. Было осуществлено трехмерное многовариантное моделирование для темного времени суток холодного периода года.

ПК Phoenix, разработанный фирмой CHAM Ltd. под руководством профессора Д. Б. Сполдинга, активно и успешно используется как отечественными (Бухмиров В.В., Гильмутдинов В.В. [11, 21], Глазов В.С. [22], Горбунов В.В. [24], Перминов В.А., Шатохин А.А. [82] и др.), так и зарубежными (Симисироглу Н. [184], Статопулу О. И., Ассимакопулос В. Д. [186] и др.) учеными для решения задач, связанных с течением жидкостей и газов, сложным теплообменом, горением, химическими реакциями и т.д. Препроцессор и постпроцессор этого программного продукта обеспечивает удобный ввод исходных данных и наглядный вывод результатов расчета [21, 176].

Моделирование производилось для однокамерного стеклопакета формулой СПО 4М1-10-4М1 (Вариант 1) и двухкамерного формулой СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 (Вариант 2), причем на расстоянии 10 мм от внешнего остекления в количестве от одного до трех штук были расположены металлические теплоотражающие экраны со степенью черноты  $\varepsilon_s = 0,05$ . В качестве примера на рисунке 4.7 изображена трехмерная геометрическая модель однокамерного стек-

лопакета формулой СПО 4М1-10-4М1 (Вариант 1) и одного теплоотражающего экрана, расположенного с наружной (холодной) стороны. Геометрическая модель была разработана в графическом редакторе ПК Phoenix.

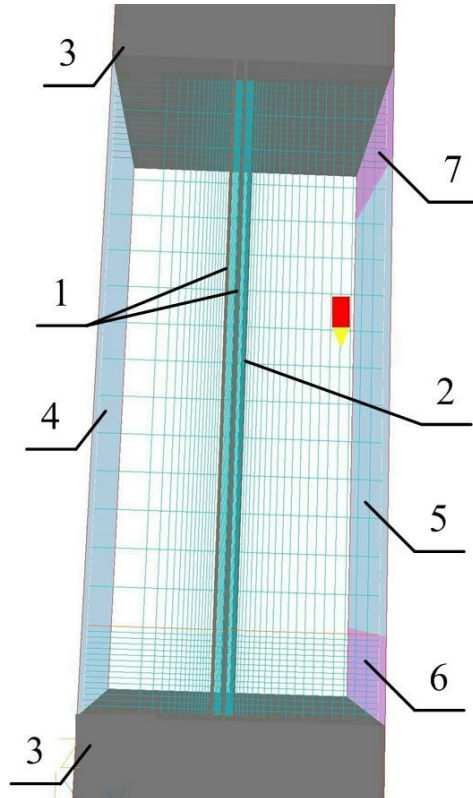


Рисунок 4.7 – Трехмерная геометрическая модель исследуемого объекта, а также расчетная сетка конечных элементов: 1 – стёкла; 2 – металлический экран; 3 – фрагмент кирпичной кладки; 4 – моделируемая поверхность стены помещения; 5 – моделируемые поверхности окружающей среды; 6 – место подачи холодного наружного воздуха; 7 – место отвода холодного наружного воздуха.

Размеры стекла (экрана) составляли 0,4x0,8 м, степень черноты –  $\varepsilon_3 = 0,96$ . В качестве среды для заполнения прослоек использовался воздух. Количество узлов сетки для модели, представленной на рисунке 4.7, составило  $61 \times 48 \times 6 = 17568$ , при этом размеры области построения трехмерной геометрической модели были заданы 0,4x1,0x0,4 м. Решение осуществлялось на адаптивной сетке с ее сгущением в зонах наибольших значений градиентов температур.

Математическое моделирование процесса теплопередачи через стеклопакет с экранами основано на решении системы дифференциальных уравнений движе-

ния (Навье-Стокса), уравнений переноса лучистой энергии, теплопроводности и сохранения энергии текучей среды (Фурье-Кирхгофа). Замыкается система дифференциальных уравнений движения воздушной среды уравнением неразрывности [21].

Задача решалась как стационарная.

Были приняты следующие граничные условия:

- на всех поверхностях скорость потока равна нулю  $\vec{v}_w(x_i) = 0$ ;
- на поверхностях внутренней стены и окружающей среды задана постоянная температура  $t_w(x_i) = const$ ; для внутренней поверхности  $t_e = 20$  °С, для окружающей среды  $t_n = \text{минус } 20$  °С.
- на поверхностях внутренней стены задан тепловой поток постоянной мощности  $q_w(x_i) = const$ , обеспечивающий необходимую температуру внутреннего воздуха;
- для стекол, экранов и кирпичной кладки заданы постоянные коэффициенты теплопроводности  $\lambda(x_i) = const$ . В соответствии с расчетными данными коэффициенты теплопроводности для стекла – 0,76 Вт/(м·°С), для кирпичной кладки – 0,56 Вт/(м·°С), для алюминия – 221 Вт/(м·°С);
- были приняты соответствующие коэффициенты степени черноты материалов  $\varepsilon$ ;
- температура воздуха, поступающего через отверстие для подачи, равна температуре наружного воздуха  $t_n$  – минус 20 °С;
- скорость воздуха, поступающего через отверстие для подачи (поз. 6, рисунок 4.7), равна скорости наружного воздуха  $v_n = 5$  м/с;
- давление воздуха в месте его отвода (поз. 7, рисунок 4.7) равно атмосферному.

Были приняты следующие допущения. В математической модели не учитывались солнечная инсоляция, инерционные свойства конструкций, воздухопроницаемость, а также процессы происходящие в зоне сопряжения стеклопакета с рамой (дистанционная рамка и т.д.).



В ПК Phoenix численная аппроксимация дифференциальных уравнений выполняется методом контрольного объема [21, 81]: геометрическое (и временное) пространство разбивается на конечное число объемов и для каждого из них записывается уравнение баланса субстанции (энергии, импульса, массы и т.д.). При этом баланс для каждого контрольного объема в общем случае связан с балансом смежных с ним объемов. Полученная таким образом система алгебраических уравнений решается методом итераций [21].

Для замыкания системы уравнений Навье-Стокса применяют различные модели турбулентности. Обзор методов расчета турбулентности подробно изложен в исследованиях Бухмирова В.В., Гильмутдинова А.Ю. [21], Пророковой М.В. [93] и других ученых [24, 22]. На основании анализа данных работ при создании имитационной модели теплопередачи через стеклопакет с экранами было принято решение использовать  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности. Для численного согласования решений осредненных уравнений неразрывности и Навье-Стокса использовался SIMPLEST-алгоритм [81].

В результате проведения многовариантного имитационного трехмерного моделирования были определены как локальные, так и средние (приведенные) значения таких параметров как температура, скорость воздуха, удельный тепловой поток и сопротивление теплопередаче конструкции, построены параметрические поля.

В таблице 4.4 представлены некоторые результаты моделирования процесса теплопередачи через однокамерный и двухкамерный стеклопакет при использовании металлических теплоотражающих экранов, изготовленных из алюминиевой фольги и установленных со стороны окружающей среды. Наибольшие удельные тепловые потери фиксируются для контрольного варианта, когда теплоотражающие экраны не используются. Так, при моделировании процесса теплопередачи для СПО 4M1-10-4M1 потери составили  $129 \text{ Вт/м}^2$ , для СПД 4M1-10-4M1-10-4M1 –  $82 \text{ Вт/м}^2$ . Использование экранов приводит к значительному уменьшению удельных тепловых потерь: 3 экрана уменьшают  $q$  с  $129$  до  $31 \text{ Вт/м}^2$  для СПО и с  $82$  до  $23 \text{ Вт/м}^2$  для СПД.

Таблица 4.4 – Теплотехнические показатели в центральной зоне однокамерного СПО 4М1х10х4М1 и двухкамерного СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 стеклопакетов при использовании с холодной стороны металлических экранов (МЭ), полученные при моделировании в ПВК Phoenix

Варианты	Температура, °С		Разность температур $\Delta t$ , °С	Уд. тепловой поток $q$ , Вт/м <sup>2</sup>	Сопротивление теплопередаче	
	$\tau_1^*$	$\tau_k^{**}$			приведен. $R_0$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	относит. $\widetilde{R}_0^{np}$
СПО (4М1х10х4М1)	5,1	-11,1	16,2	129	0,31	1
СПО + 1 МЭ	13,0	-16,9	29,9	68	0,59	1,9
СПО + 2 МЭ	15,2	-18	33,2	42	0,95	3,06
СПО + 3 МЭ	16,1	-18,5	34,6	31	1,29	4,16
СПД (4М1х10х4М1х10х4М1)	11,4	-15,9	27,3	82	0,49	1
СПД + 1 МЭ	14,6	-17,5	32,1	51	0,78	1,59
СПД + 2 МЭ	16,2	-18,4	34,6	33	1,21	2,47
СПД + 3 МЭ	17,2	-18,9	36,1	23	1,72	3,51

\* – на поверхности стекла, обращенной в помещение;

\*\* – на поверхности, обращенной в окружающую среду

На основании данных таблицы 4.4 были построены рисунки 4.8 и 4.9, иллюстрирующие влияние применения экранов в стеклопакетах на приведенное  $R_0$  и относительное  $\widetilde{R}_0^{np}$  сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций.

Следует констатировать, что наибольшие приведенное сопротивление фиксируется в случае использования трех теплоотражающих экранов. Так, для СПО 4М1-10-4М1 сопротивление  $R_0$  увеличивается с 0,31 до 1,29 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (на 0,98 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт или в 4,16 раза), а для СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 – с 0,49 до 1,72 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (на 1,23 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт или 3,51 раза).

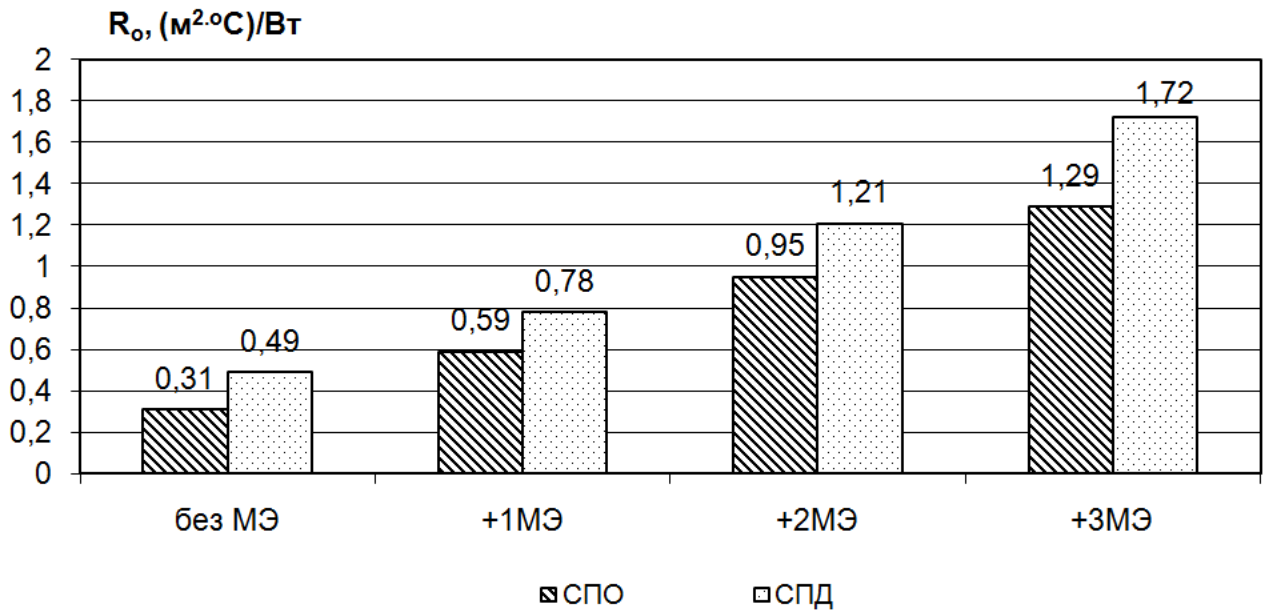


Рисунок 4.8 – Влияние количества металлических теплоотражающих экранов (МЭ), установленных по отношению к однокамерному (СПО) или двухкамерному (СПД) стеклопакетам со стороны окружающей среды, на приведенное сопротивление теплопередаче  $R_0$  конструкции

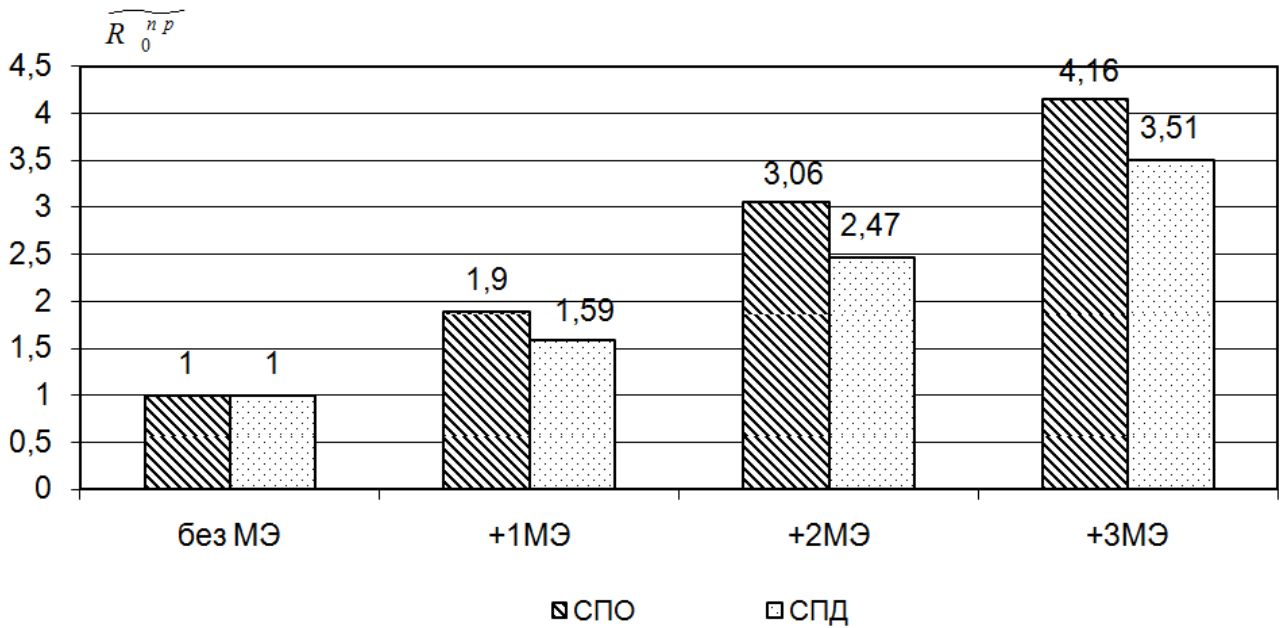


Рисунок 4.9 – Влияние количества металлических теплоотражающих экранов (МЭ), установленных по отношению к однокамерному (СПО) или двухкамерному (СПД) стеклопакетам со стороны окружающей среды, на относительное сопротивление теплопередаче  $\widetilde{R}_0^{np}$  конструкции

Необходимо отметить, что больший рост относительного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции для СПО 4М1-10-4М1 при использова-

нии экранов вызван тем обстоятельством, что однокамерный стеклопакет обладает значительно меньшим начальным (базовым) сопротивлением ( $0,31 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ ) по сравнению с сопротивлением двухкамерного стеклопакета.

Не менее интересными для изучения являются результаты расчета температурных полей воздушных прослоек и поверхностей, образующих ограждающую конструкцию.

На рисунке 4.10 представлено сравнение температурных полей на поверхностях в центральной части однокамерного стеклопакета СПО и металлического экрана (МЭ) при его использовании и в контрольном варианте. Значение температуры в каждой точке отображается цветовым оттенком в соответствии с приведенной шкалой.

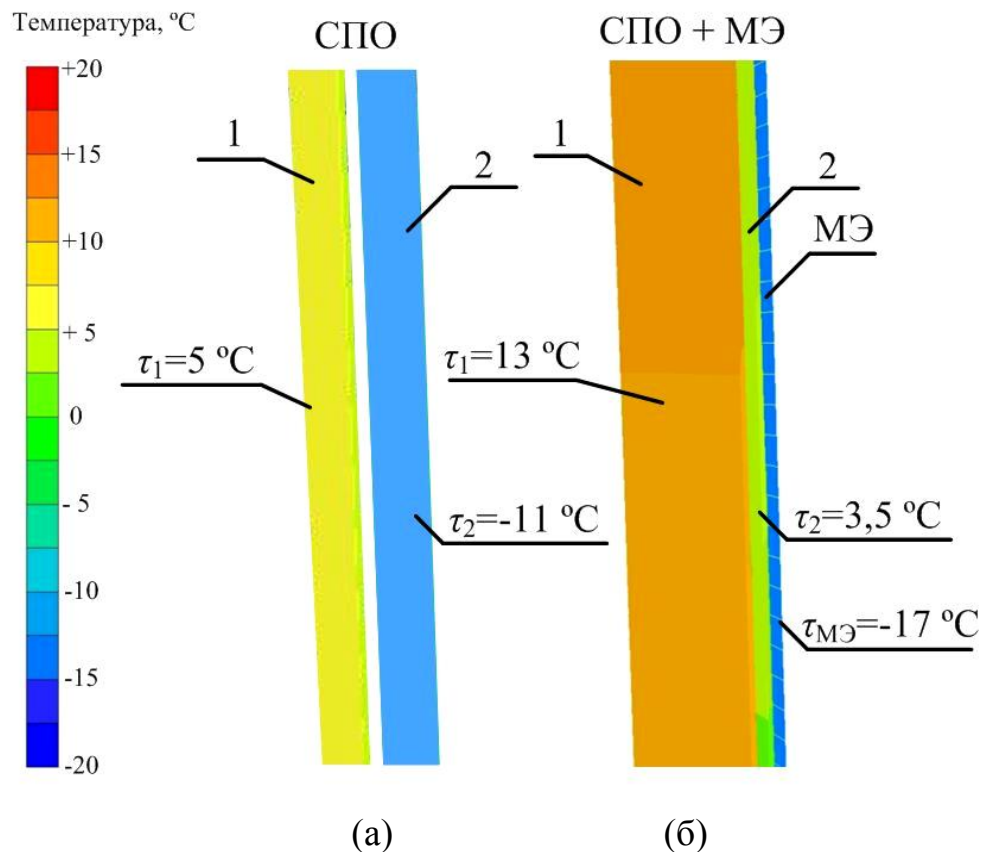


Рисунок 4.10 – Сравнение температурных полей на поверхностях в центральной части однокамерного стеклопакета СПО и металлического экрана (МЭ), при его использовании (б) и без (а) : 1 – первое стекло; 2 – второе стекло; МЭ – экран

Применение экрана увеличивает температуру поверхности стекла, обращенного внутрь помещения, с 5 до 13 °С, что является важным обстоятельством при

борьбе с выпадением конденсата на светопрозрачных ограждающих конструкциях. На основании данных таблицы 4.4 можно отметить, что применение экранов со стороны окружающей среды в случае с двухкамерным стеклопакетом также повышает температуру внутренней поверхности стекла с  $11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в контроле), до  $14,6$ ,  $16,2$ ,  $17,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  при использовании одного, двух и трех экранов, соответственно.

На рисунке 4.11 наглядно представлено изменение температур на поверхностях стекла и экрана по высоте и по горизонтали.

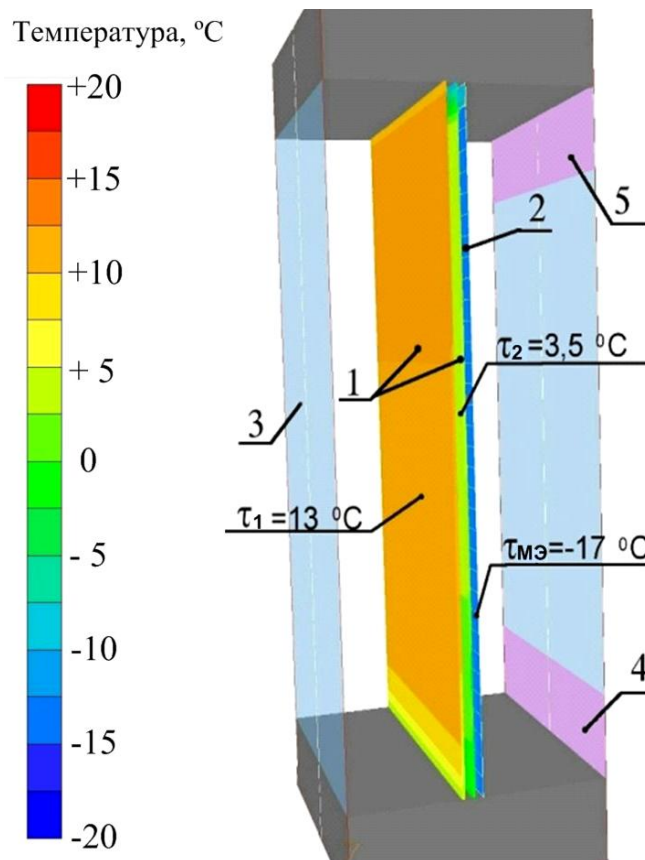


Рисунок 4.11 – Температурное поле на поверхностях однокамерного стеклопакета СПО и одного металлического экрана (МЭ): 1 – стёкла; 2 – экран; 3 – моделируемая стена помещения; 4 – место подачи холодного наружного воздуха; 5 – место отвода холодного наружного воздуха

Мы можем наблюдать, что перепад температур на поверхностях наружного стекла ( $\tau_2 = 3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и экрана ( $\tau_{\text{МЭ}} = \text{минус } 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), равный  $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , значительно больше разности температур на поверхностях однокамерного стеклопакета  $\Delta\tau_{\text{СПО}}$ , равной  $9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это объясняется тем, что сопротивление воздушной прослойки

стеклопакета составляет  $0,14 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ , а прослойки, образованной стеклом и экраном, в 2,0 раза больше и равняется  $0,28 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ . В верхней и нижней краевых зонах стеклопакета мы можем наблюдать достаточное снижение температуры, так как в этих местах стекло примыкает к поверхности оконного проёма, и в данных зонах весомую роль играет сток теплоты через так называемые «мостики холода».

На рисунке 4.12 представлено температурное поле воздушной среды по высоте и в центральной части стеклопакета однокамерного СПО с установленным со стороны окружающей среды экраном. Внутри межстекольного пространства, вследствие разности температур остекления, образуются восходящие и нисходящие потоки (см. рисунок 4.13), перемещение которых и обуславливает более интенсивное охлаждение нижней части стеклопакета.

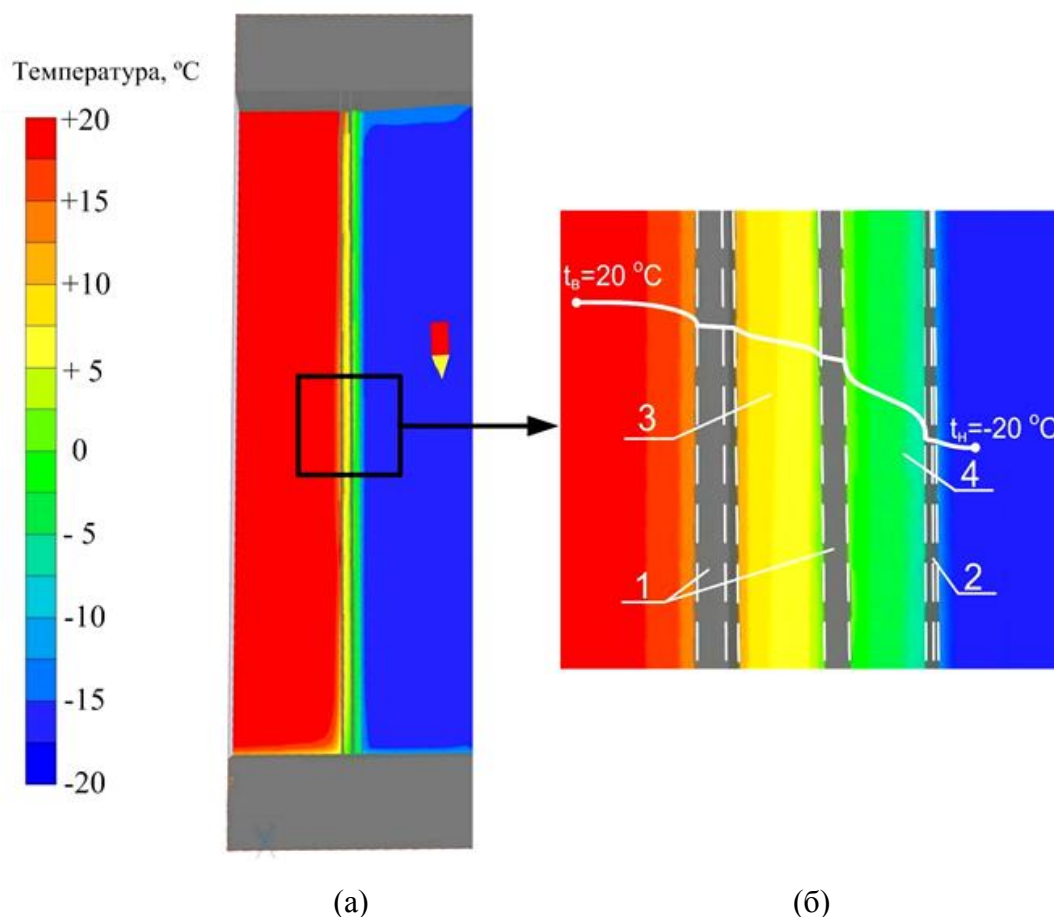


Рисунок 4.12 – Температурное поле воздушной среды по высоте (а) и в центральной части (б) стеклопакета однокамерного СПО с установленным со стороны окружающей среды экраном: 1 – стёкла; 2 – металлический экран; 3 – воздушная прослойка между стёклами; 4 – прослойка между стеклом и экраном

Необходимо подчеркнуть, что изменение температуры вглубь прослойки отклоняется от линейного закона (см. температурный график), причём в прослойке, образованной стеклом и металлическим экраном данное отклонение более выражено. Данный факт согласуется с результатами исследований отечественных и зарубежных ученых.

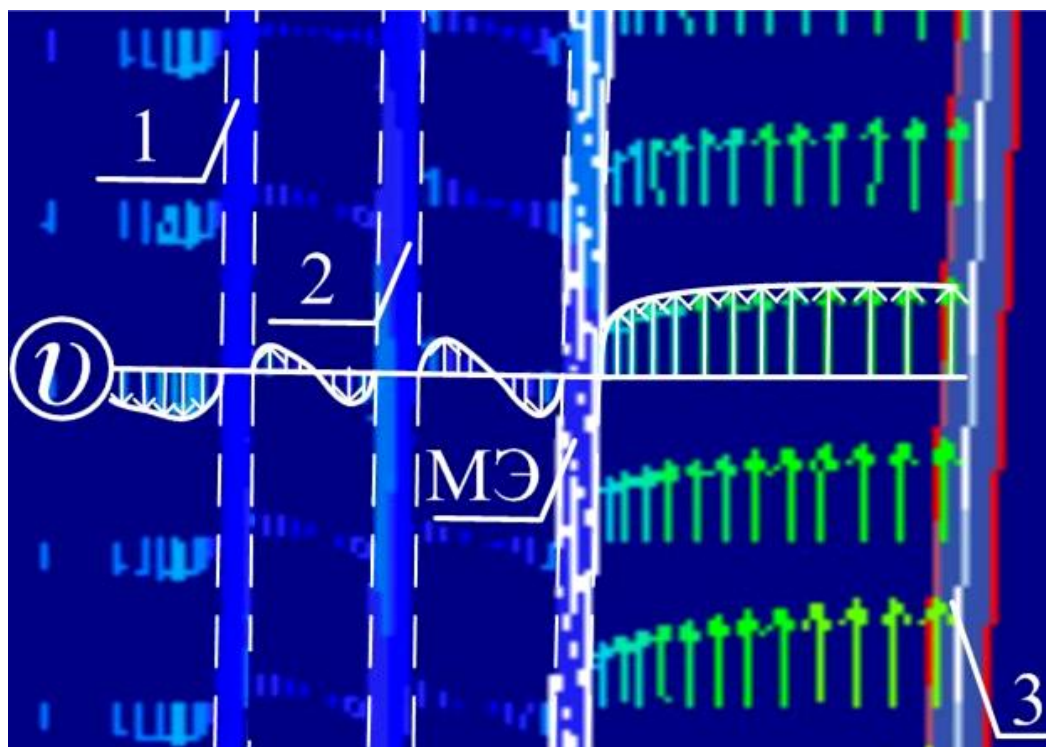


Рисунок 4.13 – Поле и профиль скоростей в центральной зоне однокамерного стеклопакета СПО и металлического экрана: 1 – первое стекло; 2 – второе стекло; МЭ – экран; 3 – поверхность окружающей среды (в прослойке между стеклами критерий Релея  $Ra$  равен 1380, между стеклом и экраном – 2840)

Как показали исследования отечественных ученых Варапаева В. Н., Голубева С.С. [14], Савина В.К. [104], Петрова Е.В., Терехова В.И. [83], Кривошеина А.Д., Харламова Д.А. [57], канадских авторов Райта Д.Л. (Wright J.L.), Салливана Х.Ф. (Sullivan H.F.) [187] в прослойке образуются два пограничных слоя. Около стенки с большей температурой воздух движется вверх, а с меньшей – вниз и профили скоростей у стенок имеют вид параболы со смещенным центром (см. рисунок 4.14).

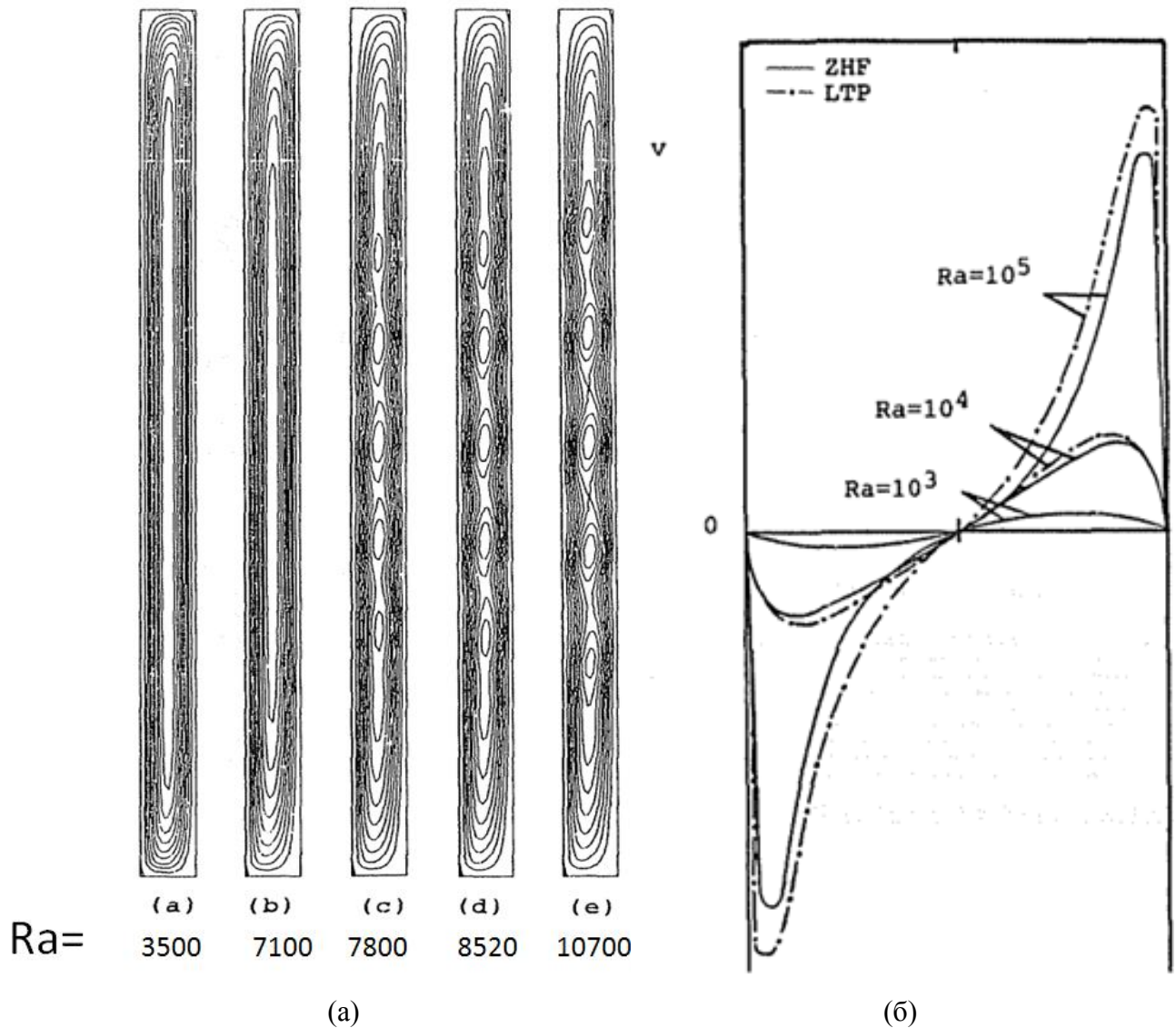


Рисунок 4.14 – Линии тока (а) [162] и профили скоростей (б) [187] воздуха в прослойке при различных значениях числа Релея

Дело в том, что ширина прослойки больше критического значения (при данном перепаде температур), поэтому и происходит конвективное движение воздуха, в противном случае передача тепла осуществлялась бы только теплопроводностью и излучением. Это приводит к высокому значению градиента температур именно у поверхностей, ограничивающей воздушную прослойку (см. рисунок 4.15).



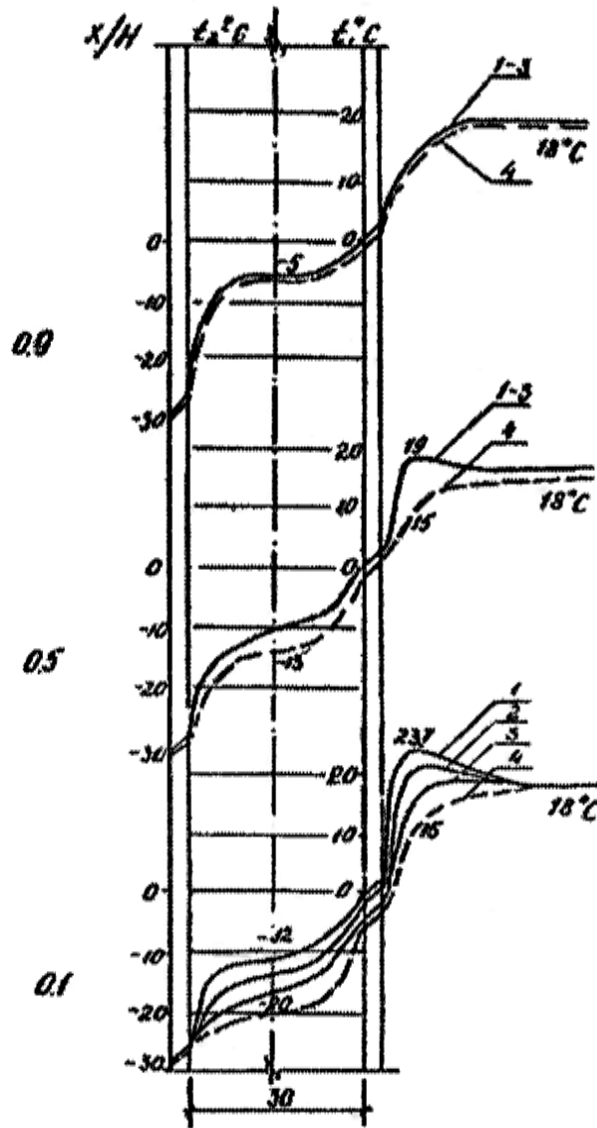


Рисунок 4.15 – Температурное поле в воздушной прослойке окна при установке под ним нагревательного прибора: 1 – температура нагревательного прибора  $t_0 = 150^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_0 = 100^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_0 = 50^\circ\text{C}$ ; 4 – без нагревательного прибора (данные В.К. Савина [104])

### 4.3 Проверка адекватности математических моделей теплопередачи через стеклопакет с экранами

Достоверность расчета температуры, удельных тепловых потоков и приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции, выполненного в ходе математического моделирования в ПК Matlab (одномерная модель, см. подраздел 4.1) и Phoenix (трехмерная модель, см. подраздел 4.2), была проверена путем сопоставления с данными экспериментального исследования про-

цесса теплопередачи через двухкамерный стеклопакет формулой СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 и расположенные со стороны холодного отделения на расстоянии 10 мм друг от друга сплошные алюминиевые экраны, выполненного в сертифицированной климатической камере АНО "Ивановостройиспытания", а также со справочными значениями сопротивления, представленного в Приложении А ГОСТ 24866-99 «Стеклопакеты клееные строительного назначения. Технические условия» [30]. Результаты экспериментальных исследований приведены в подразделах 3.3 и 3.5 диссертации. Одномерное моделирование было осуществлено в разработанной компьютерной "Программе для расчёта процесса теплопередачи для двухкамерного стеклопакета с металлическими теплоотражающими экранами" (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016615250 от 19 мая 2016 г.), реализованной в ПВК Matlab.

Расчет был выполнен для условий, при которых осуществлялся эксперимент по исследованию зависимости приведенного сопротивления теплопередаче СПД с экранами от температурных режимов испытаний. В теплом отделении климатической камеры поддерживали температуру равной  $+20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в холодном отделении температуру ступенчато повышали с шагом около  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  от значения  $-15,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $+4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , соответственно. В первом случае перепад температур составлял около  $35,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в последующих он оказывался равным  $25,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , соответственно.

Тепловизионная съёмка внутренних поверхностей окна осуществлялась с помощью тепловизора TESTO 882. Термограммы и температурные графики по секущей линии центральной части стеклопакета можно увидеть на рисунке 4.16, причём слева в холодном отделении установлен один алюминиевый сплошной панельный экран на расстоянии 10 мм от наружного стекла стеклопакета, справа – только стеклопакет. «Всплески» температур на графиках обусловлены нахождением в исследуемой зоне окна шины для крепления термопар и соединительных проводов, которые располагаются на некотором удалении от поверхности стекла, обращенного в теплое отделение.

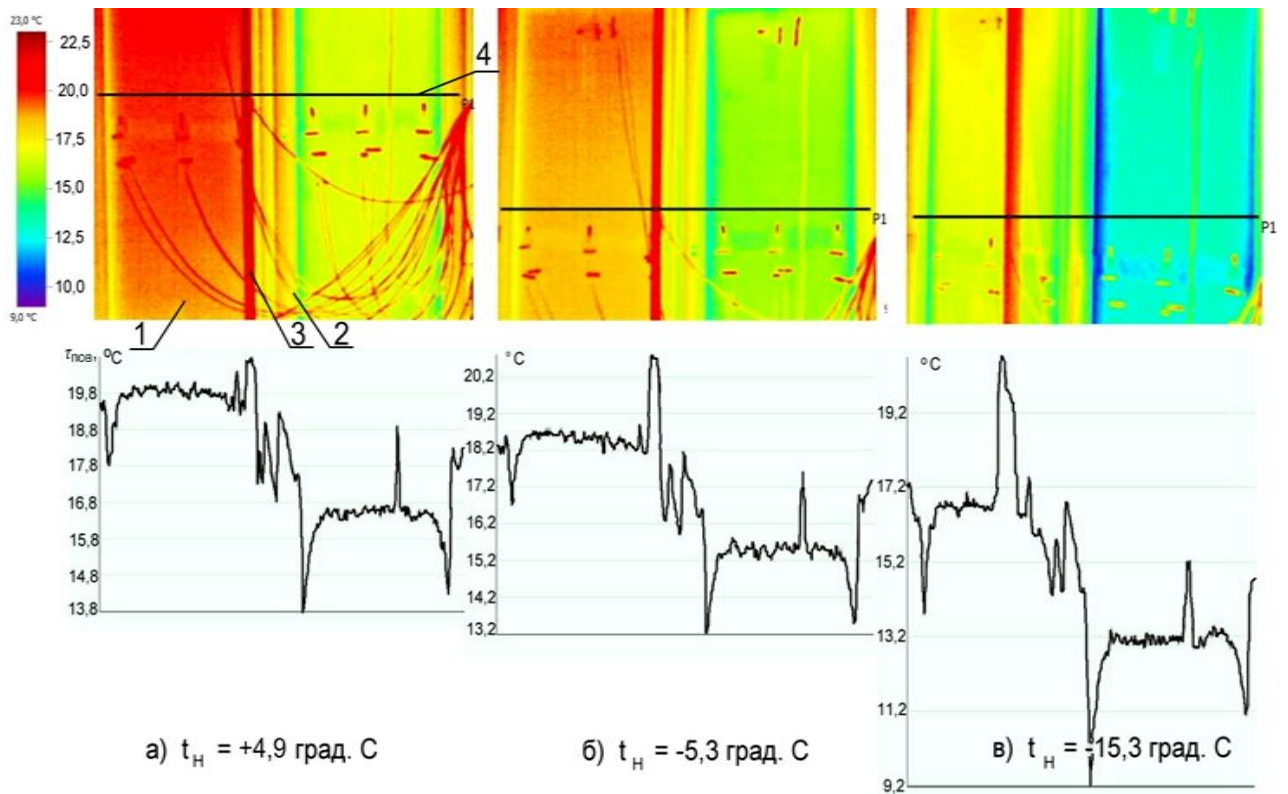


Рисунок 4.16 – Термограммы и температурные графики по секущей линии на внутренней поверхности центральной зоны стеклопакета при поддержании в холодном отделении климатической камеры температуры воздуха  $t_{\text{н}}$ , равной  $+4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (а), минус  $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (б) и минус  $15,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в): 1 – внутренняя поверхность стеклопакета, причём в холодном отделении камеры установлен 1 теплоотражающий экран; 2 – переплёт из профиля ПВХ; 3 – шина для крепления термопар, измеряющих  $t_{\text{в}}$ ; 4 – секущая линия, для построения температурных графиков на поверхности

В случае проверки достоверности результатов математического моделирования в ПВК Phoenics сравнение значений температур, удельных тепловых потоков и приведенного сопротивления теплопередаче осуществлялось для трех экспериментальных точек, расположенных по вертикальной оси в нижней краевой ("т. 4" или "т. 14" рисунок 4.17), центральной ("т. 3" или "т. 13" рисунок 4.17) и верхней краевой ("т. 2" или "т. 12" рисунок 4.17) зонах, для перепада температур в  $35,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  при использовании экранов от одного до трех. Проверка адекватности математической модели теплопередачи, реализованной в ПВК Matlab, осуществлялась только для центральной точки "т.3", но для всех трех температурных режимов проведения лабораторного эксперимента и также при использовании экранов в количестве от одного до трех.

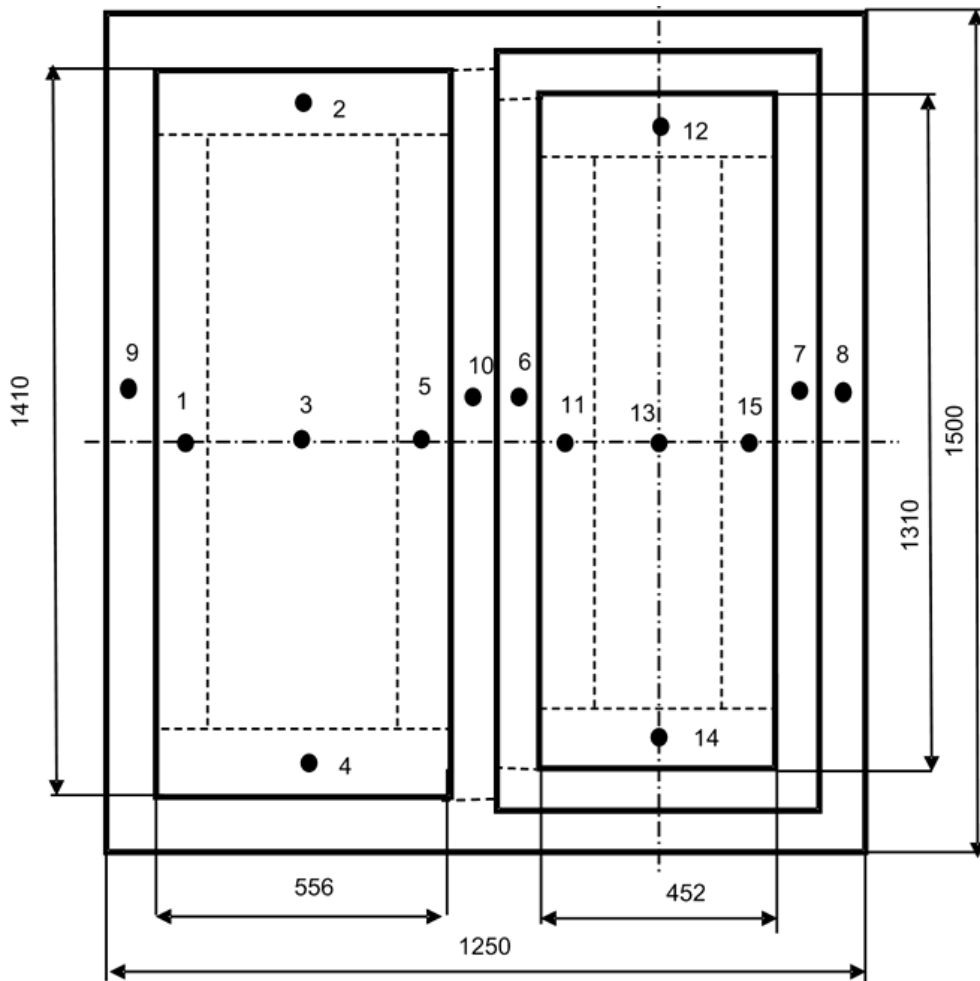


Рисунок 4.17 – Схема размещения термопар и тепломеров на образце оконного блока (цифрами указаны номера точек замера температур и тепловых потоков)

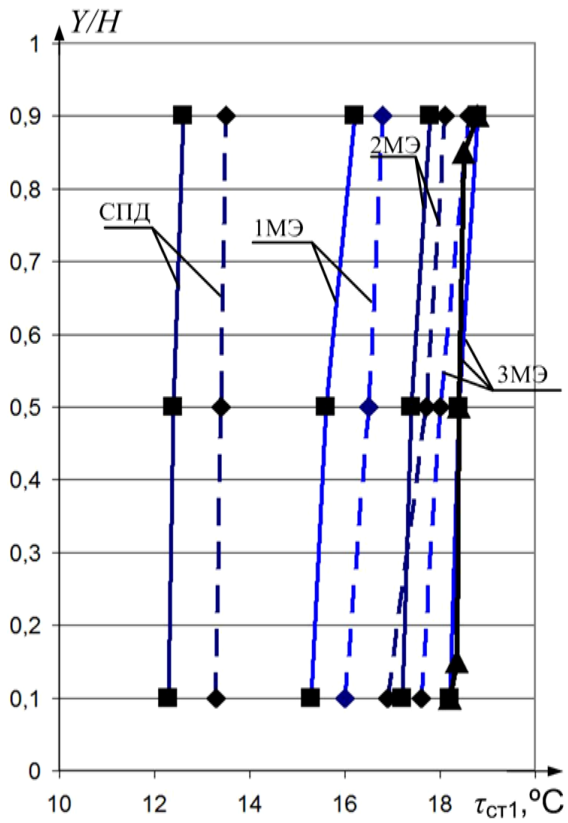
Исходные данные, при которых выполнена проверка адекватности модели, представлена в таблицах 4.5 и 4.6. В таблице 4.5 приведены экспериментальные данные и результаты расчета в ПК Phoenix, а в таблице 4.6 – в ПК Matlab. На основании данных таблицы 4.5 построены графики распределения температуры  $\tau_{ст1}$  на внутренней (обращенной в теплое отделение камеры) поверхности остекления, удельных тепловых потоков  $q$  и приведенного сопротивления теплопередаче  $R$  по высоте двухкамерного стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 при использовании различного количества металлических экранов со стороны холодного отделения камеры. На рисунке 4.18 также представлены результаты расчета процесса теплопередачи через стеклопакет с 3 экранами, выполненного для 5 точек, которые более наглядно отображают картину распределения параметров, чем в случае расчета для 3 точек.

Таблица 4.5 – Распределение температуры на поверхности стекол  $\tau_{ст}$ , удельного теплового потока  $q$  и приведенного сопротивления теплопередаче стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 с металлическими экранами (МЭ) по высоте конструкции (экспериментальные данные и результаты моделирования в ППК Phoenix) при разности температуры воздуха в теплом и холодном отделениях климатической камеры  $\Delta\tau=35,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

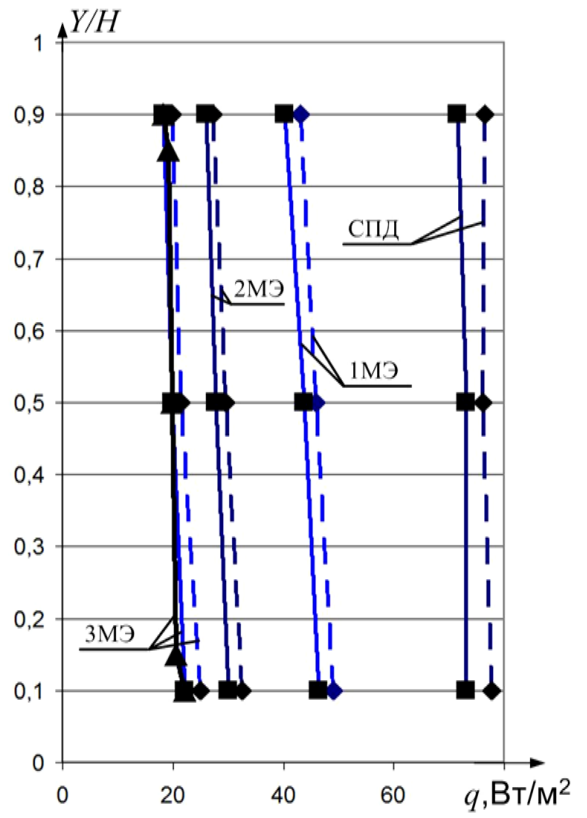
Вариант	Точки	Температура, $^{\circ}\text{C}$				Удельный тепловой поток $q$ , Вт/ $\text{m}^2$		Прив. сопротивление теплопередаче $R_o$ , ( $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ )/Вт	
		$\tau_{ст1}^*$		$\tau_{ст3}^{**}$		эксперимент	расчет в Phoenix	эксперимент	расчет в Phoenix
		эксперимент	расчет в Phoenix	эксперимент	расчет в Phoenix				
СПД	4 (14)	13,1	12,3	-11,6	-9,6	79,6	73,1	0,45	0,49
	3 (13)	13,4	12,4	-10,2	-9,5	76,2	73,1	0,47	0,49
	2 (12)	13,5	12,6	-10,2	-8,9	76,4	71,6	0,47	0,5
СПД + 1 МЭ	4 (14)	16	15,3	0,8	1,4	49	46,5	0,73	0,77
	3 (13)	16,4	15,6	2	2,5	46,5	43,7	0,77	0,82
	2 (12)	16,8	15,8	3,3	4,1	43,1	40,2	0,83	0,89
СПД + 2 МЭ	4 (14)	16,9	17,2	6,7	8,2	32,5	30,1	1,1	1,19
	3 (13)	17,6	17,4	8,2	9,1	30,3	27,8	1,18	1,29
	2 (12)	18,1	17,8	9,8	10	27,3	26,1	1,31	1,37
СПД + 3 МЭ	4 (14)	17,6	18,2	9,9	11,5	25	22,2	1,43	1,61
	3 (13)	18,1	18,4	11,7	12,5	20,8	19,8	1,72	1,81
	2 (12)	18,6	18,8	12,7	13,3	19,8	18,3	1,81	1,96

\* - на поверхности стекла, обращенного в теплое отделение камеры

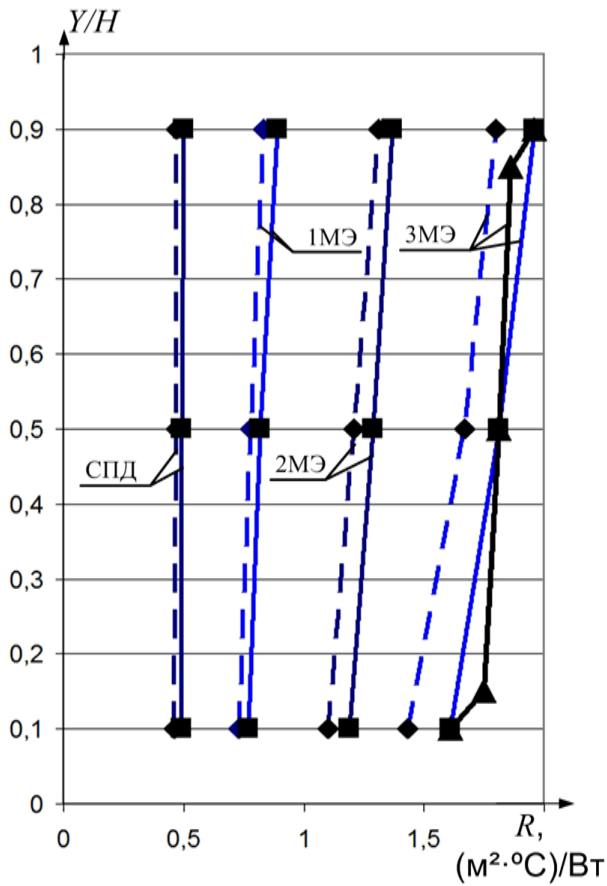
\*\* - на поверхности стекла, обращенного в холодное отделение камеры



а)



б)



в)

- — Phoenix (3 точки)
- ◆ — Эксперимент (3 точки)
- ▲ — Phoenix (5 точек)

Рисунок 4.18 – Распределение температуры  $\tau_{ст1}$  на внутренней (ТО) поверхности остекления (а), удельных тепловых потоков  $q$  (б) и приведенного сопротивления теплопередаче  $R_o$  (в) по высоте двухкамерного стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 при использовании различного количества металлических экранов в холодном отделении камеры: СПД – только стеклопакет; 1 МЭ – СПД и 1 экран; 2 МЭ – СПД и 2 экрана; 3 МЭ – СПД и 3 экрана

Анализ таблицы 4.5 и рисунка 4.18 показывает, что более высокие значения температур на поверхности стекла  $\tau_{ст1}$  фиксируются в случае применения со стороны холодного отделения 3 экранов: расчетная температура в центральной зоне увеличивается со значения 12,4 до 18,4 °С (или на 6 °С). Рост температуры также наблюдается и по высоте стекла, причем чем больше количество экранов, тем он значительней. Так, в контрольном варианте (только СПД) температура по высоте увеличивается в эксперименте с 13,1 до 13,5 °С (на 0,4 °С) или с 12,3 до 12,6 °С (на 0,3 °С) для расчета в Phoenix, в случае применения 3 экранов – с 17,6 до 18,6 °С (на 1,0 °С) или с 18,2 до 18,8 °С (на 0,6 °С), соответственно.

Аналогичную закономерность можно отметить и для приведенного сопротивления теплопередаче зоны стеклопакета. При использовании трех металлических экранов экспериментальное сопротивление  $R$  в центре увеличивается по отношению к контрольному варианту с 0,47 до 1,72 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (на 1,25 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) или на 266%), а полученное в ходе расчета – с 0,49 до 1,81 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (на 1,32 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) или на 270%). В контрольном варианте (только СПД) сопротивление по высоте увеличивается в эксперименте с 0,45 до 0,47 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (на 0,02 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ )) или с 0,49 до 0,50 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (на 0,01 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ )) для расчета в Phoenix, в случае применения 3 экранов – с 1,43 до 1,81 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (на 0,382 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ )) или с 1,61 до 1,96 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (на 0,35 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ )), соответственно.

На основании данных таблицы 4.6 были построены графики изменения приведенного сопротивления теплопередаче стеклопакета с экранами при варьировании разности температур  $\Delta t$  в теплом и холодном отделениях климатической камеры, представленные на рисунке 4.19. На данном рисунке приводятся не только данные эксперимента и результатов моделирования в ПК Matlab, но также и в ПК Phoenix ( для разности температур  $\Delta t$ , равной 35,8 °С). Значения приведены только для центральной зоны стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1. Как следует из анализа данных таблицы 4.6 и рисунка 4.19 при изменении разницы температур  $\Delta t$  приведенное сопротивление теплопередаче  $R_0$  остаётся условно постоянным для случая применения только стеклопакета без экранов. Если же в конструкцию окна добавляются металлические экраны, то приведенное сопротив-

ление объекта не только значительно увеличивается, но и становится зависимым от температурного режима эксплуатации.

Таблица 4.6 – Значения температуры на поверхности стекол  $\tau_{ст}$ , удельного теплового потока  $q$  и приведенного сопротивления теплопередаче стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 с металлическими экранами (МЭ) в центральной зоне конструкции (экспериментальные данные и результаты моделирования в ППК Matlab) при величине разности температур воздуха в теплом и холодном отделениях климатической камеры  $\Delta t$  15,6 °С, 25,8 и 35,8 °С

Вариант	Разность температуры $\Delta t$ , °С	Температура, °С				Удельный тепловой поток $q$ , Вт/м <sup>2</sup>		Прив. сопротивление теплопередаче $R_0$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	
		$\tau_{ст1}$ *		$\tau_{ст3}$ **		эксперимент	расчет в Matlab	эксперимент	расчет в Matlab
		эксперимент	расчет в Matlab	эксперимент	расчет в Matlab				
СПД	15,6	16,9	16,6	6,9	6,4	32,5	33,9	0,48	0,46
	25,8	14,6	14,1	-2	-2,7	53,8	56,1	0,48	0,46
	35,8	13,4	12	-10,2	-11,6	76,2	79,6	0,47	0,45
СПД + 1 МЭ	15,6	18,7	18,3	13,2	12,7	18,1	18,8	0,86	0,83
	25,8	17,3	16,7	7,6	6,8	31,5	33,1	0,82	0,78
	35,8	16,4	15,5	2	1,2	46,5	47,7	0,77	0,75
СПД + 2 МЭ	15,6	19,3	19,1	15,5	15,8	11,6	11	1,35	1,42
	25,8	18,4	18,1	11,7	12,3	21	19,5	1,23	1,32
	35,8	17,6	17	8,2	8,5	30,3	28,4	1,18	1,26
СПД + 3 МЭ	15,6	19,6	19,4	16,5	17,1	8	7,7	1,94	2,03
	25,8	18,8	18,6	14	14,5	14,4	13,7	1,79	1,88
	35,8	18,1	17,7	11,7	12	20,8	20	1,72	1,79

\* - на поверхности стекла, обращенного в теплое отделение камеры

\*\* - на поверхности стекла, обращенного в холодное отделение камеры



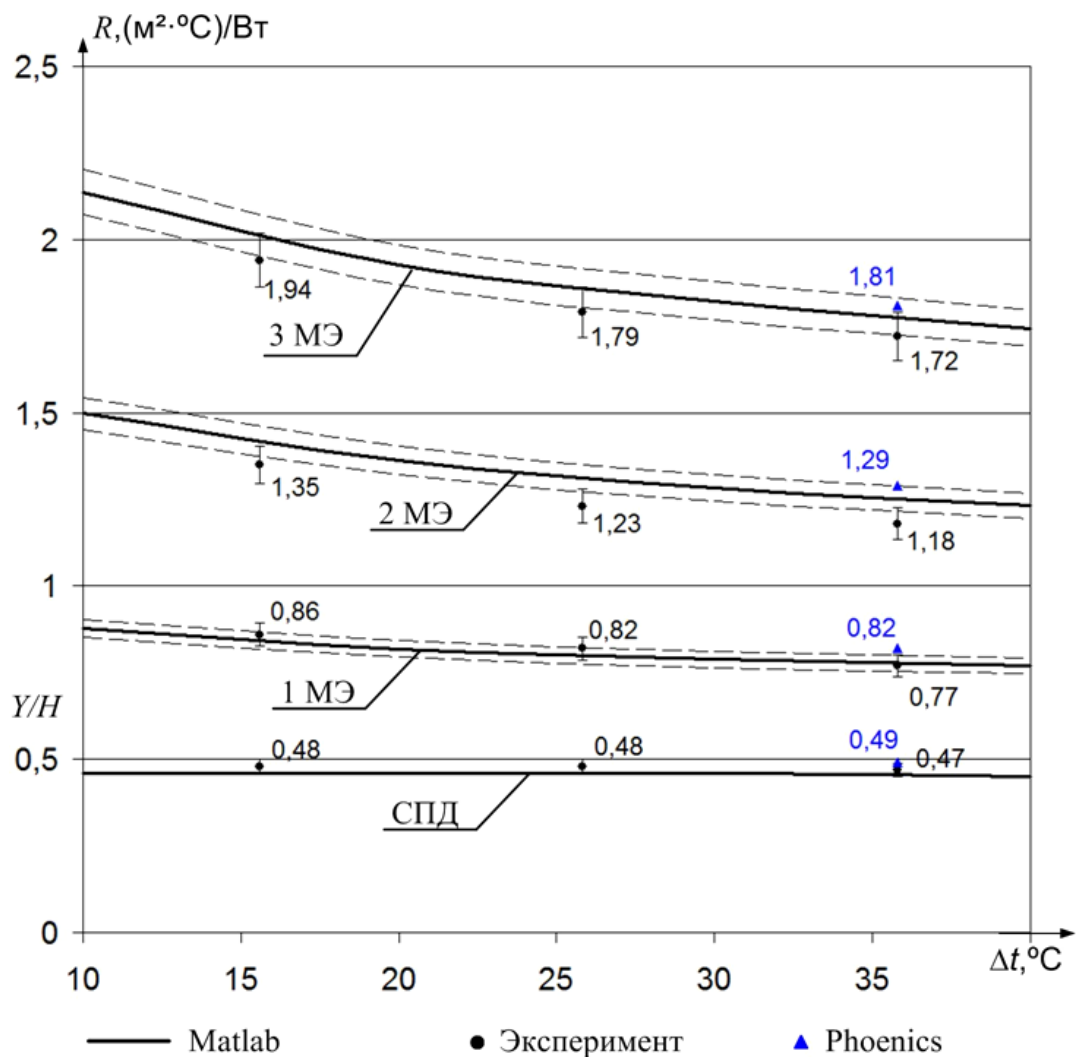


Рисунок 4.19 – Сопоставление экспериментальных и расчётных значений приведенного сопротивления теплопередаче центральной зоны стеклопакета 4М1-10-4М1-10-4М1 (СПД) при использовании различного количества металлических экранов (МЭ) в холодном (ХО) отделении камеры в зависимости от разности температур внутреннего и наружного воздуха для: СПД – только стеклопакет; 1 МЭ – СПД и 1 экран; 2 МЭ – СПД и 2 экрана; 3 МЭ – СПД и 3 экрана. Сплошная линия – результаты расчёта по эмпирическим формулам; штриховые линии – границы доверительного интервала, обусловленного относительной погрешностью математической модели в  $\pm 3\%$ ; точки - экспериментальные значения с указанием относительной приборной погрешности измерений в  $4\%$

В таблицах 4.7 и 4.8 представлены абсолютная и относительная погрешности расчета (по сравнению с экспериментальными данными) температуры на поверхности стекла  $\tau_{ст1}$ , удельного теплового потока  $q$  и приведенного сопротивления теплопередаче  $R$ , выполненного в ПВК Phoenix и Matlab, а также приведены максимальные и средние значения погрешности.

Таблица 4.7 – Погрешности расчета температуры на поверхности стекла  $\tau_{ст}$ , удельного теплового потока  $q$  и приведенного сопротивления теплопередаче стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 с металлическими экранами (МЭ) по высоте конструкции в ПБК Phoenix (по сравнению с экспериментальными данными)

Вариант	Точки	Температура				Удельный тепловой поток $q$		Прив. сопротивление теплопередаче	
		$\tau_{ст1}$		$\tau_{ст3}$		абсол. $\Delta q,$ Вт/м <sup>2</sup>	относит. $\delta q,$ %	абсол. $\Delta R_o,$ (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	относит. $\delta R_o,$ %
		абсол. $\Delta\tau_{ст1},$ °С	относит. $\delta\tau_{ст1},$ %	абсол. $\Delta\tau_{ст3},$ °С	относит. $\delta\tau_{ст3},$ %				
СПД	4 (14)	-0,8	2,2	2	5,6	-6,5	8,2	0,04	8,9
	3 (13)	-1	2,8	0,7	2	-3,1	4,1	0,02	4,3
	2 (12)	-0,9	2,5	1,3	3,6	-4,8	6,3	0,03	6,4
СПД + 1 МЭ	4 (14)	-0,7	2	0,6	1,7	-2,5	5,1	0,04	5,5
	3 (13)	-0,8	2,2	0,5	1,4	-2,8	6	0,05	6,5
	2 (12)	-1,0	1,7	0,8	2,2	-2,9	6,7	0,06	7,2
СПД + 2 МЭ	4 (14)	0,3	0,8	1,5	4,2	-2,4	7,4	0,09	8,2
	3 (13)	-0,2	0,6	0,9	2,5	-2,5	8,3	0,11	9,3
	2 (12)	-0,3	0,8	0,2	0,6	-1,2	4,4	0,06	4,6
СПД + 3 МЭ	4 (14)	0,6	1,7	1,6	4,5	-2,8	11,2	0,18	12,6
	3 (13)	0,3	0,8	0,8	2,2	-1	4,8	0,09	5,2
	2 (12)	0,2	0,6	0,6	1,7	-1,5	7,6	0,15	8,3
максимальная		1	2,8	2	5,6	6,5	11,2	0,18	12,6
средняя		0,6	1,6	1	2,7	2,8	6,7	0,08	7,3

Из анализа таблицы 4.7, описывающей достоверность результатов моделирования в ПБК Phoenix для трех точек, следует, что максимальная относительная погрешность расчета температуры составляет 5,6 %, при этом в среднем относительная погрешность не превышает 2,7 %. При определении относительной погрешности расчета удельного теплового потока максимальное значение составляет 11,2 %, среднее – 6,7 %. Для относительной погрешности расчета приведенно-

го сопротивления теплопередаче конструкции по 3 точкам наблюдается следующая картина: максимальная разность между данными эксперимента и результатами моделирования составляет 12,6 %, средняя – 7,3 %.

Таблица 4.8 – Погрешности расчета температуры на поверхности стекла  $\tau_{ст}$ , удельного теплового потока  $q$  и приведенного сопротивления теплопередаче стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 с металлическими экранами (МЭ) по высоте конструкции в ПМК Matlab (по сравнению с экспериментальными данными)

Вариант	Разность температуры $\Delta\tau$ , °С	Температура				Удельный тепловой поток $q$		Прив. сопротивление теплопередаче	
		$\tau_{ст1}$		$\tau_{ст3}$		абсол. $\Delta q$ , Вт/м <sup>2</sup>	относит. $\delta q$ , %	абсол. $\Delta R_o$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	относит. $\delta R_o$ , %
		абсол. $\Delta\tau_{ст1}$ , °С	относит. $\delta\tau_{ст1}$ , %	абсол. $\Delta\tau_{ст3}$ , °С	относит. $\delta\tau_{ст3}$ , %				
СПД	15,6	-0,3	1,9	-0,5	3,2	1,4	4,3	-0,02	4,2
	25,8	-0,5	1,9	-0,7	2,7	2,3	4,3	-0,02	4,2
	35,8	-1,4	3,9	-1,4	3,9	3,4	4,5	-0,02	4,3
СПД + 1 МЭ	15,6	-0,4	2,6	-0,5	3,2	0,7	3,9	-0,03	3,5
	25,8	-0,6	2,3	-0,8	3,1	1,6	5,1	-0,04	4,9
	35,8	-0,9	2,5	-0,8	2,2	1,2	2,6	-0,02	2,6
СПД + 2 МЭ	15,6	-0,2	1,3	0,3	1,9	-0,6	5,2	0,07	5,2
	25,8	-0,3	1,2	0,6	2,3	-1,5	7,1	0,09	7,3
	35,8	-0,6	1,7	0,3	0,8	-1,9	6,3	0,08	6,8
СПД + 3 МЭ	15,6	-0,2	1,3	0,6	3,8	-0,3	3,8	0,09	4,6
	25,8	-0,2	0,8	0,5	1,9	-0,7	4,9	0,09	5
	35,8	-0,4	1,1	0,3	0,8	-0,8	3,8	0,07	4,1
максимальная		1,4	3,9	1,4	3,9	3,4	7,1	0,09	7,3
средняя		0,5	1,9	0,6	2,5	1,4	4,7	0,05	4,7

Из анализа таблицы 4.8, описывающей достоверность результатов моделирования в ПМК Matlab процесса теплопередачи через СПД с различным количеством экранов при изменяемых температурных режимах эксплуатации, следует, что

максимальная относительная погрешность расчета температуры составляет 3,9 %, при этом в среднем относительная погрешность не превышает 2,5 %. При определении относительной погрешности расчета удельного теплового потока максимальное значение составляет 7,1 %, среднее – 4,7 %. Для относительной погрешности расчета приведенного сопротивления теплопередаче конструкции наблюдается следующая картина: максимальная разность между данными эксперимента и результатами моделирования составляет 7,3 %, средняя – 4,7 %.

Анализ таблиц 4.7 и 4.8, а также рисунка 4.19 показывает, что данные экспериментальных исследований по определению теплотехнических параметров стеклопакета с экранами совпадают с меньшей погрешностью с результатами расчета, выполненного в ПК Matlab.

В таблице 4.9 приведено сравнение абсолютной и относительной погрешностей приведенного сопротивления теплопередаче для расчета в ПК Matlab и Phoenix.

Таблица 4.9 – Погрешности расчета приведенного сопротивления теплопередаче центральной зоны стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 с металлическими экранами (МЭ) в ПК **Matlab** и **Phoenix** при разности температуры воздуха в теплом и холодном отделениях климатической камеры  $\Delta t = 35,8$  °С

Вариант	Значение приведенного сопротивления теплопередаче, рассчитанного в		Погрешности расчета	
	<b>Matlab</b>	<b>Phoenix</b>	абсолютная $\Delta R_o$ , ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт	относительная $\delta R_o$ , %
СПД	0,45	0,49	-0,04	8,9
СПД + 1 МЭ	0,75	0,82	-0,07	9,3
СПД + 2 МЭ	1,26	1,29	-0,03	2,4
СПД + 1 МЭ	1,79	1,81	-0,02	1,1
максимальная			0,07	9,3
средняя			0,04	5,4

Максимальная относительная погрешность расчёта сопротивления теплопередаче для стеклопакетов с экранами по сравнению с данными математического моделирования в ПК Matlab и Phoenix составила 9,3 %, средняя – 5,4 %.

Согласно информации, представленной в Приложении А ГОСТ 24866-99 «Стеклопакеты клееные строительного назначения. Технические условия» [30], справочное значение приведенного сопротивления теплопередаче для двухкамерного стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 составляет 0,49 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ). Следовательно, отличие приведенного сопротивления теплопередаче, рассчитанного в ПК Matlab ( $R = 0,46 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ), от справочных данных составило не более 6,1 %.

Анализ таблиц 4.5-4.9, а также рисунков 4.18-4.19 свидетельствует об удовлетворительном совпадении результатов расчета процесса теплопередачи через стеклопакет с теплоотражающими экранами в ПК Matlab и Phoenix с результатами экспериментальных исследований, что подтверждает возможность использования разработанной математической модели для определения теплотехнических характеристик данной ограждающей конструкции.

#### **4.4 Разработка инженерного метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции с теплоотражающими экранами в текущий момент времени на основе аппроксимации результатов математического моделирования**

Для оперативного (в текущий момент времени) определения тепловых потерь через светопрозрачные конструкции разной конфигурации при изменении температурных полей и гидродинамического режима движения внутреннего и наружного воздуха был разработан инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче стеклопакета с теплоотражающими экранами на основе аналитических выражений, полученных путем аппроксимации результатов численного моделирования в ПК Matlab. Данный метод позволяет определить приведенное сопротивление теплопередаче как для случая естественной, так и вынужденной конвекции у поверхности ограждающей конструкции, обращенной в по-

мещение. На основании результатов экспериментальных исследований (см. подраздел 3.5) и математического моделирования (см. подразделы 4.1 и 4.3) было определено, что сопротивление теплопередаче стеклопакета (с заданными физико-геометрическими параметрами) с теплоотражающими экранами не является постоянной величиной, на значение сопротивления  $R_0$  в значительной степени влияет разность температур (см. рисунок 4.19), а также скорости внутреннего и наружного воздуха.

Предлагаемый метод представляет из себя следующую последовательность действий:

1. В компьютерной "Программе для расчёта процесса теплопередачи для двухкамерного стеклопакета с металлическими теплоотражающими экранами" (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2016615250 от 19 мая 2016 г.)» (далее Программа), в которой была реализована разработанная математическая модель, задать конструкцию стеклопакета с теплоотражающими экранами с указанием порядка расположения, а также геометрических размеров и физических свойств стёкол, металлических экранов и прослоек.

2. В Программе провести вычислительный эксперимент по математическому моделированию процесса теплопередачи через данную ограждающую конструкцию при варьировании значений скорости движения внутреннего  $v_B$  и наружного  $v_H$  воздуха и перепада температур  $\Delta t$  между внутренней и наружной воздушными средами.

3. Получить массив значений  $R_0$  от  $\Delta t$ ,  $v_B$ ,  $v_H$  (для случая вынужденной конвекции у поверхности ограждающей конструкции, обращенной в помещение) или  $R_0$  от  $\Delta t$ ,  $v_H$  (для естественной конвекции).

4. Для случая естественной конвекции у внутренней поверхности окна ( $R_0$  от  $\Delta t$ ,  $v_H$ ) с помощью регрессионного анализа [163] найти значения коэффициентов для аппроксимирующей функции вида:

$$R_0(\Delta t, v_H) = c_1 + \frac{a_1}{\Delta t + b_1} + \frac{1}{\frac{a_2}{\Delta t + b_1} + c_2 + 7,34 \cdot v_H^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_H}}, \quad (4.28)$$

где  $a_1, b_1, c_1$  – коэффициенты аппроксимации. Коэффициенты аппроксимации можно получить при помощи стандартной процедуры "linfit" в ПВК Mathcad [164].

5. Для получения эмпирической формулы по определению приведенного сопротивления теплопередаче с учётом вынужденной внутренней конвекции выделить в формуле (4.28) условно постоянное значение сопротивления теплообмену на внутренней поверхности  $\overline{R_{e,e}}$ , а также коэффициентов теплоотдачи конвекцией  $\overline{\alpha_e^k}$  и излучением  $\overline{\alpha_e^l}$  (данное допущение об условном постоянстве  $R_{e,e}$  при использовании теплоотражающих экранов в окнах сделано на основе выполненного численного эксперимента; данное допущение вносит дополнительную погрешность в определение приведенного сопротивления теплопередаче  $R_0$  при вынужденной внутренней конвекции в пределах 0,5-1 %). Так, при установке двух экранов снаружи для значений перепада температур между внутренним воздухом и поверхностью стеклопакета в диапазоне от 2 до 8 °С коэффициент  $\overline{\alpha_e^l}$  изменяется в пределах от 4,0 до 3,9 Вт/(м<sup>2</sup>·°С),  $\overline{\alpha_e^k}$  – от 2,09 до 3,32 Вт/(м<sup>2</sup>·°С) [10].

6. Для учёта вынужденной конвекции у внутренней поверхности ограждающей конструкции преобразовать формулу (4.28) по определению  $R_0$  от  $\Delta t, v_n$  в следующую:

$$R_0(\Delta t, v_e, v_n) = c_1 + \frac{a_1}{\Delta t + b_1} + \frac{1}{\overline{\alpha_e^l} + 5,6 + 3,8 \cdot v_e} - \overline{R_{e,e}} + \frac{1}{\frac{a_2}{\Delta t + b_1} + c_2 + 7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}}, \quad (4.29)$$

$\overline{R_{e,e}}$  – усредненное сопротивление теплопередаче на внутренней поверхности конструкции (при естественной конвекции), (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;  $\overline{\alpha_e^l}$  – усредненный коэффициент теплоотдачи излучением на внутренней поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

7. Произвести проверку адекватности полученных эмпирических формул, сравнивая результаты вычислений  $R_0$  при изменении  $\Delta t$ ,  $v_B$ ,  $v_H$  с данными моделирования в Программе.

Было определено, что погрешность расчёта приведенного сопротивления теплопередаче центральной зоны стеклопакета по вышеуказанной методике в случае естественной конвекции с учётом принятых в математической модели допущений по значению коэффициента  $A$  в формулах (4.22÷4.25) и данных таблицы 4.2, составит  $\pm 2,5\%$  при заполнении прослоек воздухом,  $\pm 3,5\%$  при заполнении аргоном и криптоном. В случае вынужденной конвекции на внутренней поверхности окна погрешность увеличивается до  $\pm 4\%$  для конструкций с воздушными прослойками и до  $\pm 5\%$  – при использовании аргона и криптона.

На основе разработанного метода после обработки данных компьютерной Программы были получены эмпирические формулы для расчёта приведенного сопротивления теплопередаче некоторых типовых светопрозрачных конструкций с разным набором экранов. Изменение разности температур  $\Delta t$  задавалось в диапазоне от 10 до 60 °С (при температуре внутреннего воздуха  $t_B = 20$  °С), скорости  $v_H$  – от 1 до 5 м/с.

Так, для двухкамерного стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 и одного теплоотражающего экрана, установленного снаружи (со стороны окружающей среды) на расстоянии 10 мм, в случае естественной конвекции у внутренней поверхности приведенное сопротивление теплопередаче можно определить по формуле:

$$R_0(\Delta t, v_H) = 0,627 + \frac{3,83}{\Delta t + 10,9} + \frac{1}{7,34 \cdot v_H^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_H}}. \quad (4.30)$$

Для СПД с 2 теплоотражающими экранами (толщина прослойки между алюминиевыми листами в 10 мм)

$$R_0(\Delta t, v_H) = 0,889 + \frac{14,1}{\Delta t + 17,6} + \frac{1}{7,34 \cdot v_H^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_H}}. \quad (4.31)$$



Для СПД и 3 экранов снаружи, размещенных на расстоянии 10 мм друг от друга

$$R_0(\Delta t, v_n) = 1,21 + \frac{22,3}{\Delta t + 17,9} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}}. \quad (4.32)$$

Если в помещении работает рециркуляционный вентиляционный аппарат или приток в помещение осуществляется механической вентиляцией, то есть присутствует вынужденная конвекция у внутренней поверхности окна, данные формулы будут выглядеть следующим образом.

Для СПД и 1 экрана

$$R_0(\Delta t, v_{вн}, v_n) = 0,487 + \frac{1}{9,6 + 3,8 \cdot v_{вн}} + \frac{3,83}{\Delta t + 10,9} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}}. \quad (4.33)$$

Для СП и 2 экранов

$$R_0(\Delta t, v_{вн}, v_n) = 0,749 + \frac{1}{9,6 + 3,8 \cdot v_{вн}} + \frac{14,1}{\Delta t + 17,6} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}}. \quad (4.34)$$

Для СП и 3 экранов

$$R_0(\Delta t, v_{вн}, v_n) = 1,06 + \frac{1}{9,6 + 3,8 \cdot v_{вн}} + \frac{22,3}{\Delta t + 17,9} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}}. \quad (4.35)$$

На основе выведенных эмпирических зависимостей для СПД с теплоотражающими экранами в случае естественной конвекции внутри были построены графики зависимостей изменения  $R_0$  от  $\Delta t, v_n$  (см. рисунок 4.20).

На основании анализа рисунка 4.20 можно сделать вывод, что приведенное сопротивление теплопередаче в большей степени зависит от разности температур между внутренним и наружным воздухом, причём чем больше количество установленных экранов, тем более явно проявляется эта зависимость. Наибольшее сопротивление получаем при минимальной разности температур и минимальной скорости наружного воздуха. Таким образом, сопротивление теплопередаче для светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами является нелинейной зависимостью, так же как и удельные тепловые потери.

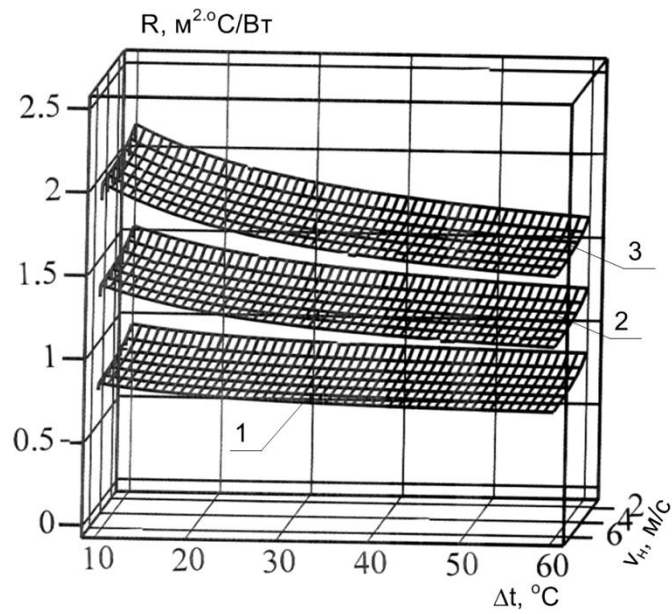


Рисунок 4.20 – Приведенное сопротивление теплопередаче СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 и установленных снаружи 1 – одного экрана; 2 – двух экранов; 3 – трёх экранов

Для наглядности выявленных закономерностей были также построены графики изменения приведенного сопротивления теплопередаче и удельного теплового потока в зависимости от разности температур и скорости наружного воздуха как только для СПД, так и для СПД с тремя экранами (см. рисунок 4.21).

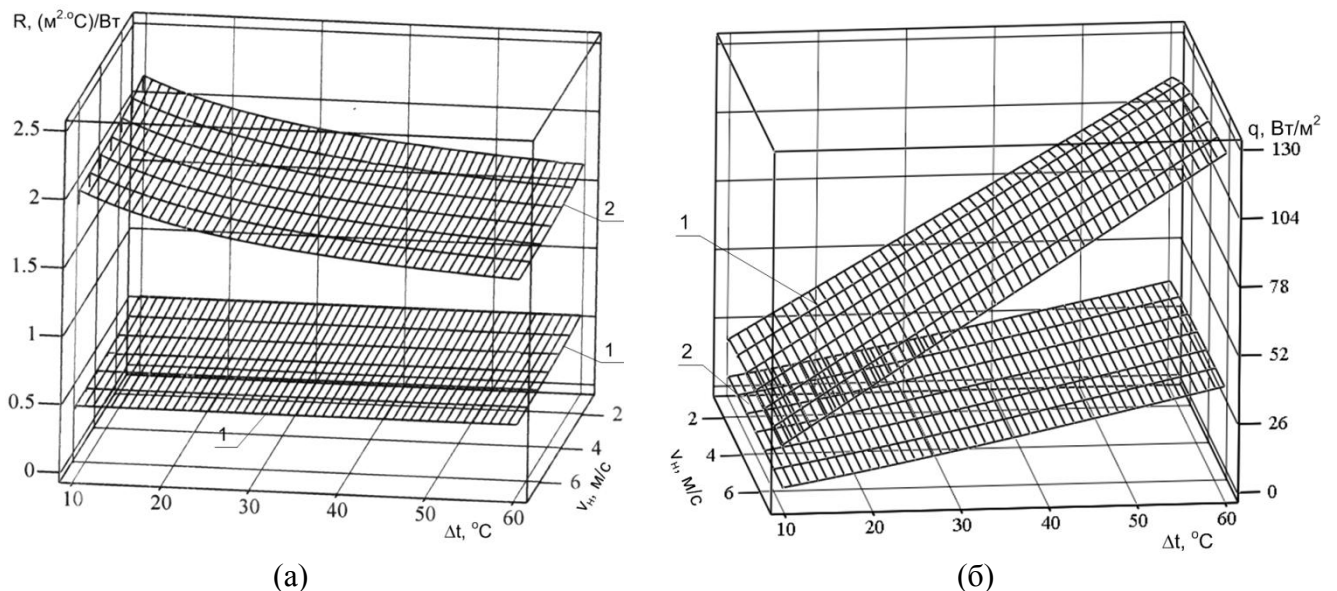


Рисунок 4.21 – Графики изменения приведенного сопротивления теплопередаче  $R_0$  (а) и удельных тепловых потерь  $q$  (б) светопрозрачной зоны окна при использовании СПД формулой 4М1-10-4М1-10-4М1 в случае естественной конвекции на внутренней стороне: 1 – без экранов (контроль); 2 – снаружи установлено 3 металлических экрана

#### **4.5 Разработка математической модели динамического микроклимата для зданий с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон**

В созданной математической модели динамического микроклимата для описания физических процессов и элементарных способов переноса теплоты в помещении были использованы следующие дифференциальные уравнения гидродинамики и теплообмена:

- уравнения движения или неизотермического течения вязкого газа в декартовых координатах (для ламинарного и турбулентного режима);
- уравнение неразрывности;
- уравнение переноса энергии за счет радиационного и конвективного теплообмена в прямоугольных декартовых координатах;
- уравнение переноса энергии в твердом теле.

При разработке математической модели микроклимата необходимо решать сопряжённую задачу тепло– и массообмена в системе «обрабатываемый объект – ограждающие конструкции помещений здания – воздушная среда внутри и снаружи здания».

При записи дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения:

- а) диффузионный перенос воздуха через твердые элементы ограждающих конструкций отсутствует;
- б) приток воздуха в помещение осуществляется через воздухо-распределительные устройства, удаление – через вытяжные решетки;
- в) инверсия воздушного потока в приточных и вытяжных отверстиях отсутствует;
- г) светопрозрачные конструкции с теплоотражающими экранами рассматриваются как безинерционные элементы;
- д) скорость приточного воздуха в рабочее время не изменяется;

е) поверхности оборудования и ограждающих конструкций гладкие и жесткие;

ж) скорость воздуха на поверхности оборудования и ограждающих конструкций равна нулю;

з) теплофизические свойства воздуха в помещении и материалов ограждающих конструкций не зависят от влажности;

и) воздух, поступающий из приточных отверстий, имеет одинаковую скорость и температуру, независимо от тепловых и гидравлических потерь в воздуховодах;

к) воздух в помещении несжимаемый и прозрачный;

л) степень черноты поверхностей не зависит от температуры.

#### 4.5.1 Математическое моделирование тепломассопереноса в помещении

На основании принятых допущений математическая модель тепломассообмена в помещении при создании микроклимата будет описана следующими уравнениями.

Уравнение неизотермического **турбулентного движения** несжимаемого вязкого газа (Навье-Стокса) в прямоугольных декартовых координатах имеет вид [2, 68]:

$$\rho \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial \tau} + \rho \cdot \vec{u} \cdot (\nabla \vec{u}) = -\nabla p + \mu_t \cdot \nabla^2 \vec{u} + \rho \cdot g, \quad (4.36)$$

где  $\vec{u}$  – векторное поле скоростей движения воздуха, м/с;

$\nabla$  – оператор набла, компоненты которого являются частными производными по координатам  $x, y, z$ ;

$\tau$  – время, с;

$\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_t$  – коэффициент динамической турбулентной вязкости, Па·с ;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Анализ литературных источников [1, 42, 93, 115,] показал, что для расчета процессов, связанных с течением газа в больших помещениях,  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности является наиболее приемлемой моделью, так как она не требует значительных вычислительных ресурсов и показывает хорошую точность при расчете процессов конвективного теплообмена в помещениях.

Коэффициент динамической турбулентной вязкости находится из уравнений принятой  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности:

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4.37)$$

где  $C_\mu$  – модельный коэффициент,  $C_\mu = 0,09$  [178, 179];

$k$  – кинетическая энергия турбулентности;

$\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии.

Кинетическая энергия турбулентности  $k$ , входящая в уравнение (4.37), находится из уравнения переноса кинетической энергии турбулентности (4.38), основанного на предположении Буссинеска [1]: турбулентные напряжения, как и обычные напряжения трения пропорциональны градиенту скорости:

$$\rho \cdot \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \cdot \nabla \vec{u} \cdot k = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + P_b - \rho \cdot \varepsilon \quad (4.38)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической молекулярной вязкости, Па·с;  $\sigma_k$  – константа, для моделей турбулентности, базирующихся на двух дифференциальных уравнениях,  $\sigma_k = 1,3$  [179];

$P_k$  – источник турбулентной кинетической энергии определяется по формуле:

$$P_k = \mu_t \cdot (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}_t). \quad (4.39)$$

$P_b$  – источник турбулентной кинетической энергии, возникающей за счет воздействия на поток гравитационной силы, которая учитывается при наличии в расчетной области гравитации и ненулевого градиента температуры определяется по формуле [93]:

$$P_b = -g \cdot \frac{\nu_t}{Pr_t} \nabla \rho, \quad (4.40)$$

где  $\nu_t$  – кинематический коэффициент турбулентной вязкости газовой смеси, м<sup>2</sup>/с:

$$\nu_t = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4.41)$$

$Pr_t$  – турбулентное число Прандтля,  $Pr_t = 1$  [93].

Уравнение для определения скорости диссипации турбулентной энергии [182]:

$$\rho \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \cdot \nabla(\vec{u}\varepsilon) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot (P_k - C_{\varepsilon 3} \cdot P_b) - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4.42)$$

где  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $C_{\varepsilon 3}$  – модельные коэффициенты, причем  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $C_{\varepsilon 3} = 1,2$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,0$ .

Уравнение **неизотермического ламинарного движения** несжимаемого вязкого газа аналогично уравнению (4.36). Так как режим течения ламинарный, то слагаемых, характеризующих турбулентность, нет.

$$\rho \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial \tau} + \rho \cdot \vec{u} \cdot (\nabla \vec{u}) = -\nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{u} + \rho \cdot g, \quad (4.43)$$

Уравнение **переноса энергии** фактически представляет собой закон сохранения тепла, записанный для элементарного объёма.

Уравнение **сохранения энергии** в прямоугольных декартовых координатах имеет вид [176, 178]:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho \cdot c_p \cdot \left( u_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda_{eff} \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_v \quad (4.44)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·К);

$T$  – температура, К;

$u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  – соответственно, скорости в x, y, z-направлении, м/с;

x, y, z – декартовые координаты различных точек расчетной области, м;

$\lambda_{eff}$  – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$Q_v$  – источниковый член уравнения, характеризующий действие источников теплоты внутри расчетной области, Вт/м<sup>3</sup>.

Решая уравнение (4.44) находят трехмерное нестационарное температурное поле  $T(x,y,z,t)$ , т.е совокупность значений температур во всех точках данной расчетной области и во времени.

Первый член в левой части уравнения (4.44) учитывает нестационарность процесса и характеризует изменение температуры во времени. Второе слагаемое характеризует конвекцию, возникающую из-за наличия перемещения потоков флюида в расчетной области (перемещения макрообъемов среды).

Слагаемое  $\lambda_{eff} \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$  отражает перенос энергии теплопроводностью (кондукцией) или диффузией (проникновение одного вещества в другое).

Объемная выработка тепла  $Q$  представляет собой изменение энергии расчетной области за счет действия объемных источников тепла. Данное слагаемое можно не учитывать, если количество источников тепловыделений мало и перенос энергии происходит в основном за счёт теплопроводности и конвекции.

Для принятой  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности эффективный коэффициент теплопроводности рассчитывают по формулам [93]:

$$\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t; \quad (4.45)$$

$$\lambda_t = \frac{c_p \cdot \rho \cdot \nu_t}{Pr_t}, \quad (4.46)$$

где  $\lambda$  и  $\lambda_t$  – физический и турбулентный коэффициент теплопроводности газовой смеси, Вт/(м·К).

Уравнение **неразрывности** учитывает изменение плотности газа:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla(\rho \cdot \vec{u}) = 0. \quad (4.47)$$

Согласно уравнению неразрывности массовый расход газа через любое сечение газового потока постоянен.

Температурное поле в твердых элементах многослойных непрозрачных ограждающих конструкций при нестационарных процессах описывается дифференциальным уравнением переноса энергии для твердого тела [12, 139]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (4.48)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

$$a = \frac{\lambda_{огр}}{c_{огр} \cdot \rho_{огр}}, \quad (4.49)$$

где  $\lambda_{огр}, c_{огр}, \rho_{огр}$  – соответственно коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , удельная массовая теплоёмкость,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  и плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$  каждого слоя ограждающей конструкции.

Учет **лучистого теплообмена** в помещении производят путем включения в математическую модель дифференциального уравнения вида [65, 93]:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (A + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = A \cdot n^2 \cdot \frac{\sigma_o \cdot T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \cdot \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}' \cdot \vec{s}) d\Omega', \quad (4.50)$$

где  $\vec{r}$  – радиус-вектор;

$\vec{s}$  – единичный вектор в направлении рассеяния;

$\vec{s}'$  – единичный вектор в направлении падающего излучения;

$A$  – коэффициент поглощения;

$n$  – показатель преломления среды;

$\sigma_s$  – коэффициент рассеяния;

$\sigma_o$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;

$I$  – яркость излучения в данной точке ( $\vec{r}$ ) в данном направлении ( $\vec{s}$ ),  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$ ;

$T$  – локальная температура,  $\text{К}$ ;

$\Phi$  – фазовая функция;

$\Omega$  – телесный угол,  $\text{ср}$ .



Плотность потока энергии излучения можно определить по формуле

$$E(\vec{r}) = \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega. \quad (4.51)$$

При учете радиационного теплообмена уравнение сохранения энергии (4.44) должно быть дополнено источниковым членом  $q_w$ :

$$q_w = A(E_o(r) - E(r)), \quad (4.52)$$

где  $E_o$  – плотность потока излучения абсолютно чёрного тела (далее АЧТ).

При радиационном теплообмене в помещении показатель преломления среды (воздуха)  $n=1$ , а фазовая функция, учитывающая анизотропное рассеивание,  $\Phi(\vec{s}' \cdot \vec{s}) = 1$ . Поверхности ограждений помещения и размещенного в нем оборудования приняты диффузионными серыми телами. Следовательно, уравнение (4.50) можно записать в виде:

$$\frac{\partial I(\vec{r}, \vec{s})}{\partial s} + (A + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = A \cdot \frac{\sigma_o \cdot T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \cdot \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') d\Omega'. \quad (4.53)$$

При реализации математической модели микроклимата в помещении в качестве метода расчета радиационного теплопереноса принят метод дискретных ординат (Discrete Ordinats (DO)) [55, 185].

При реализации DO-метода было учтено [93], что:

– падающее на поверхность радиационное излучение равно

$$q_{пад} = \int_{\vec{s} \cdot \vec{n} > 0} I_{пад} \cdot \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega; \quad (4.54)$$

– максимальное значение интенсивности излучения для всех направлений излучения  $\vec{s}$  для АЧТ равно

$$I_o = \frac{q_{эфф}}{\pi}; \quad (4.55)$$

– собственное излучение поверхности стены равно

$$q_{соб} = \varepsilon_w \cdot \sigma_o \cdot T_w^4; \quad (4.56)$$

– плотность отраженного лучистого теплового потока можно найти как

$$q_{\text{отр}} = (1 - \varepsilon_w) \cdot q_{\text{над}}; \quad (4.57)$$

– плотность лучистого теплового потока, поглощенного твердой поверхностью

$$q_{\text{погл}} = \varepsilon_w \cdot q_{\text{над}}, \quad (4.58)$$

где  $q_{\text{над}}$  – плотность лучистого теплового потока, падающего на поверхность, Вт/м<sup>2</sup>;

$T_w$  – температура поверхности, К.

Уходящий с поверхности и результирующий радиационные тепловые потоки рассчитываются с учетом формул (4.54-4.58) по выражениям

$$q_{\text{эфф}} = q_{\text{отр}} + E_w = (1 - \varepsilon_w) \cdot q_{\text{над}} + \varepsilon_w \cdot \sigma_o \cdot T_w^4; \quad (4.59)$$

$$q_{\text{рез}} = q_{\text{погл}} - q_{\text{соб}} = q_{\text{над}} - q_{\text{эфф}}. \quad (4.60)$$

#### 4.5.2 Граничные и начальные условия математической модели

Для решения уравнений (4.36)-(4.60) были заданы граничные условия (далее ГУ), предполагающие сопряжение по тепловым потокам и температурам. Схема граничных условия представлена на рисунке 4.22, в котором приведен пример установки экранов в окна (позиция 3) производственного помещения текстильного предприятия, на котором поддержание необходимых параметров динамического микроклимата осуществляется с помощью системы кондиционирования. В данной системе кондиционирования реализуются такие энергосберегающие мероприятия, как рециркуляция внутреннего воздуха, утилизация теплоты удаляемого воздуха с помощью рекуператора.

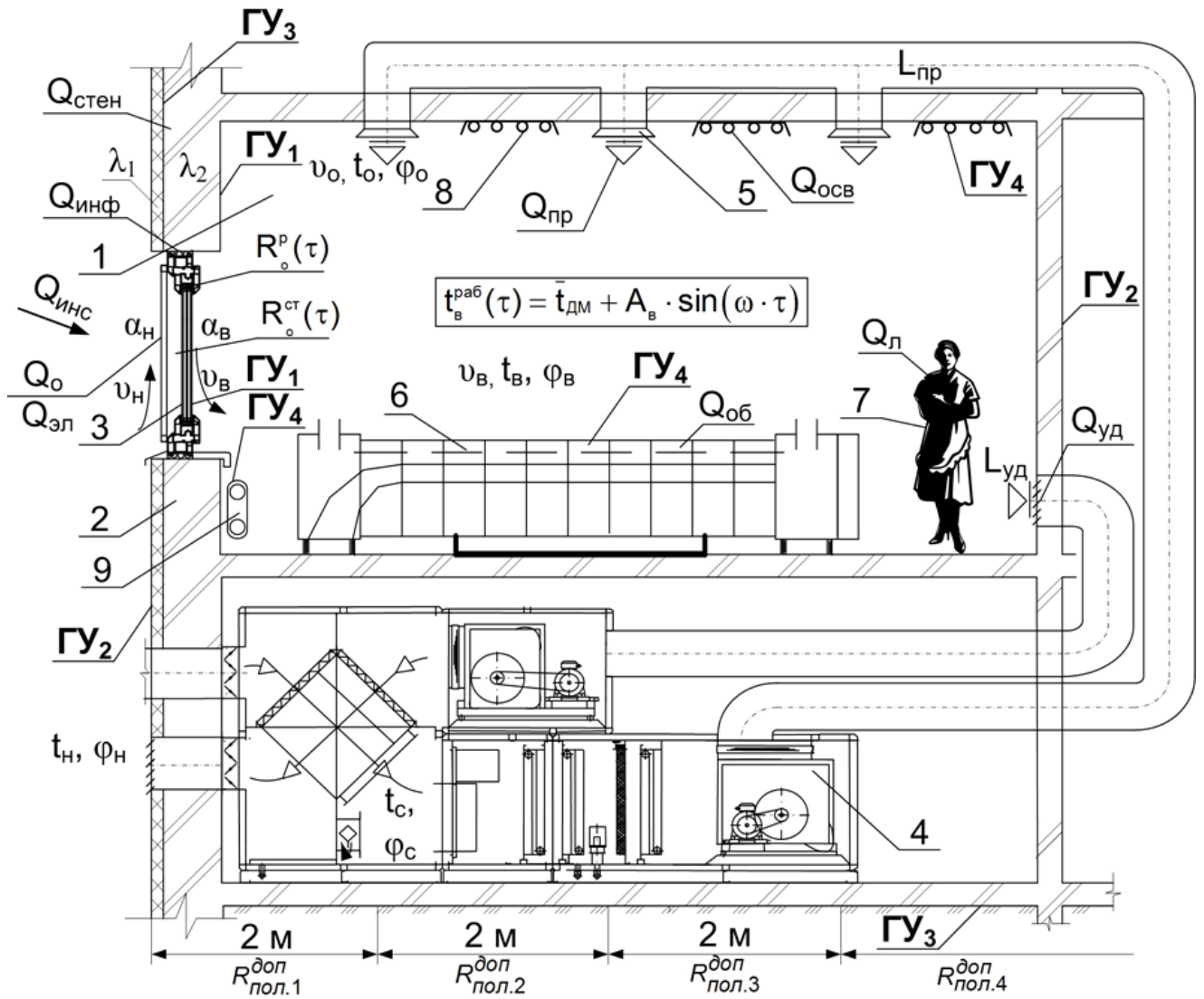


Рисунок 4.22 – Схема граничных условий, а также теплотерьер и тепловыделений для математической модели динамического микроклимата для зданий с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон: 1 – производственное помещение; 2 – стена; 3 – окно с теплоотражающими экранами; 4 – кондиционер; 5 - воздухораспределитель; 6 – текстильное оборудование; 7 – персонал; 8 – осветительные приборы; 9 – отопительный прибор

Граничные условия третьего рода для решения сопряженной задачи теплообмена, описывающие процесс теплоотдачи от воздуха в помещении к внутренней поверхности стен, а также от нагретых поверхностей (отопительные приборы, трубопроводы и т.д.)  $\Gamma У_1$  к воздуху имеют вид

$$\pm \lambda_w \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) = \alpha_g \cdot (T_w(\tau) - T_g(\tau)), \quad (4.61)$$

где  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности слоя ограждающей конструкции, обращенного в сторону помещения, Вт/(м·К);

$\alpha_g$  – коэффициент теплоотдачи у поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), принимаемый согласно рекомендаций [50];

$T_w(\tau)$ ,  $T_g(\tau)$  – температура твердой поверхности и воздуха в помещении, соответственно, в момент времени  $\tau$ , °С.

Для решения уравнения переноса лучистой энергии (4.53) кроме температуры поверхностей задается их интегральная степень черноты по справочным данным [12, 104].

Для слоя ограждающей конструкции, контактирующего с наружным воздухом, граничные условия ГУ<sub>2</sub> будут соответствовать граничным условиям третьего рода, которые характеризуют конвективно–лучистый теплообмен с окружающей средой и состоят в задании количества теплоты, передаваемого с единицы поверхности стенки в окружающую среду или в обратном направлении при заданном законе изменения температуры воздуха и его подвижности.

$$\frac{\delta T}{\delta n} = \frac{\alpha_n}{\lambda_0} \cdot (T_n(\tau) - T_{нов}(\tau)) + \frac{J_{инс}(\tau) \cdot \rho_{солн} \cdot r_{обл}}{\lambda_0}, \quad (4.62)$$

где  $\rho_{солн}$  – коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности ограждающей конструкции, принимаемый по [50];

$T_n(\tau)$ ,  $T_{нов}(\tau)$  – температура наружного воздуха и наружной поверхности ограждающей поверхности, соответственно, в момент времени  $\tau$ , °С;

$r_{обл}$  – коэффициент снижения солнечного потока от облачности;

$\alpha_n$  – коэффициент теплообмена на наружной поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Его значения для различных периодов года даны в [8]. Для холодного периода  $\alpha_n = 23$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Для тёплого:

$$\alpha_n = 1,16 \cdot (5 + 10\sqrt{v}), \quad (4.63)$$

$v$  – минимальная из средних скоростей ветра по румбам за июль, м/с, принимаемая согласно СП 131.13330.2020 [123], но не менее 1 м/с.

$J_{инс}(\tau)$  – для стен, для покрытий – интенсивность потока солнечной радиации (прямой и рассеянной), падающей в момент времени  $\tau$  на поверхность при безоблачном небе, Вт/м<sup>2</sup>;

$\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Граничные условия в плоскости контакта слоёв стен и покрытия, а также внешнего слоя пола с грунтом ГУ<sub>3</sub> соответствуют граничным условиям четвёртого рода. Эти условия описывают теплообмен между двумя соприкасающимися слоями ограждающей конструкции. Температуры слоёв в точке соприкосновения равны и в точке соприкосновения через слои ограждения проходит один и тот же поток теплоты [20]

$$\lambda_{сл.k} \cdot \frac{\partial T_{сл.k}}{\partial n_{сл.k}} = \lambda_{сл.k+1} \cdot \frac{\partial T_{сл.k+1}}{\partial n_{сл.k+1}}, \quad (4.64)$$

где  $k$  – номер слоя в ограждающей конструкции.

Для применения дифференциальных уравнений (4.61) и (4.62) для светопрозрачных ограждающих конструкций при / без использования теплоотражающих экранов была введена эквивалентная теплопроводность, учитывающая толщину светопрозрачной конструкции  $\delta_0^{св}$ , м, и текущее приведенное сопротивление теплопередаче отдельно светопрозрачной или непрозрачной части данной ограждающей конструкции.

Так, выражение для определения эквивалентной теплопроводности для светопрозрачной части конструкции имеет вид

$$\lambda_0^{см}(\tau) = \frac{\delta_0^{св}}{R_o^{см}(\tau) - \alpha_в - \alpha_н}, \quad (4.65)$$

где  $R_o^{см}(\tau) = f(\text{конструкция } (\tau), T_в(\tau) - T_н(\tau), v_в, v_н)$  – приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной части окна, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, в текущий момент времени  $\tau$ , в зависимости от его конструкции (в том числе отсутствие или наличие теплоотражающих экранов), разности температур между внутренним  $T_в(\tau)$  и наружным  $T_н(\tau)$  воздухом, а также скоростей внутреннего  $v_в$  и наружного  $v_н$  воздуха.

Эквивалентная теплопроводность для непрозрачной части конструкции определяется аналогично и равна

$$\lambda_0^p(\tau) = \frac{\delta_0^{cg}}{R_o^p(\tau) - \alpha_e - \alpha_n}, \quad (4.66)$$

где  $R_o^p(\tau) = f(\text{конструкция } (\tau), T_e(\tau) - T_n(\tau), v_e, v_n)$  – приведенное сопротивление теплопередаче непрозрачной части окна в текущий момент времени  $\tau$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт).

Коэффициент теплоотдачи с наружной стороны  $\alpha_n$  светопрозрачной конструкции необходимо определить по формуле Франка (4.3).

Информация о приведенном сопротивлении светопрозрачной части приведена в подразделе 4.4, непрозрачной части – в подразделе 5.1; выражения для нахождения  $\alpha_e$  представлены в подразделе 5.1.

При расчете теплопередачи через пол, последний разбивают на 4 расчётные зоны [63], причем ширина каждой зоны составляет 2 м (см. рисунок 4.22). К сопротивлению теплопередаче слоёв пола добавляется величина  $R_{пол.i}^{don}$ , которая зависит от номера зоны. Для зоны №1 – 2,1 Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ), зоны №2 – 4,2 Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ), зоны №3 – 8,6 Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ), зоны №4 – 14,2 Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ). Следовательно, для применения дифференциальных уравнений (4.61) и (4.64) для каждой зоны пола необходимо ввести дополнительную эквивалентную теплопроводность, учитывающую дополнительное термическое сопротивление пола  $R_{пол.i}^{don}$ .

Выражение для определения дополнительной эквивалентной теплопроводности для  $i$ -той зоны пола имеет вид

$$\lambda_{пол.i}^{don} = \frac{\delta_{пол}^{don}}{R_{пол.i}^{don}}, \quad (4.67)$$

где  $\delta_{пол}^{don}$  – принятая толщина слоя, введенного для задания дополнительного сопротивления, м.

Аналогичным образом, можно внести в математическую модель эквивалентные теплопроводности для таких элементов непрозрачных ограждающих конструкций, как воздушные прослойки в вентилируемых фасадах зданий, подполье, чердачные объемы зданий и т.д.

Граничные условия ГУ<sub>4</sub> для описания сопряженного теплообмена воздуха с оборудованием, имеющим внутренний источник тепловой энергии, например такое электрооборудование как осветительные приборы, электродвигатели, станки, компьютеры и т.д., соответствуют граничным условиям третьего рода:

$$q(\tau) = \alpha_{об} \cdot (T_{нос}(\tau) - T_г(\tau)), \quad (4.68)$$

где  $q(\tau)$  – текущие удельные тепловыделения от оборудования, Вт/м<sup>2</sup>, приведенные к площади его поверхности;

$T_г(\tau), T_{нос}(\tau)$  – температура внутреннего воздуха и поверхности оборудования, соответственно, в момент времени  $\tau$ , °С.

Скорость воздушного потока на непроницаемых твердых границах помещения равна нулю:  $v_w = 0$  м/с.

На границах помещения [93], являющихся воздухопроницаемыми поверхностями (воздухораспределители, вытяжные отверстия, окна, двери и т.д.), скорость воздушного потока  $v$  рассчитывается, исходя из известного значения воздухообмена (см. подраздел 4.5.3)  $L$ , м<sup>3</sup>/с, и площади воздухопроницаемых элементов ограждающих конструкций  $A$ , м<sup>2</sup>, через которые осуществляется приток / отток воздуха

$$v = \frac{L}{A}. \quad (4.69)$$

В течение рабочей смены скорость приточного  $v_{np}$  и вытяжного  $v_{yd}$  воздуха принимается постоянной. В нерабочее время теплого периода года система кондиционирования воздуха выключается, следовательно,  $v_{np} = 0$  м/с,  $v_{yd} = 0$  м/с. В нерабочее время холодного периода года в модели предусмотрены следующие режимы работы системы кондиционирования:

- а) обеспечивается тот же самый воздухообмен, что и в рабочее время;
- б) прекращается подача приточного и удаление вытяжного воздуха путем выключения соответствующих вентиляторов (перевод в дежурный режим отопления,  $v_{np} = 0$  м/с,  $v_{yd} = 0$  м/с) до момента времени, пока не будет достигнута минимально-допустимая температура внутреннего воздуха  $t_{min}$ , или, согласно графику, до момента времени, необходимого для выведения метеорологических парамет-

ров внутреннего воздуха до значений, требуемых в рабочую смену; при достижении данных условий СКВ запускается снова в работу и обеспечивается «прогрев» внутреннего пространства помещения.

Температуру на воздухопроницаемых границах задавали следующим образом:

а)  $T = T_{np}$  – на границе входа воздуха в помещение (в плоскости выходного сечения воздухораспределителя) температура потока равна температуре приточного воздуха;

б)  $T = T_{yd}$  – на границе удаления воздуха из помещения (в плоскости входного сечения вытяжной решетки) температура потока равна температуре вытяжного воздуха.

Порядок определения температур приточного и вытяжного воздуха будет рассмотрен в подразделе 4.5.3.

Изменения температуры внутреннего воздуха определяется расчётом параметров динамического микроклимата, с учётом требований технологического процесса и уровня энергосбережения [20]. Динамический микроклимат (ДМ) **в рабочее время** задавался путем изменения текущей температуры внутреннего воздуха  $t_g(\tau)$  с помощью гармонической функции

$$t_g(\tau) = \bar{t}_{DM} + A_g \cdot \sin(\omega \cdot \tau), \quad (4.70)$$

где  $\bar{t}_{DM}$  – средняя температура колебаний воздуха при ДМ, °С;

$A_g$  – амплитуда колебаний температуры внутреннего воздуха, °С;

$\omega$  – частота колебания температур, 1/ч.

Среднюю температуру колебаний воздуха при ДМ  $\bar{t}_{DM}$  можно определить [200] по формуле

$$\bar{t}_{DM} = \bar{t}_{opt} + (0,2 \div 0,5) \cdot \Delta t_b, \quad (4.71)$$

где  $\Delta t_b$  – отклонение средневзвешенной температуры воздуха от средних оптимальных значений, °С;

$\bar{t}_{opt}$  – оптимальная температура при стабильных параметрах, °С.



Частоту колебаний температур  $\omega$  и амплитуду  $A_0$  описываются следующими выражениями:

$$A_0 = \frac{\Delta t_0}{2}, \quad (4.72)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{Z}, \quad (4.73)$$

где  $Z$  – период колебаний, ч.

**В нерабочее время** пропадает необходимость поддерживать динамические параметры температуры воздуха. В этот период времени наиболее целесообразно максимально сократить затраты ТЭР на поддержание параметров микроклимата путем перевода работы климатической техники в дежурный режим отопления. Это осуществляется путем временного отключения от работы системы кондиционирования воздуха.

Температура наружного воздуха описывается функцией колебаний  $T_n = f(\tau, \text{месторасположение})$ , учитывающей месторасположение объекта моделирования, а также изменение климатических условий в течение суток отдельно для каждого календарного месяца, на основании данных СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» [123]. Температура воздуха в соседних помещениях принимается исходя из принятых проектных решений, а также требований нормативной литературы [26, 32, 108, 130].

Значения скорости наружного воздуха  $v_n$  задается на основании данных СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» [123], график изменения интенсивности потока солнечной радиации (прямой и рассеянной)  $J_{инс}(\tau)$ , падающей на поверхность при безоблачном небе, – на основании [85, 123].

### 4.5.3 Описание тепловых потоков в помещении

Разработанная математическая модель учитывает тепловые потоки через заполнение светового проёма  $Q_o$ ; тепловые потоки, проходящие через многослойные стены  $Q_{стен}$ , пол  $Q_{пол}$ , покрытие  $Q_{покp}$ ; потоки теплоты, вносимые и уно-

симые инфильтрационным  $Q_{инф}$ , приточным  $Q_{пр}$  и удаляемым воздухом  $Q_{уд}$ ; тепловые потоки от работающего и неработающего оборудования  $Q_{об}$ ; тепловые потоки от освещения  $Q_{осв}$  и от людей  $Q_{л}$ , от вносимых в помещение нагретых (охлаждённых) предметов  $Q_{предм}$ , от солнечного излучения  $Q_{инс}$  (см. рисунок 4.22).

Тепловой баланс в помещении в любой момент времени  $\tau$  можно записать в виде следующего уравнения:

$$Q_o(\tau) + Q_{стен}(\tau) + Q_{пол}(\tau) + Q_{покр}(\tau) + Q_{инф}(\tau) + Q_{об}(\tau) + Q_{осв}(\tau) + Q_{л}(\tau) + Q_{предм}(\tau) + Q_{инс}(\tau) + Q_{уд}(\tau) + Q_{пр}(\tau) = 0. \quad (4.74)$$

В разработанной математической модели микроклимата трансмиссионные тепловые потоки, проходящие через ограждающие конструкции здания ( $Q_o$ ,  $Q_{стен}$ ,  $Q_{пол}$ ,  $Q_{покр}$ ), определяются на основе решения вышеприведенных дифференциальных уравнений при заданных граничных условиях. Исходными данными в данном случае являются свойства материала и конфигурация ограждающих конструкций здания, законы изменения параметров микроклимата в помещении и информация об изменении параметров наружного воздуха (температуры, скорости ветра и его направленности, интенсивности солнечного излучения) [20].

Тепловыделения от освещения, оборудования задаются с учетом применения граничных условий ГУ<sub>4</sub> на основе паспортной тепловой мощности, графика использования, а также конфигурации и места расположения. Тепловая мощность учтена в виде удельного теплового потока, отнесенного к площади поверхности оборудования  $A_{об}$ ,

$$q_{об}(\tau) = \frac{Q_{об}(\tau)}{A_{об}}, \quad (4.75)$$

$$q_{осв}(\tau) = \frac{Q_{осв}(\tau)}{A_{осв}}. \quad (4.76)$$

Потоки теплоты, вносимые инфильтрационным воздухом  $Q_{инф}$ , от людей  $Q_{л}$ , от вносимых в помещение нагретых (охлаждённых) предметов  $Q_{предм}$ , от сол-

нечного излучения  $Q_{\text{инс}}$  задаются в виде тепловыделений в объеме расчетной области  $V$ , то есть

$$Q_{V_i}(\tau) = \frac{Q_i(\tau)}{V}, \quad (4.77)$$

где  $Q_i(\tau)$  – соответствующие тепловые потоки в определенный момент времени  $\tau$ , Вт.  $Q_{V_i}(\tau)$  в формуле (4.44) учтен в виде источникового члена уравнения сохранения энергии, Вт/м<sup>3</sup>.

Потоки теплоты, вносимые приточным  $Q_{np}$  и уносимые удаляемым воздухом  $Q_{yd}$ , в уравнении сохранения энергии (4.44) также являются источниковым членом, но определяются исходя соответствующих энтальпий и расходов воздуха.

Методика определения вышеуказанных тепловых потоков подробно рассмотрена в нормативной [120, 130], учебной [8, 96, 116, 151] и научной [19, 20, 135, 153] литературе. В рамках данного диссертационного исследования особое внимание уделено лишь некоторым теплопотерям и теплопоступлениям.

Тепловой поток, вносимый приточным воздухом, Вт, можно определить следующим образом [20]:

$$Q_{np} = L_{np} \cdot h_{np}(\tau) \quad (4.78)$$

где  $L_{np}$  – расход приточного воздуха, кг/с. Определяется путём составления уравнения теплового баланса (4.69) при стационарных условиях для расчётных параметров наружного воздуха по условиям тёплого и холодного периодов, учета значений балансов по вредностям (теплота, влага, газо- и паровыделения, выделения пыли), нормативных требований, а также построения процессов в  $h$ - $d$  диаграмме [96].

$h_{np}(\tau)$  – энтальпия приточного воздуха, кДж/кг;

$$h_{np}(\tau) = c_a \cdot t_{np}(\tau) + x_{np}(\tau) \cdot (r + c_{en} \cdot t_{np}(\tau)), \quad (4.79)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования при 0 °С,  $r=2500$  кДж/кг [183];

$c_{en}$  – изобарная удельная теплоемкость водяного пара  $c_{en} = 1,9$  кДж/(кг·К) [12];

$x_{np}(\tau)$  – влагосодержание приточного воздуха, кг/кг;

$c_e$  – изобарная удельная теплоёмкость сухого воздуха,  $c_e = 1$  кДж/(кг·К);

$t_{np}(\tau)$  – температура приточного воздуха. Ёе значение ограничено условиями комфортности [96, 116] и определяется исходя из максимально возможного перепада температур приточного воздуха и воздуха на входе в рабочую зону

$$\Delta t_{0\max} = \Delta t_x \cdot \frac{x}{n \cdot \sqrt{A_0}}, \quad (4.80)$$

где  $\Delta t_x$  – допустимый перепад температур воздуха в рабочей зоне и приточного воздуха на входе в рабочую зону для допустимых условий,  $\Delta t_x = 2$  °С [26];

$n$  – коэффициент затухания температуры [154];

$x$  – расстояние от отверстия воздухораспределителя до рабочей зоны, м;

$A_0$  – площадь отверстия плафона, м<sup>2</sup>.

Температура приточного воздуха можно определить, зная температуру внутреннего воздуха

$$t_{np}(\tau) = t_e(\tau) \pm \Delta t_{0\max}, \quad (4.81)$$

В выражении (4.81) в случае недостатка теплоты  $\Delta t_{0\max}$  берётся со знаком «+», избытка теплоты – со знаком «-».

Тепловой поток, уносимый вытяжным воздухом, Вт, можно определить следующим образом [20]:

$$Q_{yx} = L_{yx} \cdot h_{yx}(\tau), \quad (4.82)$$

где  $h_{yx}(\tau)$  – энтальпия уходящего воздуха, определяется по выражению (4.74) для температуры вытяжного воздуха.

Температура вытяжного воздуха определяется по следующему выражению

$$t_{yx}(\tau) = t_{np}(\tau) + \mu \cdot (t_e(\tau) - t_{np}(\tau)), \quad (4.83)$$

где  $\mu$  – коэффициент эффективности воздухообмена по температуре [96]. Теоретически он может принимать значения от 1 до  $\infty$ . При  $\mu=1$  все теплоизбытки (теплопотери) поглощаются приточным воздухом, а при  $\mu = \infty$  – уходящим воздухом. Эта величина зависит от расстановки технологического оборудования в помещении, его геометрических размеров и принятой схемы воздухораспределения [39, 75].

Тепловой поток, проходящий через светопрозрачную конструкцию включает в себя две составляющие [20]:

– текущие теплопоступления в результате солнечной радиации, поглощаемой заполнением и непосредственно проникающей в помещение, Вт:

$$Q_{o.инс}(\tau) = J_{инс}(\tau) \cdot r_{обл}(\tau) \cdot k_{сзу}(\tau) \cdot k_{проп} \cdot A_o, \quad (4.84)$$

где  $J_{инс}(\tau)$  – интенсивность потока солнечной радиации (прямой и рассеянной), падающей в момент времени  $\tau$  на поверхность при безоблачном небе, определяемая в зависимости от ориентации поверхности по сторонам света, Вт/м<sup>2</sup> [85, 123] (см. подраздел 2.1);

$r_{обл}$  – коэффициент облачности, принимаемый по данным метеонаблюдений;

$k_{сзу}(\tau)$  – коэффициент теплопропускания солнцезащитных устройств, принимается по [124], а также исходя из экспериментальных данных;

$k_{проп}$  – коэффициент относительного пропускания солнечной радиации светопрозрачных конструкций, принимается по [124];

$A_o$  – площадь светопрозрачных конструкций, м<sup>2</sup>. С учётом разных значений солнечной радиации  $A_o$  считается отдельно по каждой стороне света.

– текущие трансмиссионные теплопотери (теплопоступления) через светопрозрачную конструкцию, вследствие разности температур внутреннего и наружного воздуха, Вт, рассчитываемая отдельно для светопрозрачной и непрозрачной части:

$$Q_o^{cm}(\tau) = \frac{t_n(\tau) - t_g(\tau)}{R_o^{cm}(\tau)} \cdot A_o^{cm}, \quad (4.85)$$

$$Q_o^p(\tau) = \frac{t_n(\tau) - t_g(\tau)}{R_o^p(\tau)} \cdot A_o^p, \quad (4.86)$$

где  $t_n(\tau)$  – температура наружного воздуха на текущий момент времени  $\tau$ , °С;  
 $t_g(\tau)$  – температура внутреннего воздуха на текущий момент времени  $\tau$ , °С.

Закон изменения этой температуры задаётся исходя из динамических условий эксплуатации здания;

$R_o^{cm}(\tau)$ ,  $R_o^p(\tau)$  – сопротивление теплопередаче светопрозрачной и непрозрачной части ограждающей конструкции, соответственно, на текущий момент времени  $\tau$ , (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, в зависимости от его конструкции (в том числе отсутствие или наличие теплоотражающих экранов), разности температур между внутренним  $t_g(\tau)$  и наружным  $t_n(\tau)$  воздухом, а также скоростей внутреннего  $v_g$  и наружного  $v_n$  воздуха;

$A_o^{cm}$ ,  $A_o^p$  – площадь светопрозрачной и непрозрачной части ограждающей конструкции, соответственно, м<sup>2</sup>.

#### **4.5.4 Определение количества электрической энергии, генерируемой в энергоэффективных светопрозрачных конструкциях**

При описании математической модели микроклимата для помещений с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями особое внимание следует уделить вопросам, связанным с учетом электрической энергии, вырабатываемой в разработанных многофункциональных энергоэффективных ставнях. В этих ставнях наряду с теплоотражающими металлическими экранами также используются фотоэлектрические солнечные панели, установленные со стороны окружающей среды. Более подробная информация представлена в подразделе 2.3.

Временной график восприятия солнечной энергии данными панелями зависит от принятого технического решения. В случае, если энергоэффективный

ставень в период использования светопрозрачной конструкции по своему прямому назначению (обеспечение помещения естественным освещением) перемещается в пространство, ограниченное стеной и непрозрачным навесным фасадом здания, то период генерации электрической энергии ограничен только тем промежутком светлого времени суток, когда ставень перекрывает световой проем. Если же ставень перемещается в пространство перед стеной, без наличия навесного фасада, то электрическая энергия генерируется в течение всего светлого времени суток.

Электрическую мощность, генерируемую фотоэлектрической солнечной панелью, установленной с наружной стороны ставня, можно определить следующим образом

$$Q_{эл}(\tau) = J_{инс}(\tau) \cdot r_{обл}(\tau) \cdot k_{прегр}(\tau) \cdot k_{загр} \cdot k_{эл} \cdot A_n, \quad (4.87)$$

где  $J_{инс}(\tau)$  – интенсивность потока солнечной радиации (прямой и рассеянной), падающей в момент времени  $\tau$  на поверхность при безоблачном небе, определяемая в зависимости от ориентации поверхности по сторонам света, Вт/м<sup>2</sup> [85, 123];

$r_{обл}(\tau)$  – коэффициент облачности, принимаемый по данным метеонаблюдений;

$k_{прегр}(\tau)$  – наличие или отсутствие непрозрачной преграды перед ставнем (например навесного фасада) в текущий момент времени. В случае наличия преграды  $k_{исч} = 0$ , отсутствия –  $k_{исч} = 1$ ;

$k_{загр}$  – коэффициент снижения поступления солнечной энергии на панель вследствие наличия загрязнения, не превышает 1;

$k_{эл}$  – коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую;

$A_n$  – площадь поверхности фотоэлектрической панели, м<sup>2</sup>.

Коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую  $k_{эл}$  панелей российского производства находится в диапазоне от 14 до 20 % [44]. Необходимо отметить, что КПД достигает 20 % для панелей промышленного серийного производства, а не только лабораторных экземпляров.

Количество электрической энергии, вырабатываемой в энергоэффективном ставне, можно определить как:

$$W_{эл}(\tau) = \int Q_{эл}(\tau) d\tau. \quad (4.88)$$

Необходимо отметить, что использование данной конструкции ставня позволяет не только генерировать электрическую энергию, но и значительно снизить трансмиссионные тепловые потери из помещения в окружающую среду в холодный период года, а также уменьшить теплопоступления в результате солнечной радиации, приводящие к дополнительным затратам холода в СКВ, в теплый период года.

#### 4.6 Выводы по четвертому разделу

1. Разработана математическая модель процесса теплопередачи через стеклопакет с применением теплоотражающих экранов. Модель реализована в одномерной постановке с помощью метода конечных разностей в ПК Matlab. Для частного случая светопрозрачной конструкции была разработана компьютерная "Программа для расчёта процесса теплопередачи для двухкамерного стеклопакета с металлическими теплоотражающими экранами" (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615250 от 19 мая 2016 г.).

В трехмерной постановке с помощью метода конечных элементов модель реализована в ПК Phoenix. Для этого построены геометрические и сеточные модели двух конструкций стеклопакета с различным количеством теплоотражающих экранов.

2. Адекватность математической модели процесса теплопередачи через стеклопакет с применением теплоотражающих экранов доказана путем сравнения результатов расчета с экспериментальными и справочными данными. Средняя относительная погрешность расчёта сопротивления теплопередаче для стеклопакетов с экранами по сравнению с данными математического моделирования в ПК Matlab и Phoenix составила 5,4 %, в сравнении с экспериментальными данными –



4,7 % (для ПК Mathlab) и 7,3 % (для ПК Phoenics). Отличие приведенного сопротивления теплопередаче, рассчитанного в ПК Matlab, от справочных данных составило не более 6,1 %. Доказана возможность использования предложенной математической модели для определения сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции.

3. Для оперативного определения тепловых потерь через светопрозрачные конструкции разной конфигурации при изменении температурного поля в процессе теплопередачи и гидродинамического режима движения внутреннего и наружного воздуха разработан инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче в текущий момент времени на основе аналитических выражений, полученных путем аппроксимации результатов численного моделирования. С помощью данного метода были получены номограммы и зависимости для определения сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций.

4. На основании данных математического моделирования доказано, что сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами является нелинейной зависимостью и существенно зависит не только от геометрических и физических свойств стекол, экранов и образованных ими воздушных прослоек, но и от температурного режима эксплуатации данных конструкций.

5. Разработана математическая модель динамического микроклимата для помещений, учитывающая нелинейную зависимость сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами от температурного режима эксплуатации, а также генерацию электрической энергии при помощи солнечных батарей.

Материалы четвертого раздела опубликованы в работах [189, 192, 193, 194, 195, 196, 198, 199, 211, 212].

## **5 Повышение эффективности энергосбережения при организации монотонного и динамического микроклимата в помещениях зданий с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями**

Разработанные светопрозрачные конструкции с применением теплоотражающих экранов и солнечных фотоэлектрических панелей обладают повышенным приведенным сопротивлением теплопередаче, их применение позволяет значительно снизить топливно-энергетические затраты на обеспечение необходимых параметров микроклимата в помещении. Для обоснования практического применения данных энергосберегающих светопрозрачных конструкций при организации динамического микроклимата необходимо выполнить технико-экономическую оценку использования разработанных мероприятий на примере конкретных помещений различного назначения.

### **5.1 Разработка методики определения минимальной температуры внутреннего воздуха при недопущении выпадения конденсата на внутренних поверхностях разработанных светопрозрачных конструкций при наличии и отсутствии предварительной осушки воздуха**

Действующие положения свода правил СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» [130] в холодный период года в помещениях отапливаемых зданий (кроме помещений, для которых параметры воздуха установлены другими нормативными документами), когда они не используются и в нерабочее время, позволяют снижать температуру внутреннего воздуха ниже нормируемой, но не ниже 15 °С – в жилых помещениях; 12 °С – в помещениях общественных и административно-бытовых зданий; 5 °С – в «сухих» производственных помещениях.

В понижении температуры воздуха во время дежурного режима отопления заложен большой энергосберегающий потенциал [43, 45]. В большой степени минимальная температура воздуха при применении дежурного режима отопления определяется исходя из условий недопущения образования конденсата на ограждающих поверхностях и для надежного функционирования инженерных систем в здании. Высокую вероятность выпадения конденсата следует отнести к светопрозрачным конструкциям (окна, световые фонари, стеклянные двери и т.д.), так как именно данные конструкции являются «слабым звеном» в теплозащите зданий.

Стоит отметить, что появление влаги на стеклах является не только эстетическим дефектом – в дальнейшем постоянное выпадение конденсата может привести к увлажнению конструкций, которое способно стать причиной образования грибка и плесени на подоконниках [178, 180]. Особое внимание следует уделить окнам с горизонтальным и наклонным расположением, а так же зенитным фонарям, так как согласно Свода правил СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» температура на внутренней поверхности должна быть не ниже температуры точки росы внутреннего воздуха [127].

Минимальная температура внутренней поверхности остекления вертикальных светопрозрачных конструкций, т.е. с углом наклона к горизонту  $45^\circ$  и более (кроме производственных зданий) должна быть не ниже  $3^\circ\text{C}$ , для производственных зданий – не ниже  $0^\circ\text{C}$ . Минимальная температура внутренней поверхности непрозрачных элементов вертикальных светопрозрачных конструкций не должна быть ниже точки росы внутреннего воздуха помещения [127].

Относительная влажность воздуха в помещении является нормируемой величиной (так, для общественно-административных и жилых зданий оптимальные значения находятся в диапазоне от 30 до 60 % [32]), и именно от влажности воздуха, сопротивления теплопередаче окна, температуры наружного воздуха и зависит температура точки росы на внутреннем остеклении, а значит и минимальная температура воздуха при дежурном режиме отопления.

Высокая относительная влажность воздуха особенно характерна для производственных помещений таких предприятий легкой промышленности, как хлоп-

чатобумажные фабрики ( $\varphi = 45 \div 70 \%$ ), шелковые фабрики ( $\varphi = 50 \div 70 \%$ ), предприятия шерстяной промышленности ( $\varphi = 60 \div 75 \%$ ) [96], а также предприятий деревообработки и т.д. На прядильных и ткацких фабриках параметры микроклимата в производственных помещениях должны удовлетворять не только гигиеническим, но и технологическим требованиям, регламентированным в отраслевых нормах проектирования. Технологический процесс прядения и ткачества зависит не только от температуры воздуха, но и от влажности полуфабриката [177]. При высокой относительной влажности воздуха увеличивается содержание влаги в волокнах хлопка и уменьшается их жесткость, значительно снижается частота обрыва ленты и улучшаются её физические свойства (в том числе механические и фрикционные). Увеличение относительной влажности воздуха приводит к снижению механической нагрузки на чесальные машины, в том числе и уменьшается частота поломки движущихся деталей. В свою очередь, влажность полуфабриката определяется влажностью воздуха. Данные высокие значения влажности поддерживаются системами вентиляции и кондиционирования воздуха [116].

Как показали расчёты и опытные данные (см. таблицы 4.5, 4.6, рисунки 4.16, 4.17) при применении в окнах теплоотражающих экранов, установленных снаружи помещения, значительно увеличиваются сопротивление теплопередаче и температура на внутреннем стекле, следовательно, мы можем дополнительно понизить температуру воздуха внутри помещения (в зависимости от влажности) во время отсутствия людей при выполнении условия недопущения выпадения конденсата на данных светопрозрачных ограждающих конструкциях.

Была разработана методика определения значения минимальной температуры воздуха в нерабочее время для помещений с регулируемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций, отличающаяся учетом термовлажностных режимов эксплуатации здания и эффекта от предварительной осушки воздуха.

Для сбережения энергетических ресурсов на поддержание микроклимата в помещениях в нерабочее время применяют режим «дежурного» отопления, при котором температуру воздуха понижают до температуры не ниже  $5^{\circ}\text{C}$ , выполняя

условие не допущения выпадения конденсата на твердых поверхностях. Для выполнения этих условий предложена формула для определения минимально допустимой температуры воздуха внутри помещения:

$$t_{\epsilon}^{\text{деж}} = \frac{\tau_p \cdot \alpha_b \cdot R_0 - t_n}{\alpha_b \cdot R_0 - 1} + \Delta t_{\text{зап}}, \quad (5.1)$$

где  $\tau_p$  – температура точки росы, определенная при параметрах воздуха в рабочее время по формуле Магнуса-Теттенса, °С;

$\Delta t_{\text{зап}}$  – температурный запас по недопущению конденсации, °С;

$t_n$  – температура наружного воздуха, °С;

$R_0 = R_0^{\text{min}}$  – приведенное сопротивление теплопередаче – минимальное значение из двух сопротивлений светопрозрачной  $R_0^{\text{cm}}$  и непрозрачной  $R_0^{\text{p}}$  зон, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;

$\alpha_b$  – расчётный коэффициент теплоотдачи от воздуха к внутренней поверхности светопрозрачной конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Температуру точки росы  $\tau_p$  воздуха, находящегося в помещении в рабочее время (см. рисунок 5.1), можно определить по формуле Магнуса-Теттенса [159] с погрешностью ±0,2 °С (в диапазоне температур от 5 до 25 °С, относительных влажностей – от 10 до 70 %):

$$\tau_p = \frac{b \cdot \gamma(t_{\text{B}}^{\text{paб}}, \varphi_{\epsilon}^{\text{paб}})}{a - \gamma(t_{\text{B}}^{\text{paб}}, \varphi_{\epsilon}^{\text{paб}})}, \quad (5.2)$$

где  $\gamma(t_{\text{B}}^{\text{paб}}, \varphi_{\epsilon}^{\text{paб}})$  – функция  $\gamma$ , зависящая от температуры  $t_{\text{B}}^{\text{paб}}$  и относительной влажности  $\varphi_{\epsilon}^{\text{paб}}$  воздуха в рабочее время;

$a = 17,27$ ;  $b = 237,7$  – коэффициенты.

Значение функции  $\gamma$  можно определить по следующей формуле:

$$\gamma(t_{\text{B}}^{\text{paб}}, \varphi_{\epsilon}^{\text{paб}}) = \frac{a \cdot t_{\text{B}}^{\text{paб}}}{b + t_{\text{B}}^{\text{paб}}} + \ln\left(\frac{\varphi_{\epsilon}^{\text{paб}}}{100}\right). \quad (5.3)$$

Согласно анализа данных проведённого численного моделирования (см. таблицу 5.1) в случае естественной конвекции у внутренней поверхности значение коэффициента  $\alpha_b$  для холодного периода года для современных светопро-

зрачных конструкций следует принимать не более  $7,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , для конструкций с расположенным со стороны помещения теплоотражающим металлическим экраном  $\alpha_{\text{в}}$  следует принимать не выше  $4,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

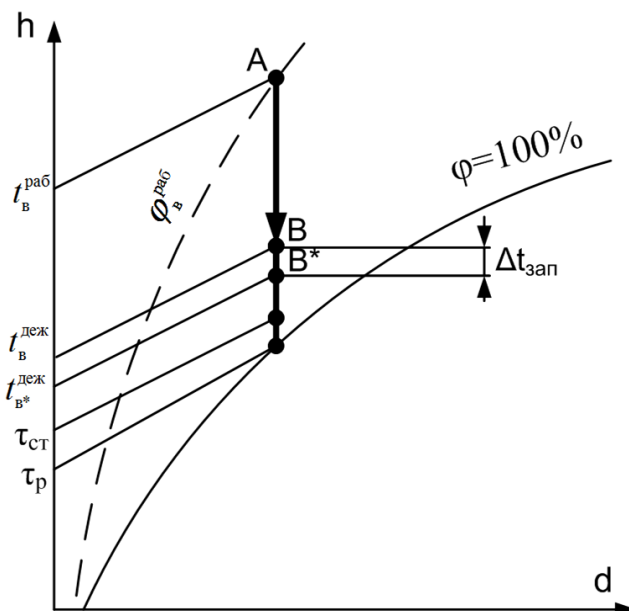


Рисунок 5.1 – К определению температуры воздуха при дежурном режиме отопления в  $h-d$  диаграмме ( $h$  – энтальпия,  $d$  – влагосодержание воздуха)

Таблица 5.1 – Рассчитанные значения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления теплопередаче при естественной конвекции на внутренней поверхности светопрозрачной конструкции в зависимости от разности температур ( $t_{\text{в}} - \tau_{\text{г}}$ )

Параметры	Разность температур ( $t_{\text{в}} - \tau_{\text{г}}$ ), $^\circ\text{C}$			
	2	4	6	8
Коэф. теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{л.в}}$ , Вт/ ( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ), по формуле (4.4)	4,02	3,97	3,92	3,88
Коэф. теплоотдачи конвекцией $\alpha_{\text{к.в}}$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ), по формуле (4.8)	2,09	2,64	3,02	3,32
Коэф. теплоотдачи $\alpha_{\text{в}}$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )	6,11	6,60	6,94	7,20
Сопротивление теплопередачи $R_{\text{в}}$ , $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ /Вт	0,16	0,15	0,14	0,14

В случае вынужденной конвекции (механическая вентиляция) расчётный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{в}}$  от внутреннего воздуха к поверхности светопрозрачной конструкции следует рассчитывать по формулам:

а) при отсутствии теплоотражающих экранов со стороны помещения

$$\alpha_{\text{в}} = 9,6 + 3,8 \cdot v_{\text{г}}; \quad (5.4)$$

б) при наличии теплоотражающих экранов со стороны помещения

$$\alpha_{\text{в}} = 6,4 + 3,8 \cdot v_{\text{г}}. \quad (5.5)$$

Температурный запас  $\Delta t_{\text{зап}}$  определяется экспериментально и является функцией, зависящей от конструкции стеклопакета (материала дистанционной рамки, применения технологии «тёплого» края, глубины «затопления» края стеклопакета в профиль и т.д.), термического сопротивления краевых зон стеклопакета, расчётной разности температур внутреннего и наружного воздуха, и изменяется согласно данным проведенного эксперимента и численного моделирования в диапазоне от 1,5 до 4 °С (см. подразделы 3.3, 4.3).

Для светопрозрачной части данного типа ограждающей конструкции (с экранами и без) нахождение приведенного сопротивления теплопередаче  $R_o^{cm}$  подробно изложено в подразделе 4.4.

Для непрозрачной зоны (рама и створки) определение сопротивления  $R_o^p$  расчётным путём является непростой задачей в связи со сложной конфигурацией используемого профиля (см. рисунок 5.2).



Рисунок 5.2 – Поперечный разрез ПВХ профиля фирмы VEKA

Согласно исследованиям, опубликованных в [173], группы учёных Норвежского университета науки и технологии (Norwegian University of Science and Tech-

nology) под руководством А. Густэвсена (A. Gustavsen) и Американской национальной лаборатории Беркли (Lawrence Berkeley National Laboratory), активно занимающихся разработкой новых энергосберегающих окон, определение сопротивления  $R_o^p$  может быть осуществлено с помощью проведения натурных испытаний в соответствующих лабораториях или с помощью программ CFD (computational fluid dynamics – вычислительная гидродинамика) моделирования, например, при помощи программного комплекса Fluent, ANSYS, COMSOL и др. Так как в современных окнах площадь непрозрачной части (рама, створки) обычно составляет 20÷30% от общей площади окна [173], то влияние  $R_o^p$  на приведенное сопротивление теплопередаче всей оконной конструкции весьма существенно.

При выполнении диссертационных исследований были проведены испытания пластиковых окон в сертифицированной лаборатории АНО «Ивановстрой-испытания» и определены характеристики ПВХ профиля при использовании теплоотражающих экранов. Так, в случае использования 5-ти камерного ПВХ профиля (например, серии SOFTLINE фирмы VEKA) в качестве материала рамы и створки окна и при работе системы вентиляции сопротивление непрозрачной зоны окна можно описать следующим образом:

без экранов

$$R_o^p(v_g, v_n) = 0,78 + \frac{1}{9,6 + 3,8 \cdot v_g} + \frac{1}{3,3 + 7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}}; \quad (5.6)$$

при применении снаружи 3 теплоотражающих экранов

$$R_o^p(\Delta t, v_g, v_n) = 1,23 + \frac{1}{9,6 + 3,8 \cdot v_g} + \frac{24,8}{\Delta t + 20,1} + \frac{1}{7,34 \cdot v_n^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_n}}. \quad (5.7)$$

Стоит отметить, что скорость воздуха на внутренней поверхности окна  $v_g$  в случае применения механической вентиляции существенно зависит от места расположения и характеристик воздухораспределителя, а также от приходящегося на него расхода приточного воздуха. Но, так как в системах кондиционирования наиболее распространено качественное регулирование нагрузки, поддерживается постоянный расход воздуха, то эпюру скоростей  $v_g$  можно определить опытным



путём и использовать полученные осредненные значения при определении приведенного сопротивления теплопередаче окна.

Таким образом, в связи со значительной зависимостью приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции с экранами  $R_o$  от разности температур внутреннего и наружного воздуха для определения температуры  $t_{деж}$  необходимо решать систему уравнений, состоящей из формулы (5.1) и уравнений, описывающих  $R_o^{cm} = f(\Delta t, v_g, v_n)$  или  $R_o^p = f(\Delta t, v_g, v_n)$ . В ПВК Mathcad была разработана программа по нахождению минимальной температуры внутреннего воздуха при «дежурном» режиме отопления, исходя из описанных выше требований. Следует отметить, что в соответствии с нормативными требованиями температура внутреннего воздуха не может быть меньше 5 °С.

Был осуществлен расчет минимальной температуры воздуха в помещении при дежурном режиме отопления, исходя из требований свода правил СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [127], устанавливающих минимальную температуру внутренней поверхности остекления вертикальных светопрозрачных конструкций, т.е. с углом наклона к горизонту 45° и более (кроме производственных зданий) не ниже 3 °С (для производственных – не ниже 0 °С). Было задано изменение приведенного сопротивления светопрозрачной части окна  $R_o^{cm}$  от 0,5 до 1,70 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт, температуры наружного воздуха  $t_n$  – от минус 10 до минус 30 °С. Результаты расчета представлены в таблице 5.2 и на рисунке 5.3.

Таблица 5.2 – Изменение минимальной температуры внутреннего воздуха  $t_{деж}$ , °С, в зависимости от температуры наружного воздуха  $t_n$  и приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции  $R_o^{cm}$

$t_n, ^\circ\text{C}$	$R_o^{cm}, (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$				
	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7
-10	8,3	6,4	5,7	5,3	5
-15	10	7,3	6,3	5,8	5,4
-20	11,7	8,3	6,9	6,3	5,8
-25	13,3	9,2	7,6	6,7	6,2
-30	15	10,1	8,2	7,2	6,6

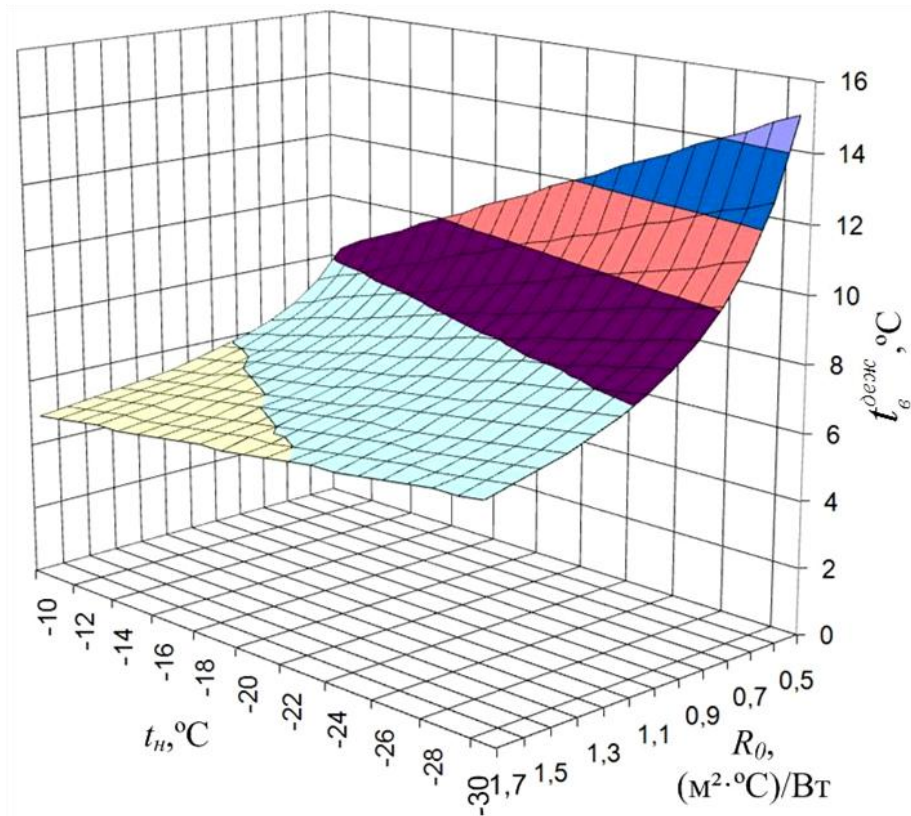


Рисунок 5.3 – Зависимость минимально-допустимой температуры воздуха  $t_в^{\text{деж}}$  при дежурном режиме отопления от приведенного сопротивления теплопередачи ограждающей конструкции  $R_0$  и температуры наружного воздуха  $t_н$ . Температура на внутренней поверхности остекления  $t_в$  задана равной 3 °C согласно требований СП 50.13330.2012

Анализ таблицы 5.2 и рисунка 5.3 показывает, что при малых значениях приведенного сопротивления теплопередаче  $R_0^{cm}$  и низких температурах наружного воздуха  $t_н$  минимальная температура внутреннего воздуха  $t_в^{\text{деж}}$  будет достаточно высокой. Так, уменьшении температуры  $t_н$  от минус 10 до минус 30 °C при  $R_0^{cm}$ , равном 0,5 (м<sup>2</sup>·°C)/Вт, температура воздуха увеличится со значения 8,3 до 15,0 °C (или 6,8 °C). При повышенном значении сопротивления  $R_0^{cm}$ , равном 1,7 (м<sup>2</sup>·°C)/Вт, увеличение  $t_в^{\text{деж}}$  составит от 5,0 до 6,6 °C (или на 1,6 °C). Увеличение сопротивления  $R_0^{cm}$  со значения 0,5 до 1,7 (м<sup>2</sup>·°C)/Вт (при  $t_н = -30$  °C) позволит понизить минимальную температуру  $t_в^{\text{деж}}$  от 15,0 до 6,6 °C (или на 8,4 °C), тем самым снизив затраты ТЭР на обеспечение необходимого значения температуры внутреннего воздуха.

Для оценки влияния относительной влажности внутреннего воздуха на минимальную температуру воздуха при дежурном режиме отопления, исходя из условия недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности светопрозрачной конструкции, был произведен соответствующий расчет. Было задано изменение приведенного сопротивления светопрозрачной части окна  $R_o^{cm}$  от 0,5 до 1,70 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ), температуры наружного воздуха  $t_n$  – от минус 10 до минус 30  $^{\circ}\text{C}$ ; температура воздуха в рабочее время  $t_b^{pab}$  фиксировалась на уровне 20  $^{\circ}\text{C}$ . Расчёт был выполнен для относительной влажности  $\varphi_6^{pab}$ , равной 35 и 50 %. Результаты расчётов можно увидеть на рисунке 5.4.

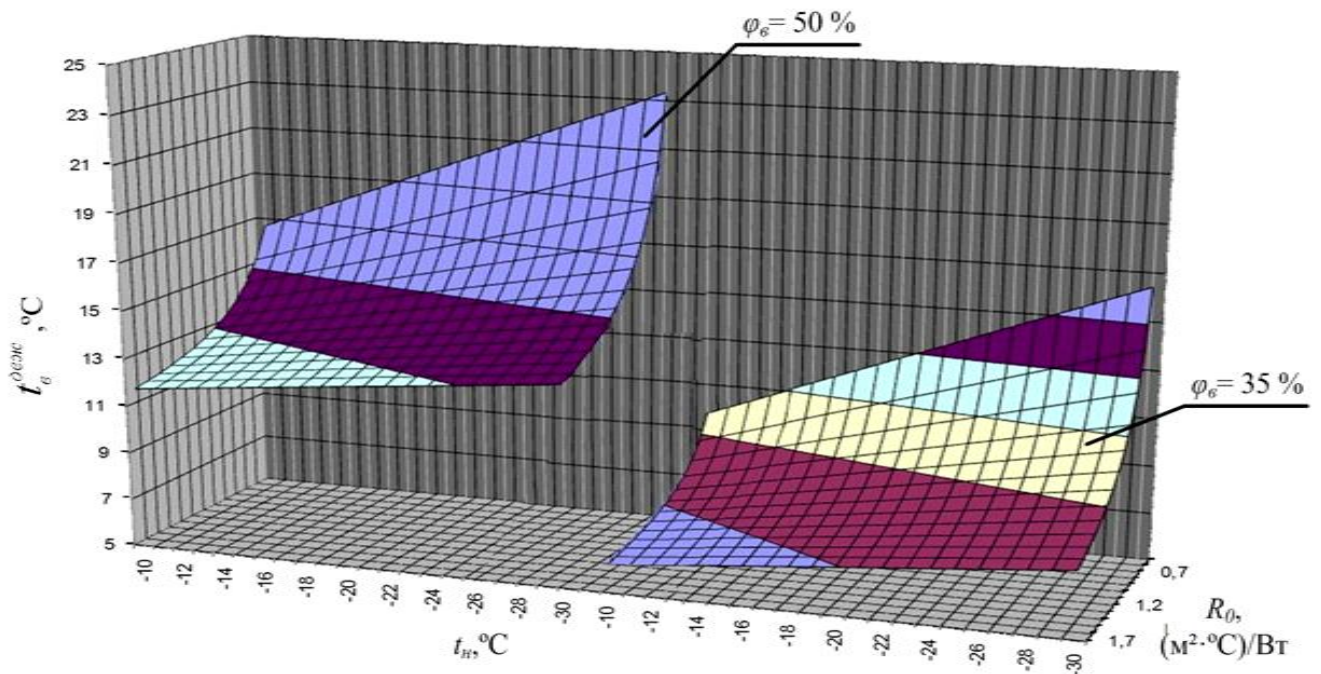


Рисунок 5.4 – Зависимость минимально-допустимой температуры воздуха  $t_6^{oemj}$  при дежурном режиме отопления от приведенного сопротивления теплопередачи ограждающей конструкции  $R_o$  и температуры наружного воздуха  $t_n$ . Левая половина графика построена при относительной влажности воздуха  $\varphi = 50\%$ , правая – при  $\varphi = 35\%$ . Температура  $t_6^{oemj}$  определена исходя из условия недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности остекления

Как и следовало ожидать, значения  $t_6^{oemj}$  будут значительно выше при более высокой влажности внутри помещения. Применение экранов также даёт значительный эффект. Так, из анализа результатов расчёта следует, что при относи-

тельной влажности 35 %, температуре  $t_n$  минус 30 °С, при увеличении сопротивления  $R_o$  с 0,5 до 1,70 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт за счет использования со стороны наружного воздуха экранов, минимально-допустимую температуру воздуха при дежурном режиме отопления можно уменьшить с 16,4 до 7,8 °С, то есть более чем на 8 °С, а при относительной влажности 50 % температуру  $t_g^{деж}$  можно понизить на 10 °С (с 23,4 до 13,3 °С).

Однако стоит отметить, что при температуре наружного воздуха, равной минус 30 °С, и повышенном сопротивлении окон с экранами минимальная температура воздуха, исходя из условия недопущения образования конденсата, при влажности в 50 % составит 13,3 °С, а при влажности 35 % – 7,8 °С (см. рисунок 5.3). При меньшей температуре воздуха  $t_g^{деж}$  в случае применения дежурного режима отопления будут и меньшие затраты тепловой энергии для поддержания параметров микроклимата в помещении. Следовательно, в случае применения дежурного режима отопления и экранов в светопрозрачных конструкциях было бы целесообразно дополнительно понизить влагосодержание воздуха.

Были рассмотрены такие варианты осушки воздуха, применяемые в системах кондиционирования, как взаимодействие с охлаждённым сорбентом (адсорбционный метод) [145], организация контакта влажного воздуха с жидкой или твёрдой поверхностью, имеющей температуру ниже точки росы (конденсационный метод) [156, 142], мембранный и мембранно-абсорбционный способы [62], а также процесс смешения с наружным воздухом (ассимиляция). В ходе проведённого анализа, был сделан вывод, что наименее энерго- и ресурсозатратным вариантом будет случай со смешением воздуха, так как он не требует регенерации сорбента и больших расходов охлаждающей воды или электроэнергии, а наружный воздух в холодный период года обладает весьма низким влагосодержанием  $d$ .

Для систем кондиционирования воздуха (СКВ), обеспечивающих необходимые параметры микроклимата для помещений промышленных предприятий, где разрешается рециркуляция воздуха, была разработана методика по определению положения точки С, описывающей состояние среды после смешения наружного и внутреннего воздуха (см. рисунок 5.5).

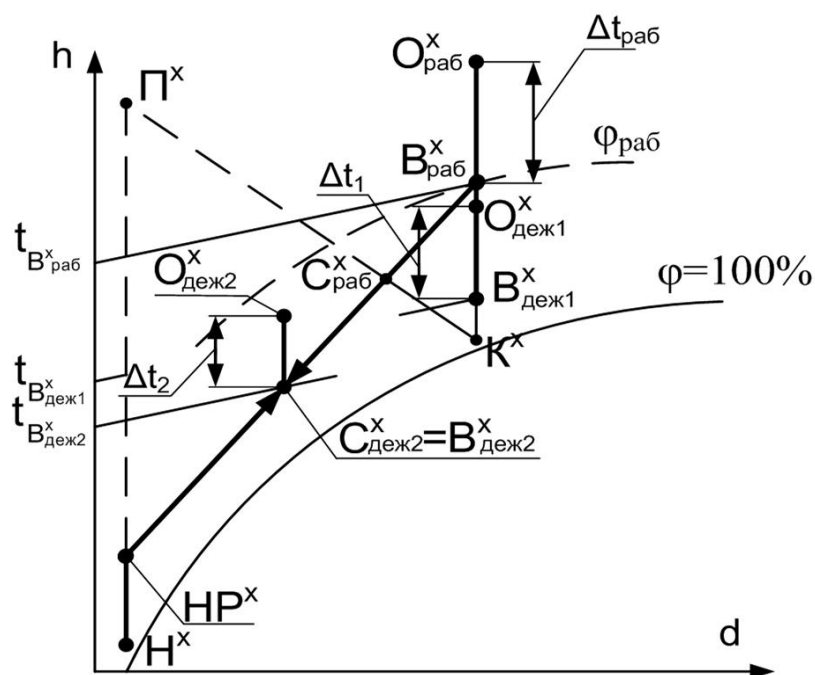


Рисунок 5.5 – Процесс снижения влагосодержания  $d$  и температуры воздуха  $t$  при «дежурном» режиме отопления с помощью системы кондиционирования в холодный период года для помещений, в которых разрешена рециркуляция (случай недостатка теплоты и отсутствия влаговыделений в помещении)

Пример центрального кондиционера с использованием процесса смешения воздуха в соответствующей секции (поз. 3) и утилизацией теплоты части вытяжного воздуха в рекуператоре (процесс  $H^x$ - $HP^x$ ) (поз. 4) представлен на рисунке 5.6.

При дежурном режиме отопления в случае использования системы кондиционирования воздуха целесообразно использовать полную рециркуляцию воздуха (процесс  $B^x_{деж1} - O^x_{деж1}$ ). Для понижения температуры воздуха в дежурном режиме необходимо одновременно подмешать наружный воздух с низким влагосодержанием  $d_H$ . Положение точки  $C^x_{деж2}$  и, соответственно, степень рециркуляции  $n_{рец}$  будут определяться минимальной температурой внутреннего воздуха в точке  $B^x_{деж2}$ , определенной по формуле (5.1), исходя из условия недопущения выпадения конденсата на окнах. После снижения влагосодержания и температуры воздуха также предлагается применять полную рециркуляцию (процесс  $B^x_{деж2} - O^x_{деж2}$ ). Раз-

ность температур  $\Delta t_2$  (рисунок 5. 5) между приточным (точка  $O_{\text{деж}2}^x$ ) и внутренним (точка  $B_{\text{деж}2}^x$ ) воздухом при понижении влагосодержания будет меньше, чем в контрольном варианте ( $\Delta t_1$ ), что определяется меньшим количеством тепловой энергии, затрачиваемой в подогревателе кондиционера на компенсацию недостатка теплоты (в т.ч. потерь через оболочку здания) в связи с тем, что значение температуры  $t_{B_{\text{деж}2}^x}$  ниже чем  $t_{B_{\text{деж}1}^x}$ .

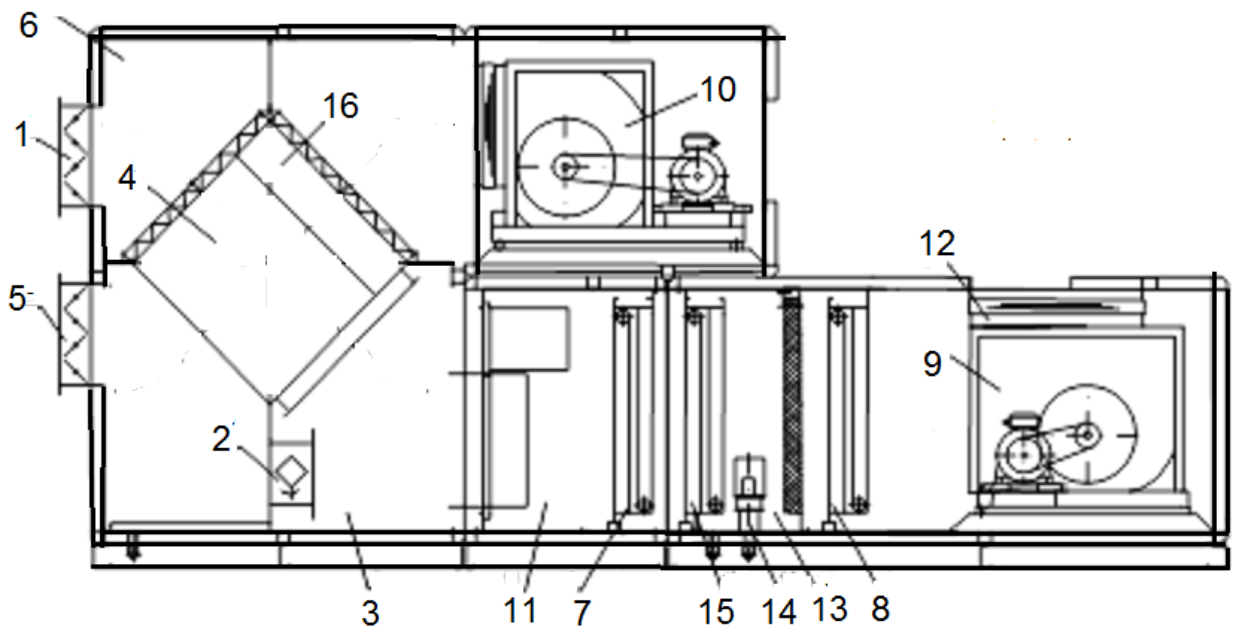


Рисунок 5.6 – Схема центрального кондиционера [25] фирмы CLIVET: 1,5 – клапаны наружного и вытяжного воздуха; 2 – сдвоенный клапан рециркуляционного воздуха; 3 – секция смешения; 4 – теплоутилизатор; 6 – приемная секция; 7, 8 – воздухонагреватели первой и второй ступени; 9 – приточный вентилятор; 10 – вытяжной вентилятор; 11 – секция фильтров; 12 – гибкая вставка; 13 – секция орошения; 14 – циркуляционный насос; 15 – поверхностный воздухоохладитель; 16 – обводной канал для воздуха

Если рециркуляция воздуха в помещении не допускается, то затраты теплоты на поддержание необходимой температуры внутреннего воздуха (точка  $B_{\text{деж}}^x$ ) в случае применения дежурного режима отопления будут ниже при использовании теплоотражающих экранов в окнах (см. рисунок 5.7).

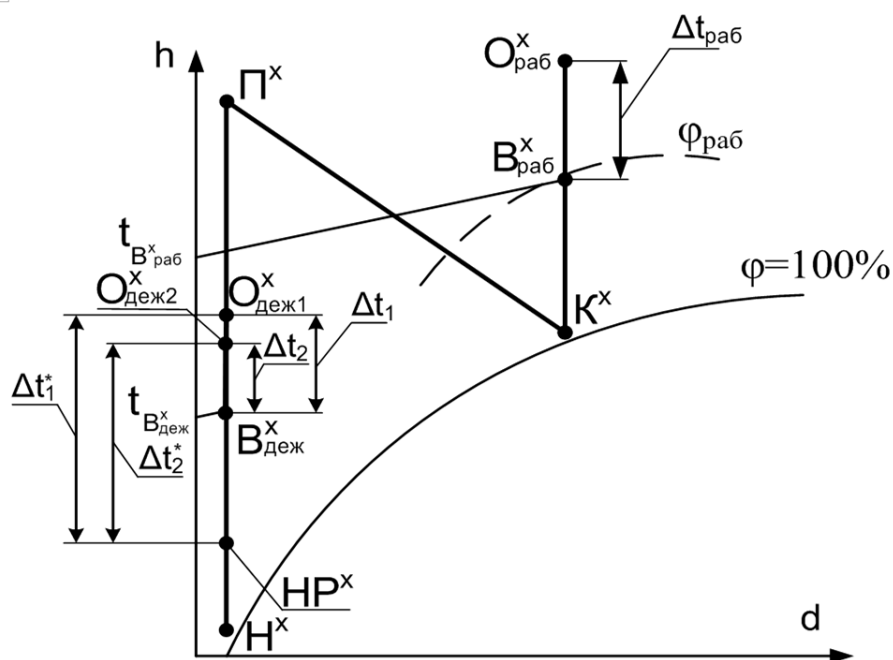


Рисунок 5.7 – Процесс снижения температуры воздуха  $t$  при дежурном режиме отопления с помощью системы кондиционирования в холодный период года ( $h$  – энтальпия воздуха) для помещений, в которых запрещена рециркуляция (случай недостатка теплоты и отсутствия влаговыделений в помещении)

Это связано с тем, что разность температур между воздухом после подогревателя первой ступени (точка  $O_{\text{деж}2}^x$ ) и после рекуператора (точка  $HP^x$ ) при использовании экранов  $\Delta t_2^*$  меньше, чем  $\Delta t_1^*$  (без экранов). Точка  $O_{\text{деж}1}^x$  характеризует параметры приточного воздуха при отсутствии экранов в окнах, точка  $O_{\text{деж}2}^x$  – в случае использования экранов. Точка  $O_{\text{деж}2}^x$  располагается ниже точки  $O_{\text{деж}1}^x$  в связи с меньшими трансмиссионными потерями теплоты в случае использования экранов.

Функционирование СКВ в нерабочее время необходимо обеспечивать в прямоточном режиме, если в помещении неизбежны выделения токсичных паров и газов 1 и 2 категорий опасности, болезнетворных организмов и неприятных запахов [130]. Если в дежурный режим работы СКВ разрешается полная рециркуляция, то воздух будет только нагреваться в подогревателе (процесс  $B_{\text{деж}}^x - O_{\text{деж}}^x$ ) до параметров точки  $O_{\text{деж}1}^x$  в случае отсутствия экранов, и до точки  $O_{\text{деж}2}^x$  – в случае

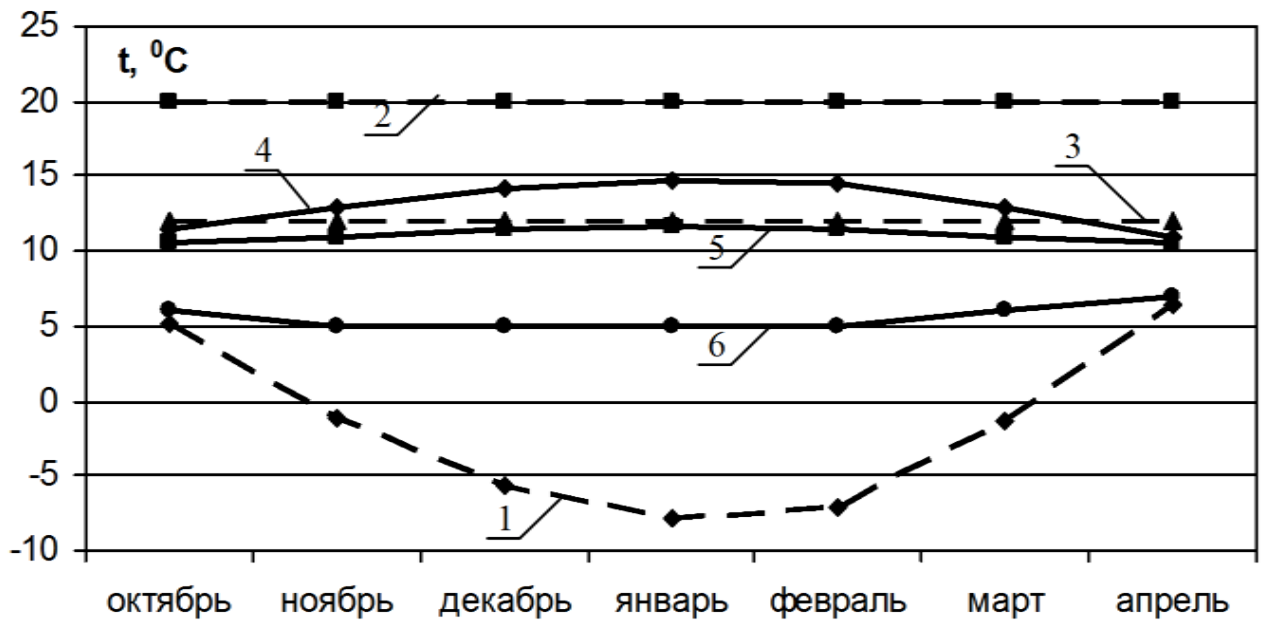
применения экранов, причём разность температур  $\Delta t_2$ , чем  $\Delta t_1$  (без экранов). Следовательно, также будут меньше затраты теплоты в случае использования экранов в окнах.

Возврат к параметрам воздуха, поддерживаемым в рабочее время, будет осуществляться за счёт обратного увлажнения воздуха в секции орошения и подогрева его в воздухонагревателе. К достоинствам данного способа осушки также следует добавить тот факт, что в помещение после рабочей смены будет подаваться свежий воздух, что сможет повысить чистоту внутреннего воздуха и благоприятно скажется на микрофлоре помещения и самочувствии людей.

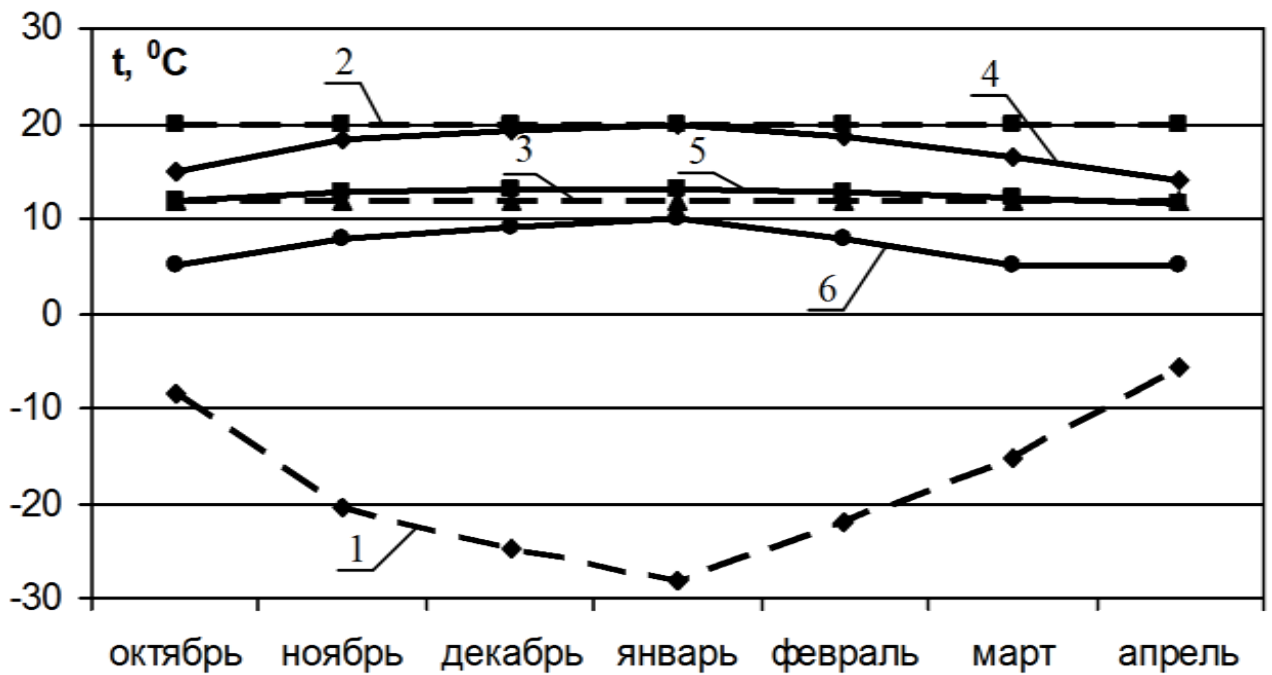
Были выполнены расчёты по вышеприведенной методике для помещения с высокой влажностью ( $\varphi_{\text{раб}} = 50\%$ ) для двухкамерного стеклопакета СПД 4М1-10-4М1-10-4И с использованием двух теплоотражающих экранов, установленных со стороны окружающей среды, для условий холодного периода в г. Москве и Норильске [108]. В рабочее время температура воздуха в обслуживаемой зоне  $t_{\text{раб}}^x$  принималась равной  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В помещении осуществляется рециркуляция воздуха, обработка воздуха осуществляется по схеме, представленной на рисунке 5.4. Результаты расчёта температуры приведены на рисунке 5.8 (а – для Москвы, б – для Норильска).

Согласно расчетам и полученным данным (см. рисунок 5.8, а) для условий Москвы при заданной начальной влажности воздуха  $\varphi_{\text{раб}}$  в помещении, равной  $50\%$ , и приведенному сопротивлению теплопередаче светопрозрачной части окна, равному  $0,61\text{ (м}^2\text{ }^{\circ}\text{C)/Вт}$ , в период с ноября по март месяц допустимая температура воздуха при дежурном режиме отопления при условии недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности ограждающей конструкции будет несколько выше нормируемого значения в  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  (для помещений общественных и административно-бытовых зданий). В случае использования двух теплоотражающих экранов в окнах температуру воздуха в некоторые месяцы можно будет понизить в нерабочее время до  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при дополнительном применении предварительной осушки воздуха – до  $5\div 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .





а)

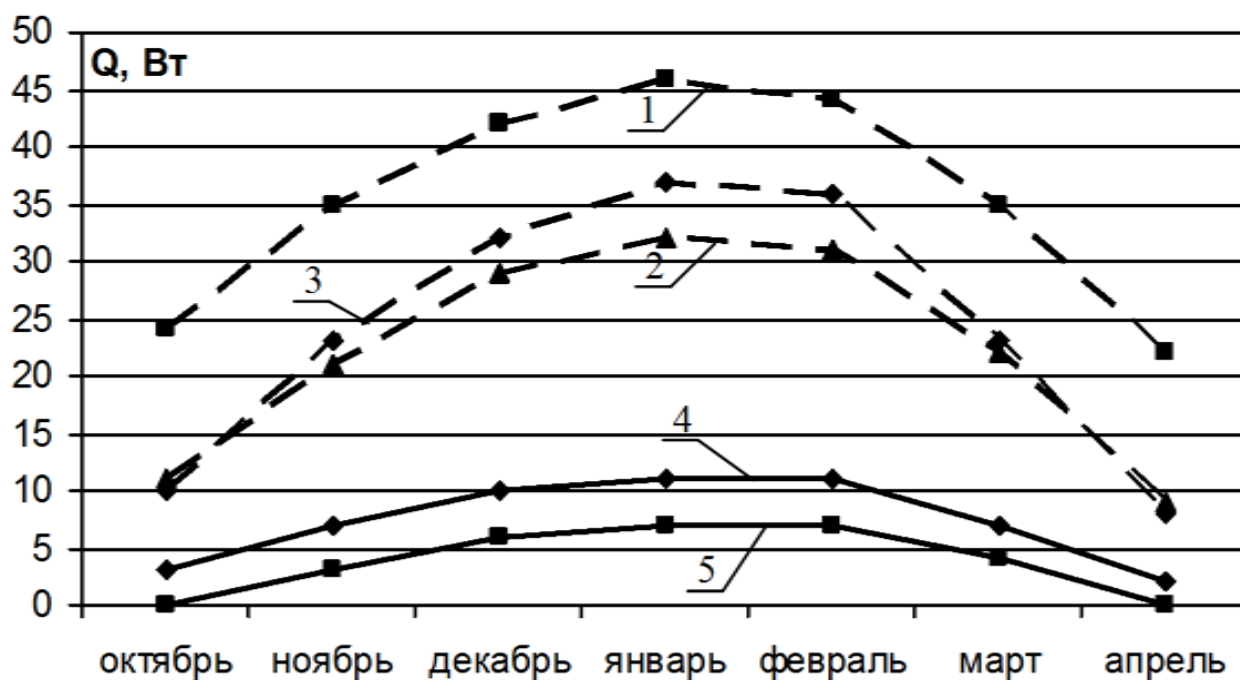


б)

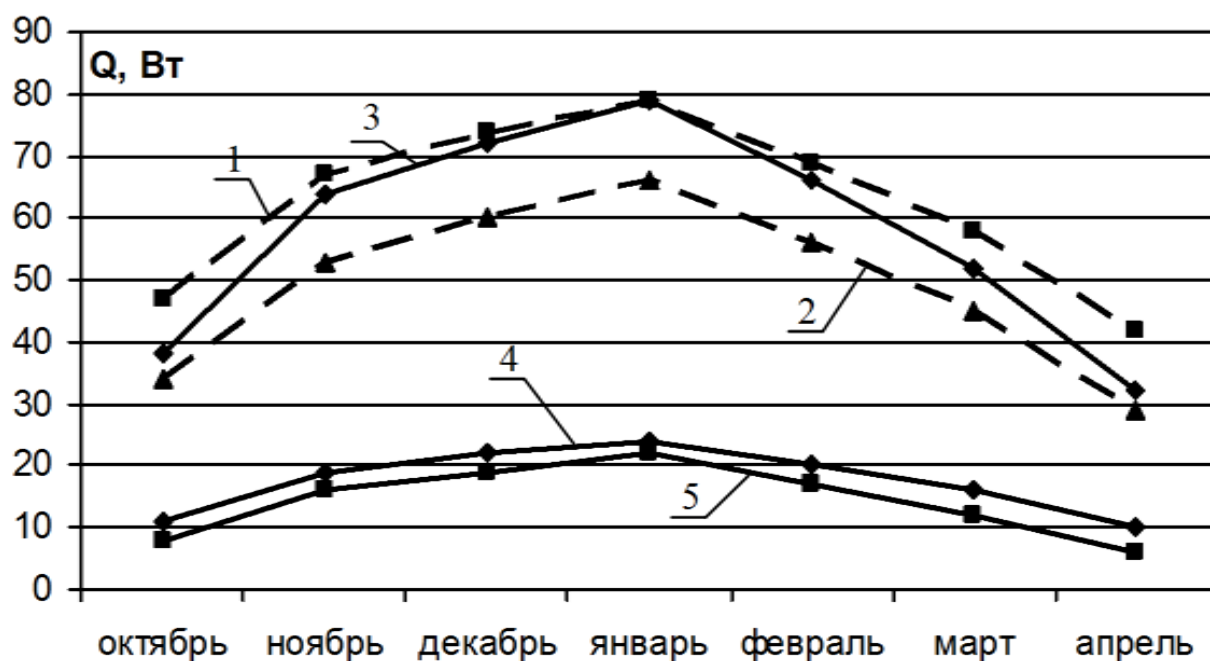
Рисунок 5.8 – Изменение температуры воздуха  $t$  при дежурном режиме отопления для среднемесячных условий холодного периода в Москве (а) и Норильске (б) в зависимости от вариантов использования экранов и осушки воздуха: 1 – среднемесячная температура наружного воздуха; 2 – температура внутреннего воздуха при рабочем режиме ( $t_{в. раб.} = 20^{\circ}\text{C}$ ); 3 – то же, при стандартных условиях дежурного режима отопления в  $t_{в. деж. ст} = 12^{\circ}\text{C}$ ; 4 – то же, при минимальной температуре дежурного режима исходя из условия недопущения конденсации без использования экранов  $t_{в. деж. б/э}$ ; 5 – то же, при использовании экранов в окнах  $t_{в. деж. с/э}$ ; 6 – то же, при использовании экранов в окнах и осушки воздуха  $t_{в. деж. с/э+осуш}$

Для суровых климатических условий г. Норильска (рисунок 5.8, б) получается ещё более наглядная картина. Так, в случае отсутствия теплоотражающего экрана в окнах температура при дежурном режиме отопления в январе нельзя будет опускать ниже значения  $t_{\text{раб}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , иначе будет наблюдаться выпадение конденсата на внутренней поверхности остекления, а в остальные месяцы температура будет значительно выше нормируемой  $t_{\text{вн. деж. ст.}}=12\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Использование экранов в окнах позволяет поддерживать температуру в пределах нормируемой и только совместное использование экранов и осушки воздуха позволяет понизить температуру воздуха до значений  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в октябре, марте, апреле, и до  $8\div 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  – в оставшиеся месяцы холодного периода.

На основании определения значений температуры внутреннего воздуха и приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции был выполнен расчет трансмиссионных тепловых потерь через светопрозрачную часть окна при использовании экранов и предварительной осушки воздуха для вышеуказанных условий. Согласно результатам расчета (см. рисунок 5.9) в январе для условий Москвы можно снизить тепловые потери через  $1\text{ м}^2$  светопрозрачной части окна с 46 Вт при поддержании в помещении постоянной температуры  $t_{\text{в}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до 11 Вт (или на 76%) в случае использования дежурного режима отопления, экранов в окнах или до 7 Вт (или на 85 %) в случае совместного использования экранов и осушки воздуха; для условий Норильска произойдет снижение со «стандартных» 79 Вт до 24 Вт (или на 70 %) в первом случае, и до 22 Вт (на 73 %) – во втором. Необходимо отметить, что относительное снижение тепловых потерь больше для условий Москвы, но для потребителя важным критерием является снижение в натуральных величинах, так как оно неразрывно связано с потреблением тепловой энергии и затратами на ТЭР, поэтому экономия теплоты для условий Норильска является более существенной. Для остальных месяцев холодного периода вышеуказанные тенденции сохраняются.



а)



б)

Рисунок 5.9 – Изменение тепловых потоков через окно при дежурном режиме отопления для среднемесячных условий отопительного периода в Москве (а) и Норильске (б) в зависимости от использования экранов и осушки воздуха при: 1 – температуре внутреннего воздуха при рабочем режиме ( $t_{в. раб.} = 20^{\circ}\text{C}$ ); 2 – то же, при стандартных условиях дежурного режима отопления в  $t_{в. деж. ст} = 12^{\circ}\text{C}$ ; 3 – то же, при минимальной температуре дежурного режима исходя из условия недопущения конденсации без экрана  $t_{в. деж. б/э}$ ; 4 – то же, при использовании экранов в окнах  $t_{в. деж. с/э}$ ; 5 – то же, при использовании экранов в окнах + осушки воздуха  $t_{в. деж. с/э+осуш.}$

Выполненные расчеты и выявленные закономерности подтверждают целесообразность использования разработанной методики определения минимальной температуры внутреннего воздуха при недопущении выпадения конденсата на внутренних поверхностях разработанных светопрозрачных конструкций при наличии и отсутствии предварительной осушки воздуха.

Данная методика передана в НКО Фонд "Энергоэффективность", г. Ярославль, где была признана полезной (акт передачи результатов диссертационной работы представлен в Приложении В). Методика использована при разработке рекомендаций по реконструкции лабораторий ИГЭУ, г. Иваново в части сокращения потребления тепловой энергии (Акт внедрения представлен в Приложении В); внедрена в учебный процесс ИГЭУ по кафедре промышленной теплоэнергетики при изучении дисциплин «Энергетические системы создания технологического и комфортного микроклимата» и «Испытание и наладка систем технологического и комфортного микроклимата», а также при выполнении обучающимися по данным направлениям научно-исследовательской и выпускной квалификационной работы (Акт внедрения представлен в Приложении В).

## **5.2 Разработка инженерного метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции за отопительный период с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации**

Для оценки энергетической эффективности применения теплоотражающих экранов в светопрозрачных конструкциях важным аспектом является определение количества тепловой энергии на поддержание заданных параметров воздуха при организации микроклимата за холодный (отопительный) период  $E_{om}$ , Дж. Данное количество тепловой энергии можно определить следующим образом [96]:

$$E_{om} = E_k + E_{инф} - E_{тв}, \quad (5.8)$$

где  $E_k$  – потери теплоты через наружные ограждающие конструкции, Дж;

$E_{инф}$  – затраты теплоты на нагрев инфильтрационного воздуха за холодный период, Дж;

$E_{тв}$  – суммарные тепловыделения за холодный период, Дж.

Трансмиссионные потери теплоты за отопительный период можно определить по формуле

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{к,i}^{\max} \cdot (t_g - t_n^{cp.om})}{(t_g - t_n^{расч})} \cdot \tau_{om}, \quad (5.9)$$

где  $Q_{к,i}^{\max}$  – расчетные (максимальные) потери теплоты через  $i$ -тые наружные ограждающие конструкции, Вт;

$t_n^{cp.om}$  – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °С;

$t_n^{расч}$  – расчетная температура наружного воздуха, °С;

$\tau_{om}$  – продолжительность отопительного периода, с.

Продолжительность отопительного периода  $\tau_{om}$  будет равна

$$\tau_{om} = 3600 \cdot 24 \cdot n_{om}, \quad (5.10)$$

где  $n_{om}$  – количество суток отопительного периода.

Потери теплоты через ограждающие конструкции необходимо определять по формуле

$$Q_{к,i}^{\max} = \frac{A_i}{R_i} \cdot (t_g - t_n^{расч}) \cdot (1 + \sum_{z=1}^6 \beta_z) \cdot n_i, \quad (5.11)$$

где  $A_i$  – расчетная площадь  $i$ -той ограждающей конструкции помещения или этажа, принимаемая по внутреннему обмеру помещения, м<sup>2</sup>;

$R_i$  – приведенное сопротивление теплопередаче  $i$ -той ограждающей конструкции, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;

$\sum_{z=1}^6 \beta_z$  – добавочные потери теплоты в долях от основных потерь [96];

$n_i$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху [96].

Следовательно, трансмиссионные потери теплоты за отопительный период можно определить как

$$E_k = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{A_i}{R_i} \cdot \left( 1 + \sum_{z=1}^6 \beta_z \right) \cdot n_i \right] \cdot (t_g - t_n^{cp.om}) \cdot \tau_{om}. \quad (5.12)$$

Для определения тепловых трансмиссионных потерь через светопрозрачные конструкции формулу (5.12) следует представить в виде

$$E_o = \frac{A_o}{R_o} \cdot \left( 1 + \sum_{z=1}^3 \beta_z \right) \cdot (t_g - t_n^{cp.om}) \cdot \tau_{om}. \quad (5.13)$$

Формулу (5.13) можно применять для светопрозрачных ограждающих конструкций, имеющих "условно" постоянное сопротивление теплопередаче в течение холодного периода года. В ходе предыдущих исследований было выявлено, что при использовании перемещаемых теплоотражающих экранов в светопрозрачных конструкциях приведенное сопротивление теплопередаче значительно изменяется, причем влияющими на сопротивление факторами являются не только материал и конфигурация экранов, но и температурный режим эксплуатации (см. разделы 3 и 4). Следовательно, для адекватного определения тепловых трансмиссионных потерь через светопрозрачные конструкции с экранами необходимо ввести в употребление новую расчетную величину – приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной конструкции за отопительный период  $\overline{R_{o,E}^{om}}$ . В таком случае, трансмиссионные потери  $E_o$  можно будет определить следующим способом:

$$E_o = \frac{A_o}{\overline{R_{o,E}^{om}}} \cdot \left( 1 + \sum_{z=1}^3 \beta_z \right) \cdot (t_g - t_n^{cp.om}) \cdot \tau_{om}. \quad (5.14)$$

Трансмиссионные потери также можно определить, учитывая текущее сопротивление теплопередаче разработанных энергосберегающих светопрозрачных конструкций  $R_{o,j}$ , полученное на основе разработанного в диссертации инженерного метода (см. подраздел 4.4), а также периода времени, при котором оно «условно» постоянно  $\tau_{R,j}$ . В данном случае используется термин «условно» постоянное сопротивление в связи с тем, что температурные условия эксплуатации кон-

струкции, которые влияют на сопротивление, меняются в течение суток из-за непостоянства температуры воздуха в помещении и окружающей среды. Для определения  $R_{o,j}$  принято допущение, что температурный режим в течение темного времени суток постоянен, так же, как и для светлого времени суток (но они не одинаковы и имеют разные значения для календарных месяцев (см. рисунок 2.5). Следовательно, трансмиссионные потери через разработанные светопрозрачные конструкции можно определить как

$$E_o = \sum_{j=1}^k \left( \frac{(t_{ej} - t_{nj})}{R_{o,j}} \cdot \tau_{R,j} \right) \cdot A_o \cdot \left( 1 + \sum_{z=1}^3 \beta_z \right), \quad (5.15)$$

где  $j$  – номер периода времени, при котором приведенное сопротивление теплопередаче условно постоянно;

$t_{ej}$ ,  $t_{nj}$  – усредненная температура внутреннего и наружного воздуха в  $j$ -тый момент времени, соответственно, °С.

Количество периодов времени  $k$  и их продолжительность  $\tau_{R,j}$ , для которых производится расчет, зависит от графика использования экранов в светопрозрачных конструкциях, а также от точности расчета. Так, для предприятий с графиком работы 5 дней в неделю наиболее целесообразно производить расчет для четырех периодов суток каждого календарного месяца отопительного периода (см. рисунок 2.7):

- а) экраны используются в рабочие дни;
- б) экраны не используются в рабочие дни;
- в) светлое время суток нерабочих дней и праздников (экраны используются);
- г) темное время суток нерабочих дней и праздников (экраны используются).

Текущее приведенное сопротивление данной ограждающей конструкции  $R_{o,j}$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ), можно определить по формуле

$$R_{o,j} = \frac{A_{ct} + A_p}{(A_{ct} / R_{o,j}^{ct}) + (A_p / R_{o,j}^p)}, \quad (5.16)$$

где  $A_{ст}$ ,  $A_p$  – соответственно, площади расчётной поверхности светопропускающей и непрозрачной частей оконного блока,  $m^2$ ;

$R_{o,j}^{ст}, R_{o,j}^p$  – соответственно, текущее приведенное сопротивление теплопередаче светопропускающей и непрозрачной частей,  $(m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$ .

Таким образом, после математических преобразований приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной конструкции за отопительный период  $\overline{R_{o,E}^{om}}$  можно найти по следующей формуле:

$$\overline{R_{o,E}^{om}} = \frac{(t_в - t_n^{cp.om}) \cdot \tau_{om}}{\sum_{j=1}^k \left( \frac{(t_{вj} - t_{nj})}{R_{o,j}} \cdot \tau_{R,j} \right)} \quad (5.17)$$

Для определения средневзвешенного значения приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной ограждающей конструкции за отопительный период необходимо использовать выражение

$$\overline{R_{o,сп.взв}^{om}} = \frac{\tau_{om}}{\sum_{j=1}^k \frac{\tau_{R,j}}{R_{o,j}}} \quad (5.18)$$

Для обоснования целесообразности применения разработанного инженерного метода был проведен анализ возможности использования экранов в светопрозрачных конструкциях для нескольких городов Российской Федерации, представляющих различные климатические зоны. В качестве светопрозрачной конструкции рассматривался двухкамерный стеклопакет СПД 4М1-10-4М1-10-4М1, в котором со стороны окружающей среды применяются три металлических теплоотражающих экрана сплошного вида, причем расстояние между экранами составляет 10 мм. В качестве населенных пунктов были выбраны следующие города: Сочи, Москва, Иваново, Мурманск, Норильск. Два последних населенных пункта интересны тем, что находятся за полярным кругом на одной географической широте (68 и 69 градусов северной широты, соответственно) и в данных городах в декабре можно наблюдать полярные ночи, и, следовательно, в этот период экраны в светопрозрачных конструкциях можно использовать круглосуточно (см. рисунок 2.3). В подразделе 2.1 был проведен анализ климатических характеристик

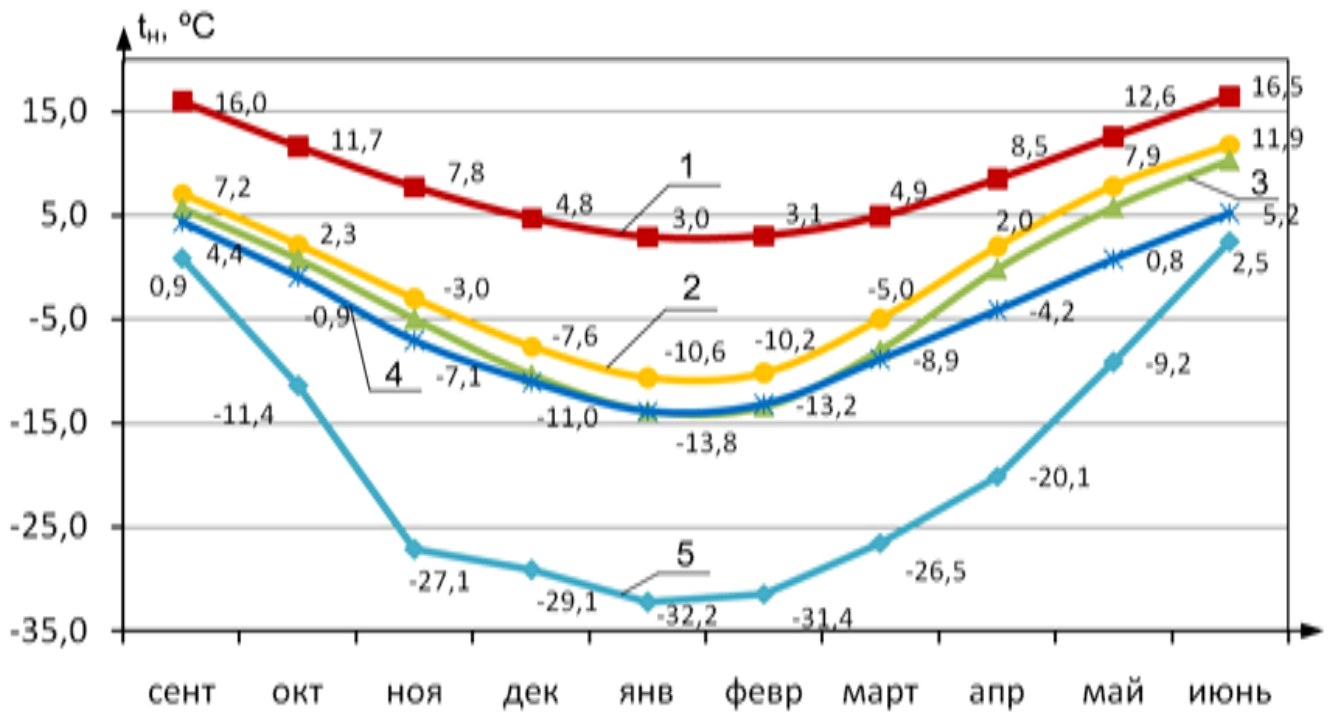


вышеуказанных городов, в том числе определены продолжительность отопительного периода  $n_{от}$ , средняя  $t_n^{cp.om}$  и расчетная  $t_n^{расч}$  температуры воздуха за отопительный период (см. таблицу 2.3), выявлено изменение средней месячной температуры  $t_{мес}$  и средней суточной амплитуды температуры  $\Delta t_{сут}$  наружного воздуха (см. рисунки 2.4, 2.5), а также рассчитана продолжительность времени использования теплоотражающих экранов при 9-ти часовом рабочем дне и количество рабочих дней для 2021 года (см. рисунок 2.3, таблицу 2.2).

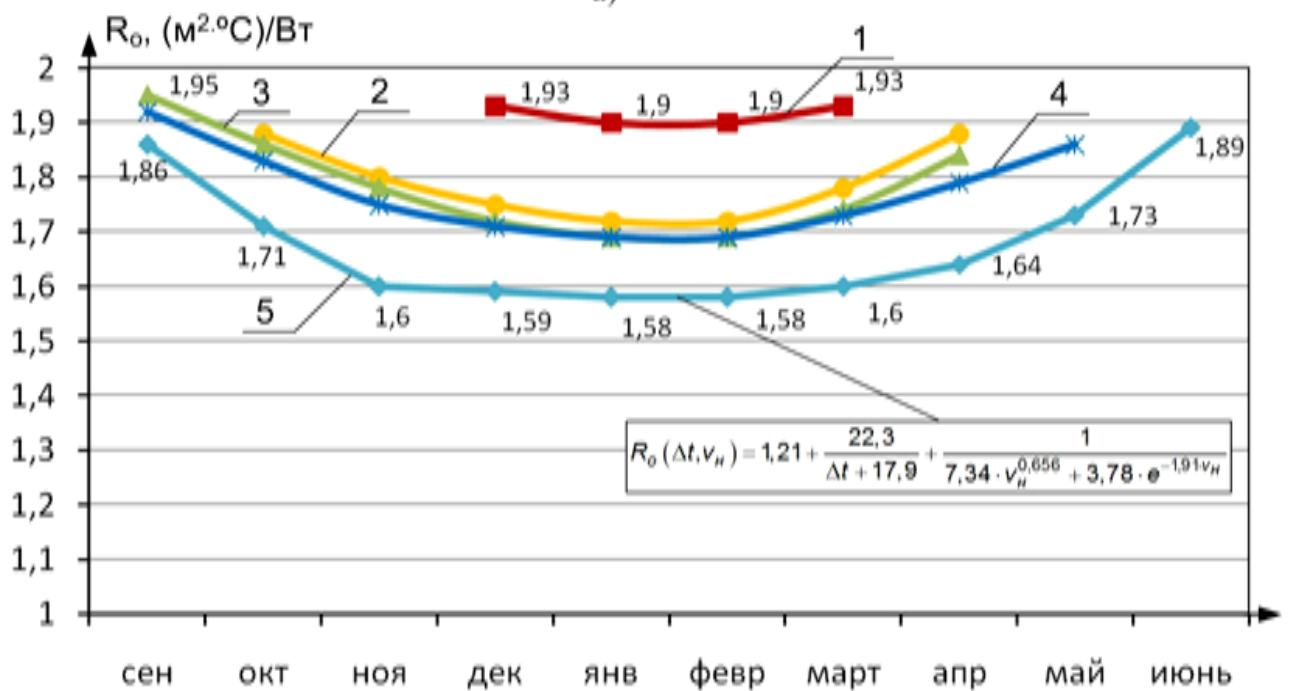
При выполнении расчета температура воздуха в помещении  $t_b$  принималась постоянной и равной  $+20$  °С, скорость наружного воздуха  $v_b = 5$  м/с. Моделирование осуществлялось для случая естественной конвекции у поверхности светопрозрачной конструкции, обращенной в сторону помещения.

Приведенное сопротивление теплопередаче стеклопакета без экранов было принято равным  $0,47$  ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт, с тремя экранами было определено по формуле (4.32). На рисунке 5.10 представлено изменение температуры наружного воздуха и приведенного сопротивления теплопередаче СПД с тремя металлическими теплоотражающими экранами для темного времени суток по рассматриваемым городам.

Анализ рисунка 5.10 и таблицы 2.3 показывает, что самая долгая продолжительность отопительного периода (296 суток) относится к условиям Норильска, в этом же населенном пункте наблюдается и самая низкая расчетная температура наружного воздуха – минус  $47$  °С. В ходе расчетов было определено, что минимальная температура наружного воздуха для г. Норильска в темное время суток составляет минус  $32,2$  °С и фиксируется в январе месяце. Для данных условий на рисунке 5.10 можно констатировать самое низкое значение приведенного сопротивления теплопередаче  $R_{o,j}$ , равное  $1,58$  ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт. Максимальное значение приведенного сопротивления теплопередаче конструкции относится к климатическим условиям сентября для г. Иваново и составляет  $1,95$  ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт.



а)



б)

Рисунок 5.10 – Изменение температуры наружного воздуха  $t_n$  (а) и приведенного сопротивления теплопередаче  $R_{o,j}$  (б) СПД с 3 экранами для темного времени суток в течение холодного периода для условий городов: 1 – Сочи ( $n = 93$  дня); 2 – Москва ( $n = 204$  дня); 3 – Иваново ( $n = 214$  дней); 4 – Мурманск ( $n = 273$  дня); 5 – Норильск ( $n = 296$  дней)

Если сравнивать соотношение приведенного сопротивления теплопередаче по городам отдельно для каждого месяца, то минимальные значения данной физической величины наблюдаются для г. Норильска, максимальные – для г. Сочи. График изменения  $R_{o,j}$  для г. Норильска на рисунке 5.10, б располагается ниже всех остальных, что связано с более суровыми погодными условиями в данном населенном пункте (см. рисунок 5.10, а). Сопротивление теплопередаче значительно зависит от температуры наружного воздуха: так, для условий г. Норильска  $R_{o,j}$  изменяется от 1,58 (для января-февраля,  $t_n = -32,2$  °С) до 1,89 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (для июня,  $t_n = 2,5$  °С), разность значений составляет 0,31 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или 19,6 %).

Для принятых климатических условий были определены значения приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции за отопительный период  $\overline{R_{o,E}^{om}}$  (по формуле (5.17), а также средневзвешенные значения данной величины  $\overline{R_{o,sp.636}^{om}}$  (по формуле (5.18)). Результаты расчетов представлены на рисунке 5.11.

Анализ рисунка 5.11 показывает, что значения приведенного сопротивления теплопередаче за отопительный период  $\overline{R_{o,E}^{om}}$  незначительно больше средневзвешенных значений  $\overline{R_{o,sp.636}^{om}}$ , разность между ними составляет от 0,05 до 0,09 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или от 4,5 до 8,4 %). Значения среднего за отопительный период сопротивления теплопередаче СПД с теплоотражающими экранами в 2,4÷2,6 раза больше, чем без них. Сопротивление  $\overline{R_{o,E}^{om}}$  для разных климатических условий незначительно меняется от 1,16 до 1,24 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С}/\text{Вт}$ ) (или на 10,7 %), причем максимальные значения отмечаются для условий г. Сочи и Мурманска.

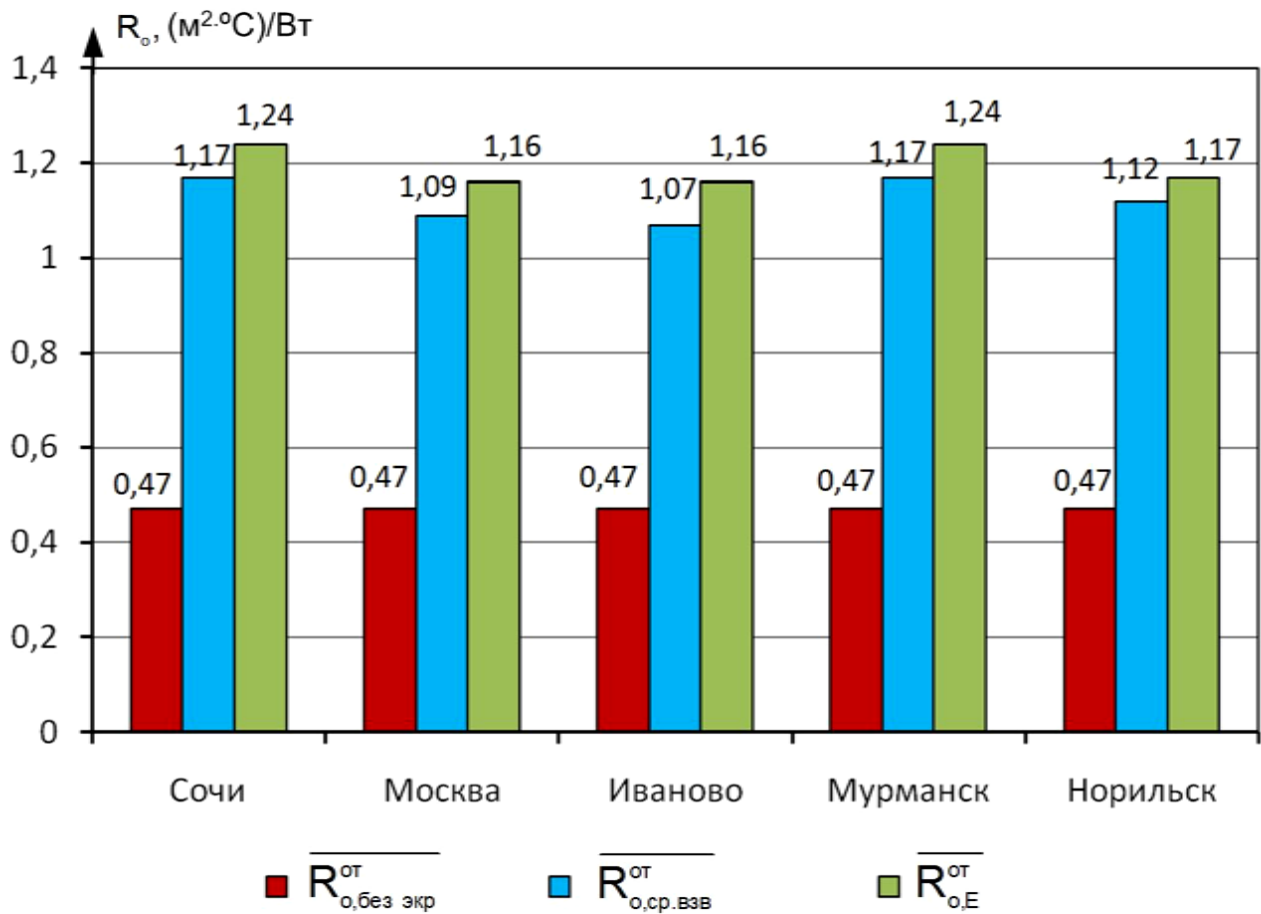


Рисунок 5.11 – Приведенные сопротивления теплопередаче СПД с тремя экранами по городам (среднее за отопительный период):  $\overline{R_{o, без\ экр}^{от}}$  – без использования экранов;  $\overline{R_{o, ср. вэв}^{от}}$  – средневзвешенное;  $\overline{R_{o, E}^{от}}$  – определенное по тепловым потерям  $E$

Необходимо отметить тот факт, что для городов Мурманска и Норильска, находящихся на одной и той же географической широте, сопротивление  $\overline{R_{o, E}^{от}}$  будет отличаться на  $0,07$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ) (или на  $6,0$  %), что связано с более суровыми погодными условиями в Норильске и более низкими значениями сопротивления  $R_{o, j}$  (см. рисунок 5.10). Текущее сопротивление  $R_{o, j}$  для города Норильска изменяется от значения  $0,47$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ) (при отсутствии экранов) до  $1,58 \div 1,89$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ) (при наличии экранов) (увеличение в  $4,0$  раза), следовательно, разность между  $R_{o, j}$  и  $\overline{R_{o, E}^{от}}$  составляет от минус  $0,7$  до плюс  $0,72$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ) (или от минус  $60$  до плюс  $61,5$  %), что подтверждает актуальность нахождения среднего за отопительный период сопротивления  $\overline{R_{o, E}^{от}}$  для обоснования энергетической эффек-

тивности использования экранов в светопрозрачных конструкциях с учетом климатических условий и графика их применения.

В ходе исследования также были определены трансмиссионные потери теплоты  $E_o$ , ГДж/м<sup>2</sup>, через поверхность СПД с тремя экранами, равной один квадратный метр, за отопительный период для условий вышеуказанных городов. Результаты расчетов представлены на рисунке 5.12.

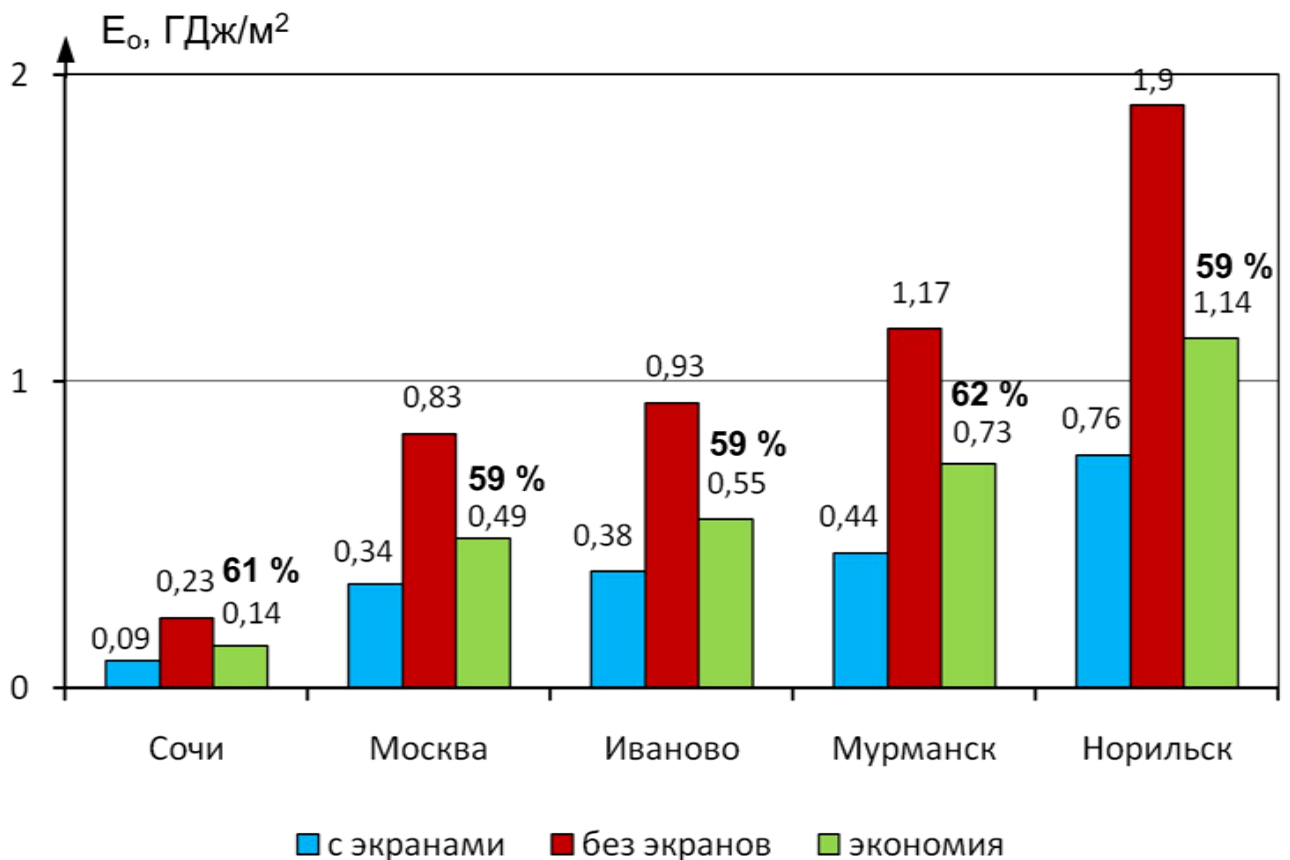


Рисунок 5.12 – Трансмиссионные потери теплоты  $E_o$  через СПД (с 1 квадратного метра поверхности), а также экономия  $\Delta E_o$  тепловой энергии за отопительный период для различных городов в случае использования 3 экранов

Анализ рисунка 5.12 свидетельствует о том, что наибольшие трансмиссионные тепловые потери за отопительный период закономерно наблюдаются для условий г.Норильска и составляют 1,9 ГДж/м<sup>2</sup> для случая отсутствия экранов, 0,76 ГДж/м<sup>2</sup> – при наличии. Экономия тепловой энергии составляет 1,14 ГДж/м<sup>2</sup>

(или 59 %). Наименьшие тепловые потери имеют место для условий г. Сочи: 0,23 и 0,09 ГДж/м<sup>2</sup>, соответственно (или в 8,3 раза меньше).

Экономия тепловой энергии  $\Delta E_o$  за отопительный период на компенсацию трансмиссионных тепловых потерь через светопрозрачную конструкцию при использовании трех теплоотражающих экранов будет находиться в диапазоне от 0,14 ГДж/м<sup>2</sup> (для г. Сочи) до 1,14 ГДж/м<sup>2</sup> (для г. Норильска), причем экономия  $\Delta E_o$  в относительных единицах составит 59÷62 %. Следовательно, можно говорить о средней экономии тепловой энергии при использовании экранов в ограждающих конструкциях для вышеуказанных условий их применения около 60 %.

Для других климатических условий и графика использования экранов требуется индивидуальный расчет  $\overline{R_{o,E}^{om}}$ .

Таким образом, разработанный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей светопрозрачной конструкции позволяет оперативно и достоверно оценить энергетическую эффективность использования теплоотражающих экранов при индивидуальных для рассматриваемого объекта графиках их применения и температурных режимах эксплуатации за отопительный период. Текущие значения приведенного сопротивления теплопередаче конструкции с экранами значительно изменяются, а интегральный подход предоставляет возможность их качественно усреднить по времени для последующих инженерно-технических и экономических расчетов.

Данный инженерный метод расчета передан в НКО Фонд "Энергоэффективность", г. Ярославль, где был признан целесообразным к применению (акт передачи результатов диссертационной работы представлен в Приложении В). Метод внедрен в учебный процесс ИГЭУ по кафедре промышленной теплоэнергетики при изучении дисциплин «Энергетические системы создания технологического и комфортного микроклимата» и «Испытание и наладка систем технологического и комфортного микроклимата», а также при выполнении обучающимися по данным направлениям научно-исследовательской и выпускной квалификационной работы (Акт внедрения представлен в Приложении В).

### **5.3 Определение энергосберегающего эффекта от применения теплоотражающих экранов, жалюзи в окнах и дежурного режима отопления при создании микроклимата в производственном помещении промышленного предприятия**

При обосновании целесообразности применения разработанных энергосберегающих мероприятий особое значение приобретает определение энергетического эффекта от их использования для действующих объектов при различных режимах работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха в помещениях. Данные системы оказывают важное влияние на создание микроклимата в помещении, самочувствие и производительность труда сотрудников [19], а также на тепловые технологические процессы и качество продукции в технологических процессах. Особой важностью обладает сбережение энергетических ресурсов и уменьшение энергетических затрат на единицу продукции.

#### **5.3.1 Описание производственного помещения ремонтно-механического цеха**

В первом разделе диссертационной работы было отмечено, что затраты на поддержание необходимых параметров микроклимата в помещении (отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха) занимают весомую часть в себестоимости продукции, особенно для машиностроительных предприятий (см. таблицу 1.6), поэтому в качестве объекта исследования было выбрано производственное помещение ремонтно-механического цеха (далее РМЦ) АО "ПСК", входящего в машиностроительную группу «КРАНЭКС», специализирующейся на производстве гидравлических гусеничных экскаваторов, специального оборудования и запасных частей к строительной технике и других видов продукции. Основные производственные мощности машиностроительной группы расположены в г. Иваново.

В производственном помещении РМЦ осуществляют ремонт оборудования, в том числе различных машиностроительных станков, изготовление некоторых деталей для экскаваторов. К основному технологическому оборудованию, установленному в РМЦ, относятся станки различного вида (токарно-винторезные, сверлильные, фрезерные и т.д.), а также гидравлические прессы.

Необходимые допустимые параметры микроклимата в помещении поддерживаются с помощью системы водяного (регистры из гладких труб) и воздушного (воздушно-отопительные агрегаты) отопления, а также общеобменной и местной (около некоторых станков) вытяжной механической вентиляции. Для защиты производственного помещения РМЦ от проникновения холодного наружного воздуха в проеме ворот установлены две тепловые завесы.

Трехмерная модель, а также внешний вид здания РМЦ представлены на рисунках 5.13 и 5.14.

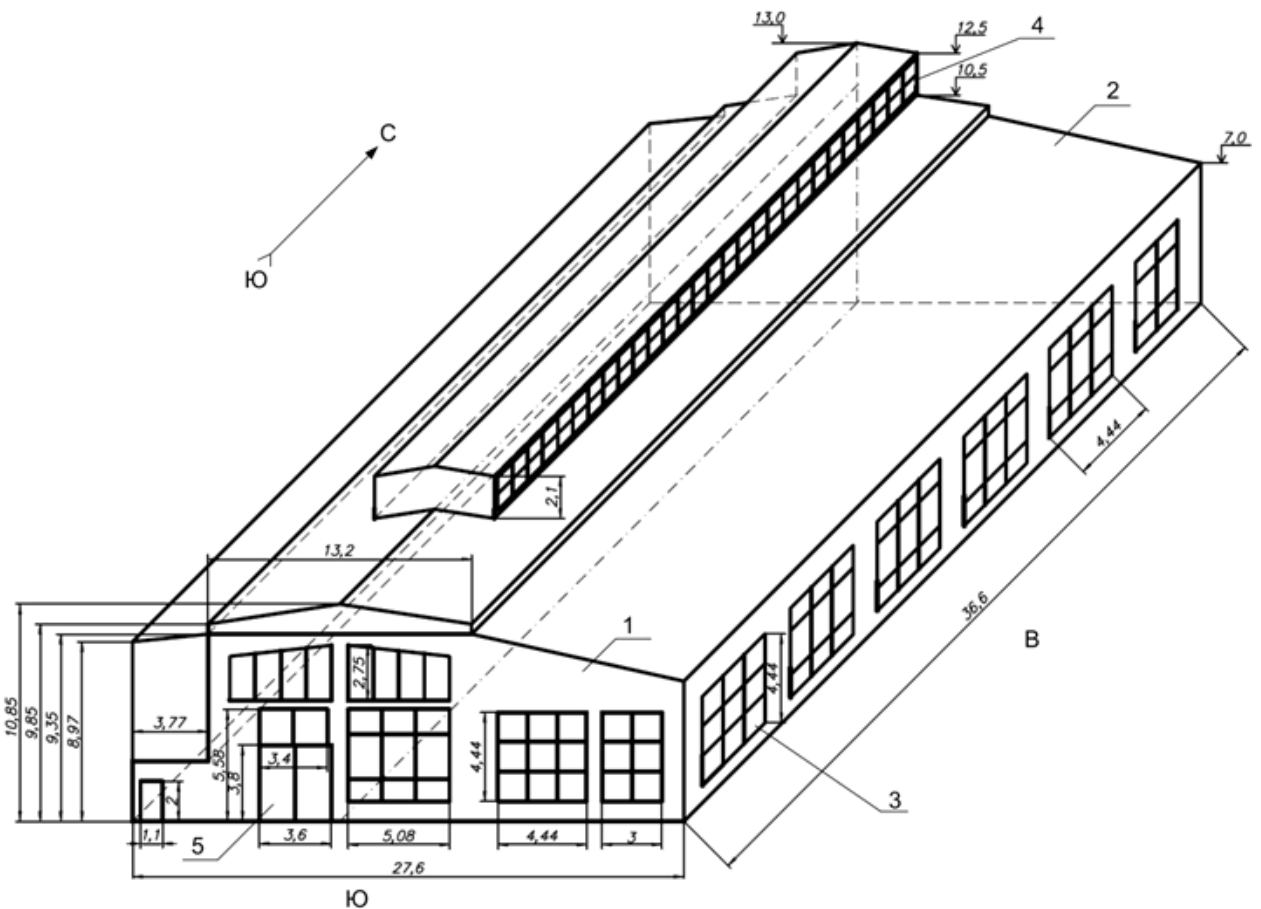


Рисунок 5.13 – Трехмерная модель здания РМЦ: 1 – кирпичные стены; 2 – покрытие; 3 – окна; 4 – ленточное остекление светового фонаря; 5 – ворота





а)



б)

Рисунок 5.14 – Внешний вид ограждающих конструкций здания РМЦ со стороны главного (а) и бокового восточного (б) фасада

С северной стороны производственное помещение РМЦ через кирпичную несущую перегородку граничит с производственным помещением инструментального цеха, с западной – с бытовыми помещениями.

Несущие стены выполнены в виде оштукатуренной кладки из силикатного сплошного кирпича на цементно-песчаном растворе (толщиной в два кирпича), приведенное сопротивление теплопередаче стен составляет  $R_{cm} = 0,89$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт (см. таблицу 5.3); окна – двойное остекление из обычного стекла в отдельных (боковой фасад) и спаренных (главный фасад) деревянных переплетах, причем приведенное сопротивление теплопередаче  $R_o$  равняется 0,44 и 0,40 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт, соответственно. Покрытие, выполненное в виде двускатной многоуровневой крыши, включает в себя следующие слои: 4 слоя рубероида на битумной стяжке, цементную стяжку, листы асбестоцементные. Пол, выполненный на грунтовом основании, представляет собой следующую конструкцию: железобетонная подушка покрыта облицовочной железной перфорированной плиткой. Световой фонарь выполнен в виде ленточного двойного остекления в спаренном деревянном переплете, ворота – дощатого щита из сосны, обитого железом.

Были определены площади ограждающих конструкций, действительное приведенное сопротивление теплопередаче  $R$ , а также сопротивления, отвечаю-

щие требованиям энергосбережения  $R^{req}$  и санитарно-гигиеническим и комфортным условиям  $R^{sh}$  [96, 127] (см. таблицу 5.3).

Таблица 5.3 – Сравнение действительного и нормированного приведенного сопротивления теплопередаче для ограждающих конструкций производственного помещения здания РМЦ

Тип ограждающей конструкции	Площадь поверхности $A$ , м <sup>2</sup>	Приведенное сопротивление теплопередаче $R$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт		
		действительное	определенное исходя из условий энергосбережения $R^{req}$ [127]	отвечающее санитарно-гигиеническим и комфортным условиям $R^{sh}$ [96, 127]
Несущие стены	298	0,89	1,85	1,17
Окна	201	0,40 / 0,44	0,31	0,31
Световой фонарь	126	0,40	0,26	0,15
Покрытие	1073	0,33	2,6	1,47
Ворота	13,7	0,83	1,11	-

Анализ данных таблицы 5.3 позволяет сделать вывод, что значения действительного приведенного сопротивления теплопередаче несущих стен, а также покрытия не соответствует требованиям ни в области энергосбережения, ни санитарно-гигиеническим и комфортным условиям. Так, сопротивление существующей стены  $R_{cm}$  в 2,1 раза меньше требуемого  $R_{cm}^{req}$ , а покрытия – **в 7,9 раза!** Необходимо также отметить высокий процент остекления при достаточно низком значении приведенного сопротивления теплопередаче: площадь светопрозрачных ограждающих конструкций (окна, световой фонарь) составляет 52 % от общей поверхности стены, а  $R_o$  находится в диапазоне от 0,40 до 0,44 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт.

В рамках выполнения диссертационного исследования были составлены балансы по вредностям для производственного помещения, в том числе тепловой баланс для рабочего и нерабочего времени суток холодного периода года, а также рабочего времени суток теплого периода. Значения статьи теплотеря и тепловыделений, а также теплового баланса приведены в таблице 5.4. Согласно данным [123] расчетная температура наружного воздуха  $t_n^{расч}$  для холодного периода принята равной минус 29 °С. Расчетная температура внутреннего воздуха  $t_b$  для категории работ средней тяжести «II б» задавалась равной +15°С [26, 108].

Таблица 5.4 – Статьи теплопотерь и тепловыделений  $Q$ , а также тепловой баланс  $\Delta Q$ , кВт, для производственного помещения здания РМЦ в различные расчетные периоды

Наименование статьи теплопотерь / тепловыделений	Холодный период года		Теплый период года
	рабочее время	нерабочее время	рабочее время
Теплопотери			
Наружные стены	16,3	16,3	–
Светопрозрачные ограждающие конструкции	39,8	39,8	–
Покрытие	148,2	148,2	–
Пол	6,1	6,1	–
Инфильтрация	19,0	19,0	–
Тепловыделения			
Оборудование	6,62	–	6,62
Персонал	2,52	–	2,46
Искусственное освещение	8,8	–	8,8
Инсоляция	10,0	–	56,1
Тепловой баланс			
Избыток (+) / недостаток (-) теплоты	-201,5	-229,4	+74,0

Среди теплопотерь через ограждающие конструкции максимальное значение относится к покрытию (148,2 кВт или 65 %), что связано с высоким значением площади поверхности и низким показателем приведенного сопротивления теплопередаче (см. таблицу 5.3). Самые высокие теплопоступления в теплый период среди всех статей относятся к инсоляции (56,1 кВт или 76 %).

### 5.3.2 Тепловизионное обследование поверхностей ограждающих конструкций здания РМЦ

В рамках диссертационной работы было выполнено тепловизионное обследование поверхностей ограждающих конструкций на основе требований [36]. При обследовании использовали тепловизор TESTO-882. Исследования проводили при температуре наружного воздуха  $t_{н}$ , равной 0 °С, внутреннего  $t_{в}$  – плюс 18 °С, во время предзакатных сумерек.

Термограммы и фотографии наружных поверхностей ограждающих конструкций представлены на рисунке 5.15, внутренних – на рисунке 5.16.

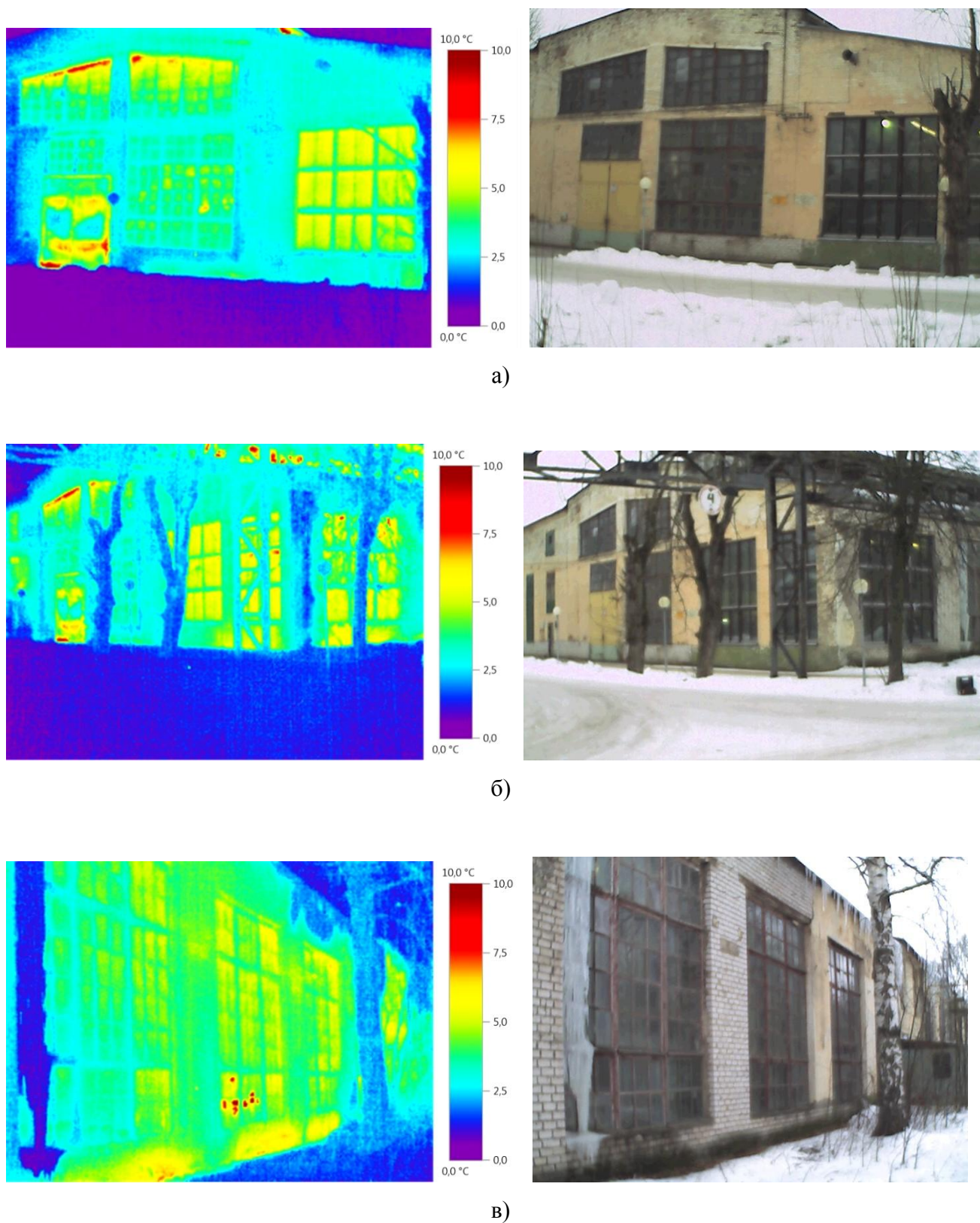


Рисунок 5.15 – Термограммы и фотографии наружных поверхностей ограждающих конструкций здания РМЦ со стороны главного (а, б) и бокового (в) фасадов

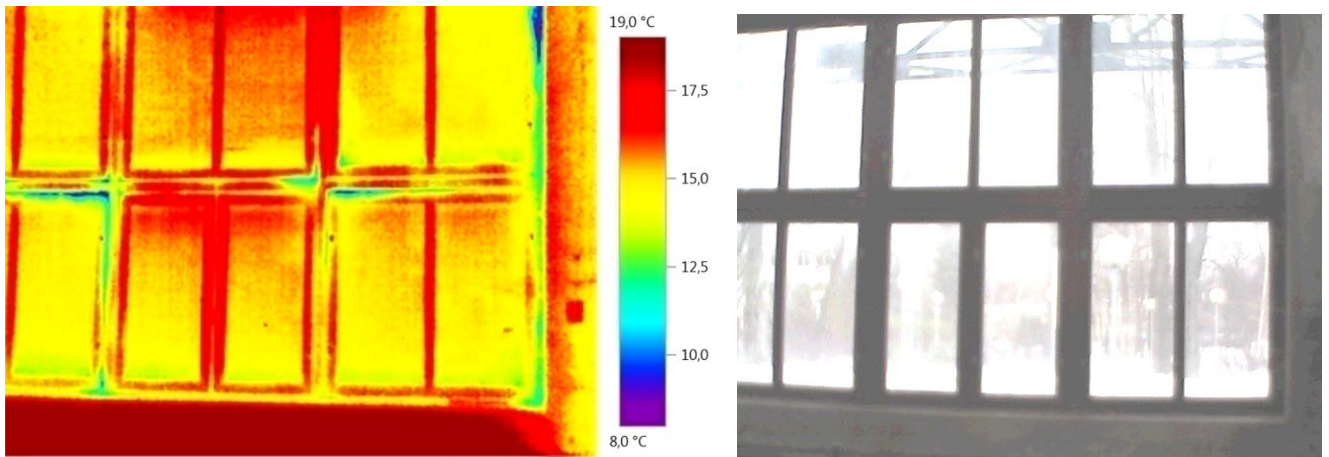


Рисунок 5.16 – Термограмма и фотография внутренней поверхностей окна на главном фасаде здания РМЦ

Высокие значения температур на наружной поверхности ограждающих конструкций (см. рисунок 5.15) можно отметить в зоне расположения окон и светового фонаря ( $t_{\text{пов}} = 4,3 \div 6,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), ворот ( $t_{\text{пов}} = 5,3 \div 7,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ ), а также в области стен (под окнами), где размещены отопительные приборы ( $t_{\text{пов}} = 5,3 \div 6,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ). Следовательно, в данных зонах присутствуют значительные тепловые потери из помещения в окружающую среду. Данные потери вызваны небольшим сопротивлением теплопередаче вышеуказанных конструкций, в том числе и вследствие насыщения их влагой в нижней части стен. Температура поверхности окон в спаренных переплетах выше, чем в отдельных, что связано с различием в  $R_o$ . Низкое значение приведенного сопротивления теплопередаче покрытия подтверждает факт наличия висячей наледи (сосульки) у края карниза крыши (см. рисунок 5.15, в).

При анализе термограммы внутренней поверхности ограждающих конструкций (см. рисунок 5.16) было выявлено, что температура на внутренней поверхности окна лежит в диапазоне от 12,6 до 16,8 °C, что несколько выше расчетных: этот факт объясняется наличием отопительных приборов, расположенных под данной светопрозрачной конструкцией. В местах примыкания окон к откосам наблюдаются зоны с пониженными температурами, что определяется поступлением в помещение холодного инфильтрационного наружного воздуха.

### 5.3.3 Разработка и оценка энергетической эффективности мероприятий по снижению затрат ТЭР на поддержание параметров микроклимата в производственном помещении

На первом этапе реконструкции тепловой защиты здания было принято решение повысить значения приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций до целесообразных. Для достижения данной цели было рекомендовано:

– для наружных стен и покрытия разместить теплоизоляцию из экструзионного пенополистирола различной плотности, толщиной 70 мм и 80 мм, соответственно;

– в качестве светопрозрачной конструкции для окон и светового фонаря выбрать двойное остекление с твердым селективным покрытием в отдельных переплетах со значением  $R_o = 0,57 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$  [96, 127].

Данное решение позволило уменьшить расчетные трансмиссионные тепловые потери через ограждающие конструкции на 153,5 кВт или на 73% (см. таблицу 5.5). Самый значительный энергосберегающий эффект дало утепление покрытия: тепловые потери снизились на 131,5 кВт (или на 89 %).

Таблица 5.5 – Изменение расчетных тепловых трансмиссионных потерь через наружные ограждающие конструкции производственного помещения РМЦ после первого этапа реконструкции для рабочего времени холодного периода года

Тип ограждающей конструкции Наружные стены	Приведенное сопротивление теплопередаче $R$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$		Расчетные трансмиссионные тепловые потери через конструкции					
			действительное $Q_d$		После 1 этапа реконструкции $Q_{рек1}$		Снижение потерь $\Delta Q$ ,	
	действительное	после реконструкции	кВт	% от $\Sigma Q_d$	кВт	% от $\Sigma Q_{рек1}$	кВт	% от $Q_d$
Наружные стены	0,89	2,64	16,3	8	5,5	10	10,8	66
Покрытие	0,33	2,9	148,2	70	16,7	29	131,5	89
Окна и световой фонарь	0,40÷0,44	0,57	39,8	19	28,6	50	11,2	28
Пол	2,36÷14,56	2,36÷14,56	6,1	3	6,1	11	-	-
Итого ( $\Sigma Q$ ):			210,4	100	56,9	100	153,5	73

После первого этапа реконструкции тепловой защиты здания половина тепловых трансмиссионных потерь стала приходиться на светопрозрачные конструкции, а именно 28,6 кВт (или 50 %). В теплый период года через светопрозрачные конструкции в помещение поступает значительный инсоляционный поток  $Q_{\text{инс}}$ , равный 56,1 кВт (или 76 % от всех тепловыделений).

На основании проведенного анализа на втором этапе реконструкции здания РМЦ было предложено:

- в холодный период года использовать в пространстве, ограниченном слоями остеклениями светопрозрачных конструкций (окна, световой фонарь) в отдельных переплетах, в темное время суток или во время отсутствия людей (см. рисунок 2.7) два рулонных сплошных металлических теплоотражающих экрана (см. рисунок 2.14), позволяющих значительно снизить трансмиссионные потери;

- в холодный период года в нерабочее время организовать дежурный режим отопления, причем минимальную температуру внутреннего воздуха  $t_{\text{в}}$  ограничить значением, равным 5 °С;

- для снижения инсоляции в теплое время года, вызывающих значительный избыток теплоты, но сохранения плавного регулирования поступления дневного света в помещение применить в межстекольном пространстве светопрозрачных конструкций металлические жалюзи, с изменяемым углом поворота ламелей.

Благодаря применению разработанного инженерного метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции с теплоотражающими экранами в текущий момент времени на основе аппроксимации результатов математического моделирования было определено, что при расчетных параметрах наружного воздуха ( $t_{\text{н}} = -29$  °С;  $v_{\text{н}} = 3,7$  м/с) [123]  $R_o$  светопрозрачных конструкций, представляющих собой двойное остекление с твердым селективным покрытием в отдельных переплетах, при использовании двух теплоотражающих экранов составит: 1,42 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт при температуре внутреннего воздуха  $t_{\text{в}} = +15$ °С (рабочая смена); 1,53 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт при  $t_{\text{в}} = +5$ °С (дежурный режим отопления).

Значение коэффициента теплопропускания солнцезащитного устройства  $k_{сзу}$ , используемого для определения теплопоступления в результате солнечной радиации  $Q_{о.лиц}(\tau)$  (формула (4.84)), было принято для случая применения металлических жалюзи в светопрозрачных конструкциях из таблицы 15 СП 23-101-2004 "Проектирование тепловой защиты зданий" [124] равным 0,35 (для солнцезащитных устройств с пластинами под углом  $90^\circ$  к плоскости проема).

В таблице 5.6 и рисунке 5.17 приведены данные по снижению тепловых трансмиссионных потерь для холодного периода года в случае применения экранов в светопрозрачных конструкциях и дежурного режима отопления (второй этап реконструкции) относительно действительных потерь в существующих конструкциях, а на рисунке 5.18 – относительно первого этапа реконструкции.

Таблица 5.6 – Изменение расчетных тепловых трансмиссионных потерь через наружные ограждающие конструкции производственного помещения РМЦ после второго этапа реконструкции (применение теплоотражающих экранов в светопрозрачных конструкциях и дежурного режима отопления) для холодного периода года

Тип ограждающей конструкции Наружные стены	Приведенное сопротивление теплопередаче $R$ , ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт		Расчетные трансмиссионные тепловые потери через конструкции					
			действительное $Q_d$		После 2 этапа реконструкции $Q_{рек2}$		Снижение потерь $\Delta Q$	
	действительное	после реконструкции	кВт	% от $\Sigma Q_d$	кВт	% от $\Sigma Q_{рек2}$	кВт	% от $Q_d$
Рабочее время ( $t_b = +15^\circ C$ )								
Наружные стены	0,89	2,64	16,3	8	5,5	14	10,8	66
Покрытие	0,33	2,9	148,2	70	16,7	41	131,5	89
Окна и световой фонарь	0,40÷0,44	1,42 (0,56)	39,8	19	11,4	29	28,4	71
Пол	2,36÷14,56	2,36÷14,56	6,1	3	6,1	16	-	-
Итого ( $\Sigma Q$ ):			210,4	100	39,7	100	170,7	81
Нерабочее время ( $t_b = +5^\circ C$ при дежурном режиме отопления)								
Наружные стены	0,89	2,64	16,3	8	4,5	15	11,8	72
Покрытие	0,33	2,9	148,2	70	13	42	135,2	92
Окна и световой фонарь	0,40÷0,44	1,53 (0,56)	39,8	19	8,8	28	31	78
Пол	2,36÷14,56	2,36÷14,56	6,1	3	4,7	15	1,4	23
Итого ( $\Sigma Q$ ):			210,4	100	31	100	179,4	85



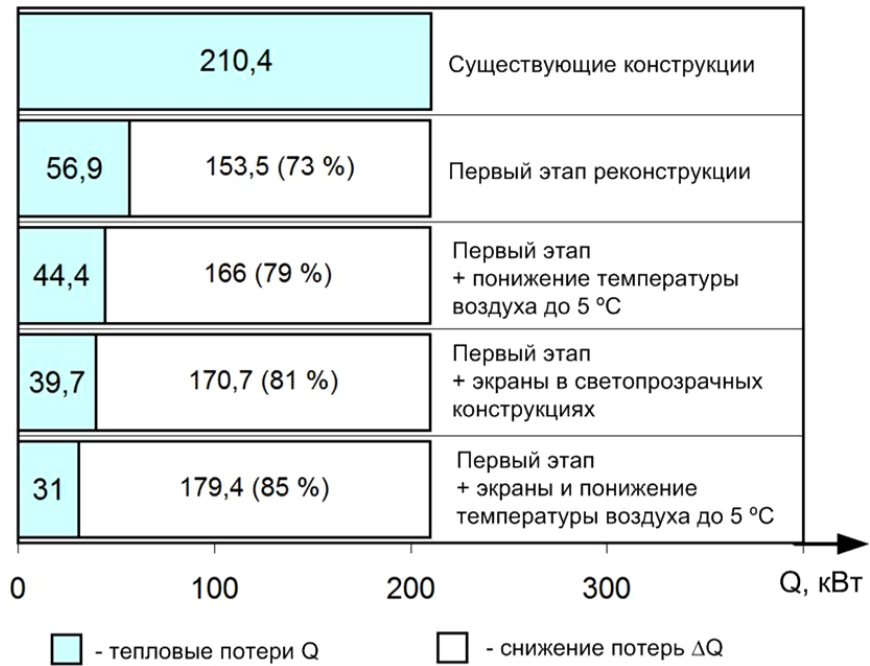


Рисунок 5.17 – Изменение общих трансмиссионных тепловых потерь при использовании энергосберегающих мероприятий (по отношению к потерям в существующих конструкциях)

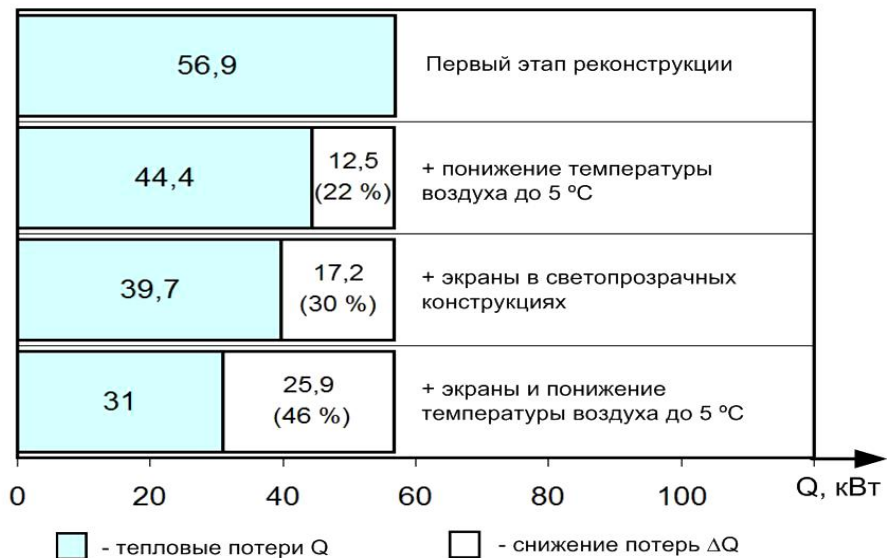


Рисунок 5.18 – Изменение общих трансмиссионных тепловых потерь при использовании энергосберегающих мероприятий (по отношению к потерям после первого этапа реконструкции)

На основании анализа таблицы 5.6 и рисунка 5.17 можно сделать вывод, что использование теплоотражающих экранов в светопрозрачных конструкциях значительно повышает их тепловую защиту. Так, приведенное сопротивление теплопередаче  $R_0$  увеличивается с 0,56 до 1,42 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ) (или в 2,54 раза) в рабочее

время и до  $1,53 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$  (или 2,73 раза) при дежурном режиме отопления; тепловые потери в окружающую среду снижаются до 11,4 кВт (или на 71 %) и до 8,8 кВт (или на 78 %), соответственно.

Совместное использование тепловой изоляции из пенополистирола в непрозрачных ограждающих конструкциях (первый этап) и экранов в окнах и световом фонаре позволяет снизить общие трансмиссионные тепловые потери с 210,4 до 39,7 кВт (или на 81%), а дополнительное понижение температуры воздуха до  $5 \text{ °C}$  – до 31 кВт (или на 85 %).

Необходимо отметить, что существующее сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций здания РМЦ не соответствует действующим минимальным требованиям в области теплозащиты (см. таблицу 5.3), поэтому определять энергетическую эффективность предложенных в диссертационной работе мероприятий необходимо в сравнении с результатами, полученными после первого этапа реконструкции тепловой защиты (см. рисунок 5.18). При таком подходе понижение температуры внутреннего воздуха до  $5 \text{ °C}$  позволяет уменьшить общие трансмиссионные тепловые потери с 56,9 до 44,4 кВт (или на 22 %), использование экранов в окнах и световом фонаре – до 39,7 кВт (или на 30 %), а совместное применение экранов и понижение температуры – до 31 кВт (или на 46 %).

Использование стекла с теплоотражающим покрытием вместо обычного в окнах и световом фонаре ( первый этап реконструкции) позволяет уменьшить инсоляционные поступления в помещение в расчетное время теплого периода года с 56,1 до 50,71 кВт (или на 9,6 %); применение жалюзи способствует дополнительному снижению данной физической величины до 17,8 кВт (или на 65 %).

Были составлены тепловые балансы  $\Delta Q$  для производственного помещения РМЦ для расчетных условий рабочего и нерабочего времени холодного и теплого периодов года после проведения первого и второго этапа реконструкции, которые представлены на рисунках 5.19 и 5.20.

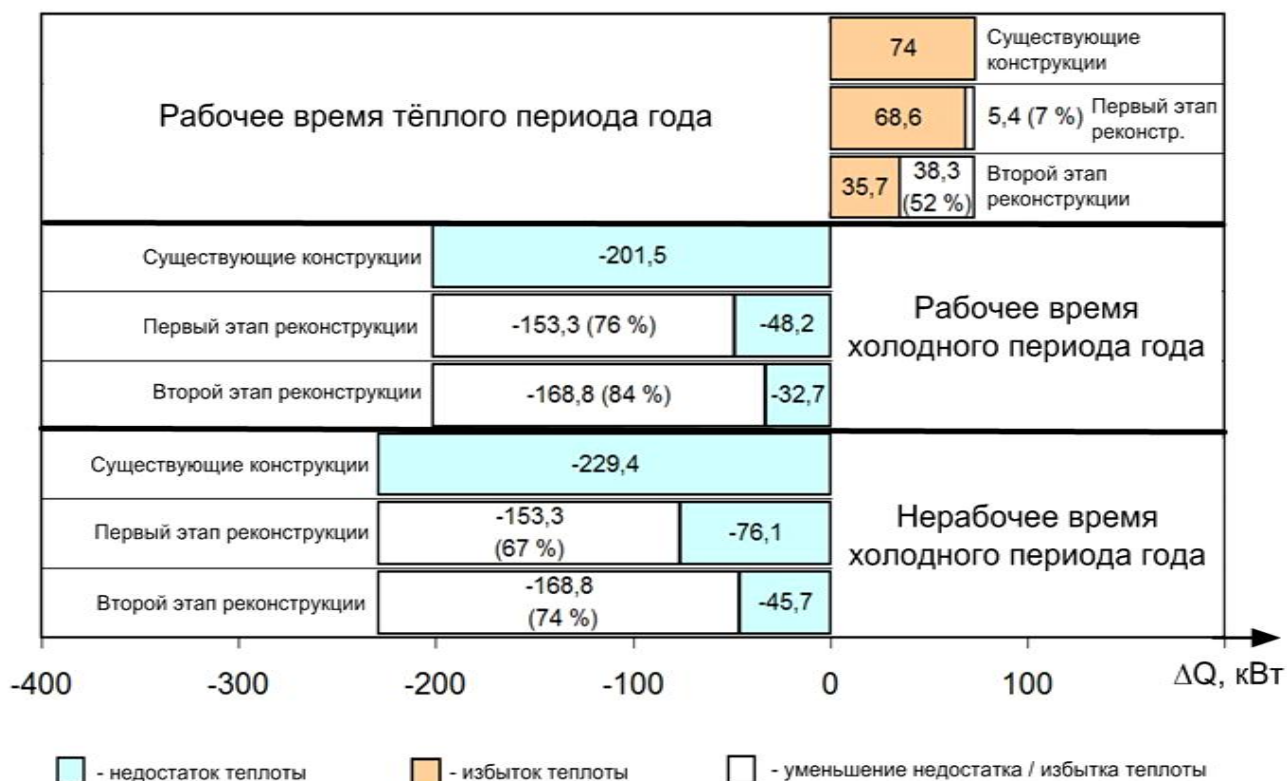


Рисунок 5.19 – Изменение теплового баланса при использовании энергосберегающих мероприятий (по отношению к балансу при существующих конструкциях)

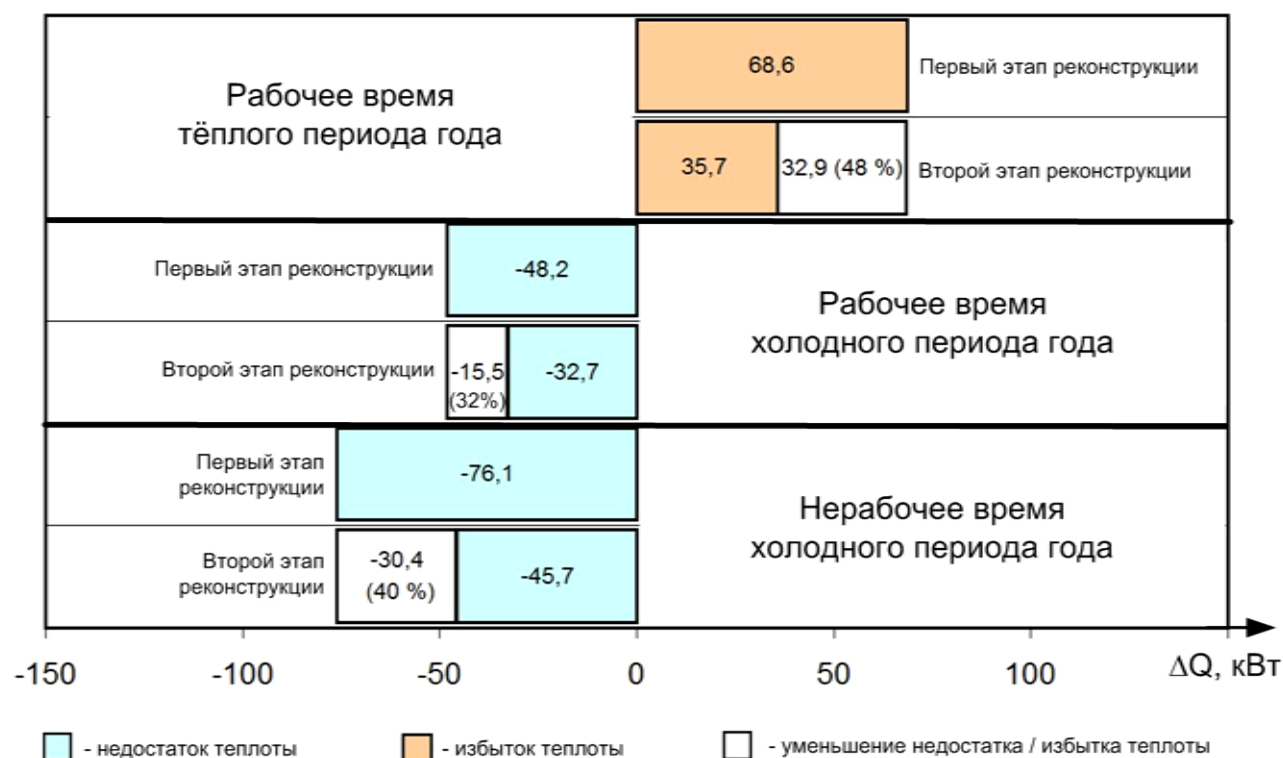


Рисунок 5.20 – Изменение теплового баланса при использовании энергосберегающих мероприятий (по отношению к балансу после первого этапа реконструкции)

Первый этап реконструкции позволил уменьшить избыток теплоты в теплый период с 74 (при существующем состоянии) до 68,6 кВт (или на 7 %), использование жалюзи на втором этапе – до 35,7 кВт (или на 52 %). Увеличение тепловой защиты конструкций позволило уменьшить недостаток теплоты в рабочее время холодного периода с 201,5 до 48,2 кВт (или на 76 %), а дополнительное использование экранов – до 32,7 кВт (или на 84 %). В нерабочее время холодного периода недостаток теплоты сократился после применения мероприятий первого этапа с 229,4 кВт до 76,1 кВт (или на 67 %), использование экранов и понижение температуры внутреннего воздуха до 5 °С позволило уменьшить  $\Delta Q$  до 45,7 кВт (или на 74 %).

Как уже было сказано ранее, эффективность применения экранов, жалюзи в светопрозрачных конструкциях и пониженной температуры внутреннего воздуха при дежурном режиме отопления целесообразно оценивать в сравнении с данными расчетов после первого этапа реконструкции (см. рисунок 5.20). Использование жалюзи в рабочее время теплого периода года позволило уменьшить избыток теплоты на 32,9 кВт (или на 48 %). Применение экранов дало возможность сократить недостаток теплоты в рабочее время холодного периода на 15,5 кВт (или на 32 %), а дополнительное понижение температуры внутреннего воздуха в нерабочее время уменьшило  $\Delta Q$  на 30,4 кВт (или на 40 %).

На основании разработанного метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции за отопительный период с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации для климатических условий г. Иваново, продолжительности рабочей смены в помещении РМЦ с 7:00 до 16:00 и производственного календаря на 2021 год для светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами по формуле (5.17) было определено значение  $\overline{R_{o,E}^{om}}$ , которое составило 1,21 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт. Трансмиссионные потери тепловой энергии через светопрозрачные конструкции  $E_o$  за отопительный период в случае использования экранов и дежурного режима отопления составили 93,2 ГДж, причем потери снизились на 107,6 ГДж (или на 53,6 %) по

сравнению с результатами расчета после первого этапа реконструкции (200,8 ГДж).

Применение теплоотражающих металлических жалюзи в межстекольном пространстве светопрозрачных конструкций позволит значительно уменьшить инсоляционные поступления тепловой энергии  $E_{инс}$  в помещение производственного помещения РМЦ за теплый период года [85] с 335 до 117 ГДж, снижение составит 218 ГДж (или 65 %). Сокращение инсоляционных поступлений в теплый период года приведет к значительному снижению избытка теплоты в помещении, что, в свою очередь, позволит уменьшить затраты электрической энергии на привод двигателей вытяжных общеобменных вентиляторов, обеспечивающих поддержание допустимых параметров микроклимата в помещении.

Технические решения по реконструкции тепловой защиты производственного помещения РМЦ за счет применения теплоотражающих экранов и жалюзи в светопрозрачных ограждающих конструкциях, по снижению температуры внутреннего воздуха в нерабочее время, а также результаты расчета энергетического эффекта от использования данных мероприятий приняты к рассмотрению, признаны полезными и предложены для включения в стратегический план развития АО "ПСК", г. Иваново. Соответствующий акт приведен в Приложении В.

#### **5.4 Повышение эффективности работы систем по созданию динамического микроклимата для помещения с энергосберегающими светопрозрачными конструкциями**

Для оценки затрат теплоты и холода при организации динамического микроклимата в помещении с учетом разработанных в диссертации энергосберегающих решений необходимо выполнить численное моделирование процессов нестационарного теплообмена при формировании микроклимата, которое учитывало бы:

а) изменение температуры и влажности наружного и внутреннего воздуха, солнечной радиации, внутренних тепло- и влагопоступлений;

б) тепловую инерцию воздуха, ограждающих конструкций и объектов, находящихся в помещении;

в) влияние работы систем поддержания микроклимата на влагосодержание и температуру внутреннего воздуха;

г) особенности технологических процессов.

Моделирование должно осуществляться в календарном масштабе времени, то есть расчет должен осуществляться на весь годовой цикл эксплуатации здания [194].

Для анализа эффективности применения энергосберегающих мероприятий должна быть осуществлена технико-экономическая обработка результатов моделирования.

#### **5.4.1 Разработка системы кондиционирования воздуха для помещения тренажера БЩУ АЭС**

В качестве объекта моделирования динамического микроклимата было выбрано помещение полномасштабного тренажера блочного щита управления атомной электрической станции с реактором ВВЭР-1000 (БЩУ АЭС), расположенное в аудитории А-169 ИГЭУ. В данном помещении осуществляется обучение студентов с целью приобретения ими навыков по управлению оборудованием АЭС, а также переподготовка инженерно-технического и управленческого персонала действующих станций. Компьютерный комплекс моделирует различные режимы работы станции (штатный и аварийный). Управление такого вида объектами относится к очень ответственному и сложному виду производственной деятельности, требующей максимального сосредоточения и внимания, следовательно организация в помещении в рабочее время динамического микроклимата, способствующему повышению производительности и качества труда персонала БЩУ АЭС, является актуальной задачей. В то же время, данное помещение является учебной аудиторией, где предусмотрен не круглосуточный режим работы, а по расписанию занятий,

следовательно, в нерабочее время возможно применения дежурного режима отопления. В окнах, расположенных в наружной стене, целесообразно в темное время суток или во время отсутствия людей использование теплоотражающих экранов.

План расстановки оборудования и интерьер помещения БЦУ АЭС представлены на рисунках 5.21 и 5.22.

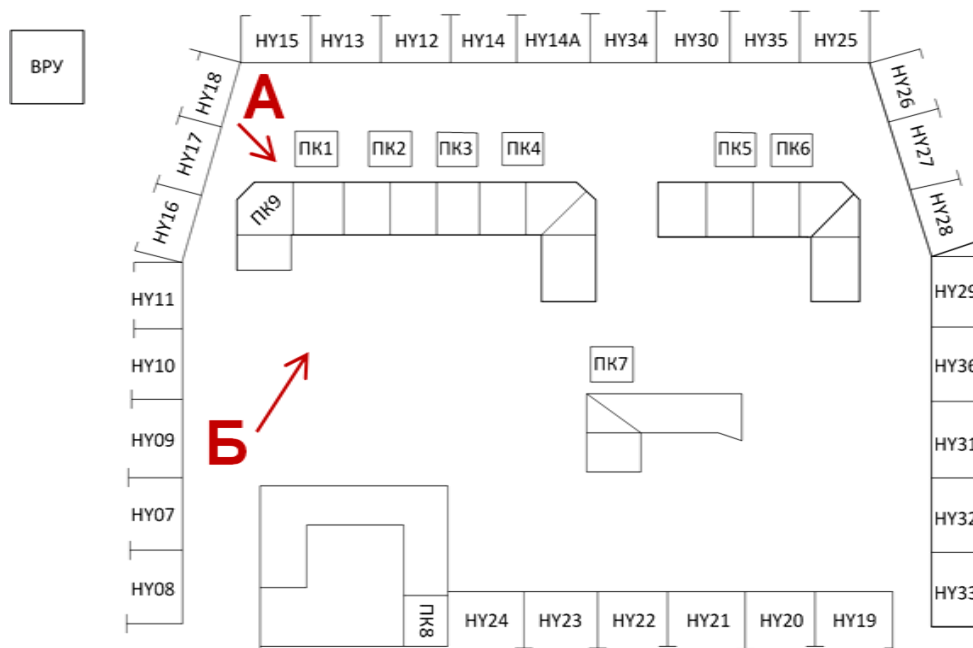


Рисунок 5.21 – Схема расстановки оборудования тренажера БЦУ АЭС: ПК1-ПК9 – персональные компьютеры; ВРУ – введено-распределительное устройство; НУ–панели БЦУ



а)



б)

Рисунок 5.22 – Интерьер помещения тренажера БЦУ АЭС : фотосъемка произведена со стороны вида А (а) и вида Б (б) (см. рисунок 5.21)

Здание, в котором установлена полномасштабная модель БЦУ АЭС, является одноэтажным. Крыша спроектирована с переменной высотой. Наивысшая точка  $h = 8,9$  м, низшая отметка потолка  $h = 4,9$  м. Наружные стены выполнены из глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе и обиты листами ДВП толщиной 10 мм. Между штукатуркой и слоем ДВП – воздушная прослойка толщиной 50 мм. Толщина стены в 2,5 кирпича равна 640 мм, толщина штукатурки 20 мм. В окнах применено двойное остекление из обычного стекла в отдельных деревянных переплетах. Конструкция пола: бетон на гравии из природного камня, керамическая плитка. Покрытие выполнено в виде подвесного потолка, представляющее собой чердачное перекрытие «теплого» чердака, выполненного в виде шеста треугольного сечения (см. рисунок 5.23).

Были определены площади ограждающих конструкций, действительное приведенное сопротивление теплопередаче  $R$ , а также сопротивления, отвечающие требованиям энергосбережения  $R^{req}$  и санитарно-гигиеническим и комфортным условиям  $R^{sh}$  [96, 127] (см. таблицу 5.7).

Таблица 5.7 – Сравнение действительного и нормированного приведенного сопротивления теплопередаче для наружных ограждающих конструкций помещения тренажера БЦУ АЭС

Тип ограждающей конструкции	Площадь поверхности $A$ , м <sup>2</sup>	Приведенное сопротивление теплопередаче $R$ , (м <sup>2</sup> ·°C)/Вт		
		действительное	определенное исходя из условий энергосбережения $R^{req}$ [78]	отвечающее санитарно-гигиеническим и комфортным условиям $R^{sh}$ [63, 78]
Несущие стены	41	1,23	2,18	0,85
Окна	24,5	0,44	0,35	0,31
Покрытие	200	1,03	2,9	1,0
Пол	171,6	2,1÷14,2	-	-

На основе анализа данных таблицы 5.3 можно сделать вывод, что значения  $R$  для несущих стен и покрытия, не соответствуют требованиям в области энергосбережения, но отвечают санитарно-гигиеническим и комфортным условиям. Было принято решение повысить  $R$  стен и покрытия до значений  $R^{req}$  путем размещения со стороны окружающей среды слоя пенополистирола.



В темное время суток и во время отсутствия людей в окнах было предложено использовать со стороны окружающей среды энергоэффективный ставень из трех теплоотражающих алюминиевых экранов и солнечной батареи.

По состоянию на 2021 год параметры микроклимата в помещении поддерживаются за счет водяной системы отопления, включающей в себя соединительные трубопроводы и чугунные радиаторы серии МС-500-140. Воздухообмен в помещении осуществляется за счет инфильтрационных поступлений воздуха через ограждающие конструкции и естественной вытяжной вентиляции.

Экспериментально и расчетным путем были определены статьи теплоступлений и теплопотерь и составлены расчетные тепловые балансы для холодного и теплого периодов года для климатических условий г. Иваново, которые представлены в таблице 5.8. Расчетная температура внутреннего воздуха  $t_v$  по [32] была принята равной 22 °С, наружного  $t_n = -29$  °С. Относительная влажность  $\varphi = 40$  % (из диапазона оптимальных параметров от 40 до 60 %).

Таблица 5.8 – Статьи теплопотерь и тепловыделений  $Q$ , а также тепловой баланс  $\Delta Q$ , кВт, для помещения тренажера БЩУ АЭС в различные расчетные периоды

Наименование статьи теплопотерь / тепловыделений	Холодный период года		Теплый период года
	рабочее время	нерабочее время	рабочее время
<b>Теплопотери</b>			
Наружные стены	1,75	1,75	–
Окна	3,04	0,88	–
Покрытие	2,37	2,37	–
Пол	1,32	1,32	–
Инфильтрация	0,52	0,52	–
<b>Итого теплопотери:</b>	9,00	6,84	
<b>Тепловыделения</b>			
Электроприборы	1,78	-	1,78
Щиты индикации и управления	2,08	–	2,08
Персонал	1,50	–	1,50
Искусственное освещение	1,61	–	1,61
Инсоляция	1,36	–	8,86
<b>Итого тепловыделения:</b>	6,55		14,05
<b>Тепловой баланс</b>			
Избыток (+) / недостаток (-) теплоты	-2,45	-6,84	+14,05

На основании данных таблицы 5.8 можно сделать вывод, что наибольшие теплотери в рабочее время холодного периода относятся к окнам (3,04 кВт или 34 %). Использование экранов позволяет уменьшить трансмиссионные тепловые потери через окна до 0,78 кВт (или в 3,5 раза). В теплый период года весомые тепlopоступления относятся к инсоляции и составляют 8,86 кВт (или 63 %). В рабочее и нерабочее время холодного периода года недостаток теплоты составляет 2,45 и 6,84 кВт, соответственно, в теплый период избыток теплоты равен 14,05 кВт.

Баланс по влаге  $\Delta W$  в рабочее время составил 0,302 г/с. Источником влаговыделений являются люди. В нерабочее время влаговыделения отсутствуют.

На основании принятой схемы воздухообмена "сверху-вниз" (см. рисунок 5.23), максимального перепада температур между приточным и воздухом в рабочей зоне ( $\Delta t = 6,7$  °C) для воздухораспределителя типа 4АПН-450-450 (см. рисунок 5.24), углового коэффициента процесса  $\varepsilon = +\infty$  и избытка теплоты в теплый период года  $\Delta Q_T = +14,05$  кВт был построен процесс обработки воздуха (см. рисунок 5.25) и определен расход приточного воздуха  $L_o$ , равный 5090 м<sup>3</sup>/ч.

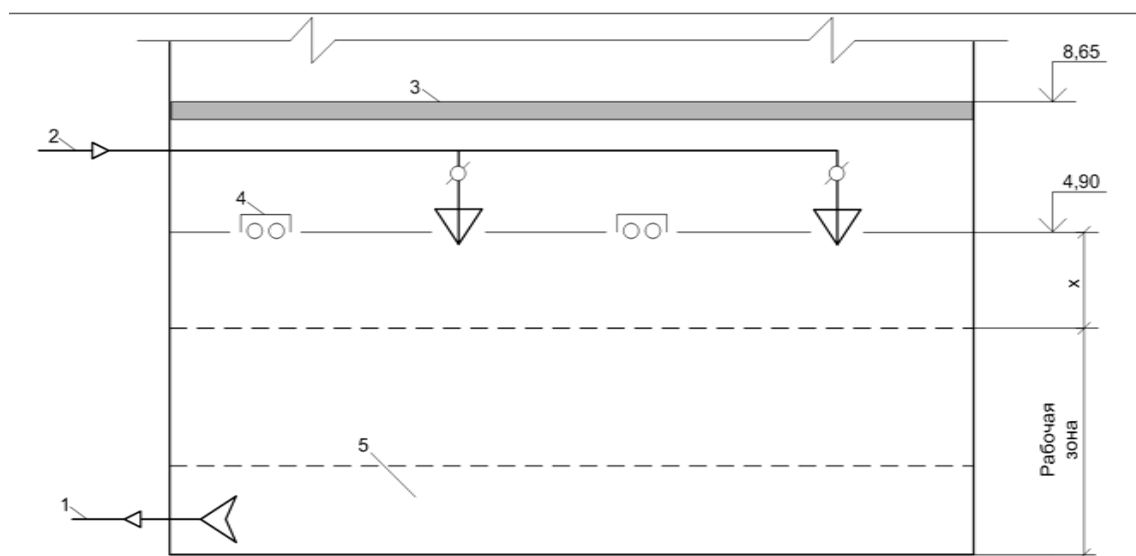


Рисунок 5.23 – Схема организации воздухообмена: 1 – вытяжная система; 2 – приточная система; 3 – перекрытие; 4 – установки искусственного освещения; 5 – зона технологического оборудования;  $x$  – расчетная длина струи

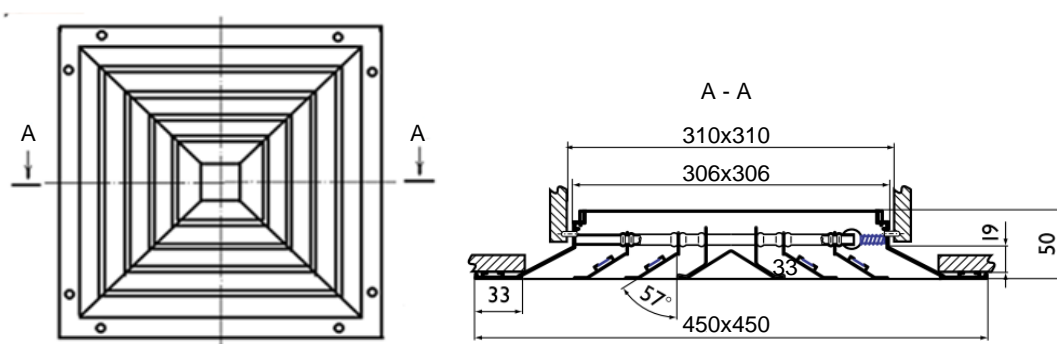


Рисунок 5.24 – Эскиз воздухораспределителя типа 4АПН-450-450

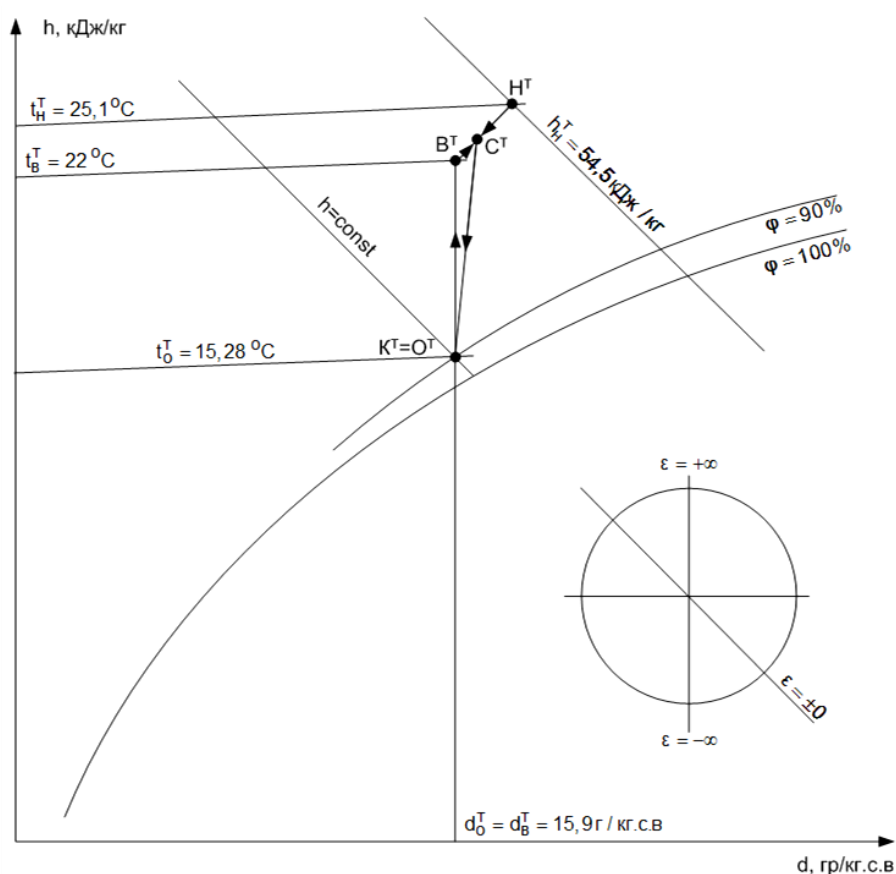


Рисунок 5.25 – Построение процесса обработки воздуха в  $h$ - $d$  диаграмме в теплый период рабочее время:  $O^T B^T$  – поглощение теплоты (подача воздуха на расстоянии  $x$  от входа в рабочую зону, схема «сверху вниз»);  $B^T C^T H^T$  – смешение внутреннего и наружного воздуха (в секции смешения);  $C^T O^T$  – осушение с затратами холода (в секции орошения)

Под руководством профессора кафедры промышленной теплоэнергетики, к.т.н. В.К. Пыжова на основании расчетов и принятой схемы воздухообмена для трех аудиторий (А-169, А-170 и А-170а) была разработана [95] система кондиционирования воздуха, включающая в себя центральный кондиционер фирмы CLIVET производительностью 10000 м<sup>3</sup>/ч, установленный в аудитории

А-170а, систему воздуховодов, воздухораспределители 4АПН-450-450, а также вытяжные решетки. Был принят качественный метод регулирования нагрузки. Схема системы кондиционирования представлена на рисунке 5.26, а ее компоновка в аудитории А-169 – на рисунке 5.27.

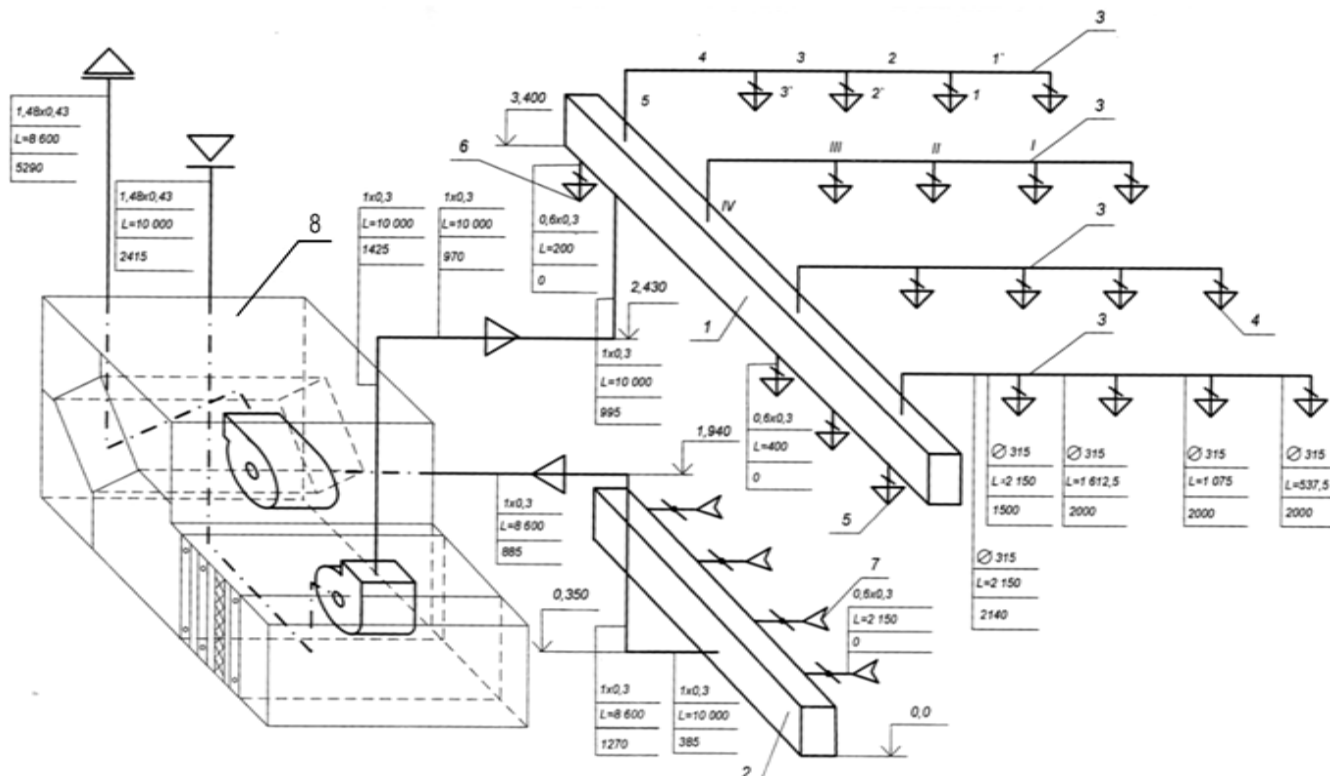


Рисунок 5.26 – Схема системы кондиционирования воздуха для помещений А-169 (тренажер БЦУ АЭС), А-170 и А-170а (лаборатории кафедры промышленной теплоэнергетики):

1 – приточный коллектор; 2 – вытяжной коллектор; 3 – воздуховоды;  
4 – воздухораспределители типа 4АПН-450-450 в ауд. А-169; 5, 6 – то же, в ауд. А-170 и А-170а, соответственно; 7 – вытяжные решетки; 8 – центральный кондиционер фирмы CLIVET

В центральном кондиционере фирмы CLIVET (см. рисунок 5.6) возможно реализовать следующие процессы обработки воздуха (см. рисунки 5.5 и 5.7): очистка в карманных фильтрах, подогрев в первой (процесс НР-П) и второй (процесс К-О) ступенях, охлаждение, увлажнение (процессы П-К и С-К) или осушение в секции орошения. В кондиционере возможно смешение приточного и вытяжного воздуха (процесс НР-С-В), а также утилизация теплоты вытяжного воздуха (процесс Н-НР). В кондиционере осуществляется обработка воздуха, подающегося для помещений тренажера БЦУ АЭС (ауд. А-169) и лабораторий кафедры промышленной теплоэнергетики (ауд. А-170 и А-170а).

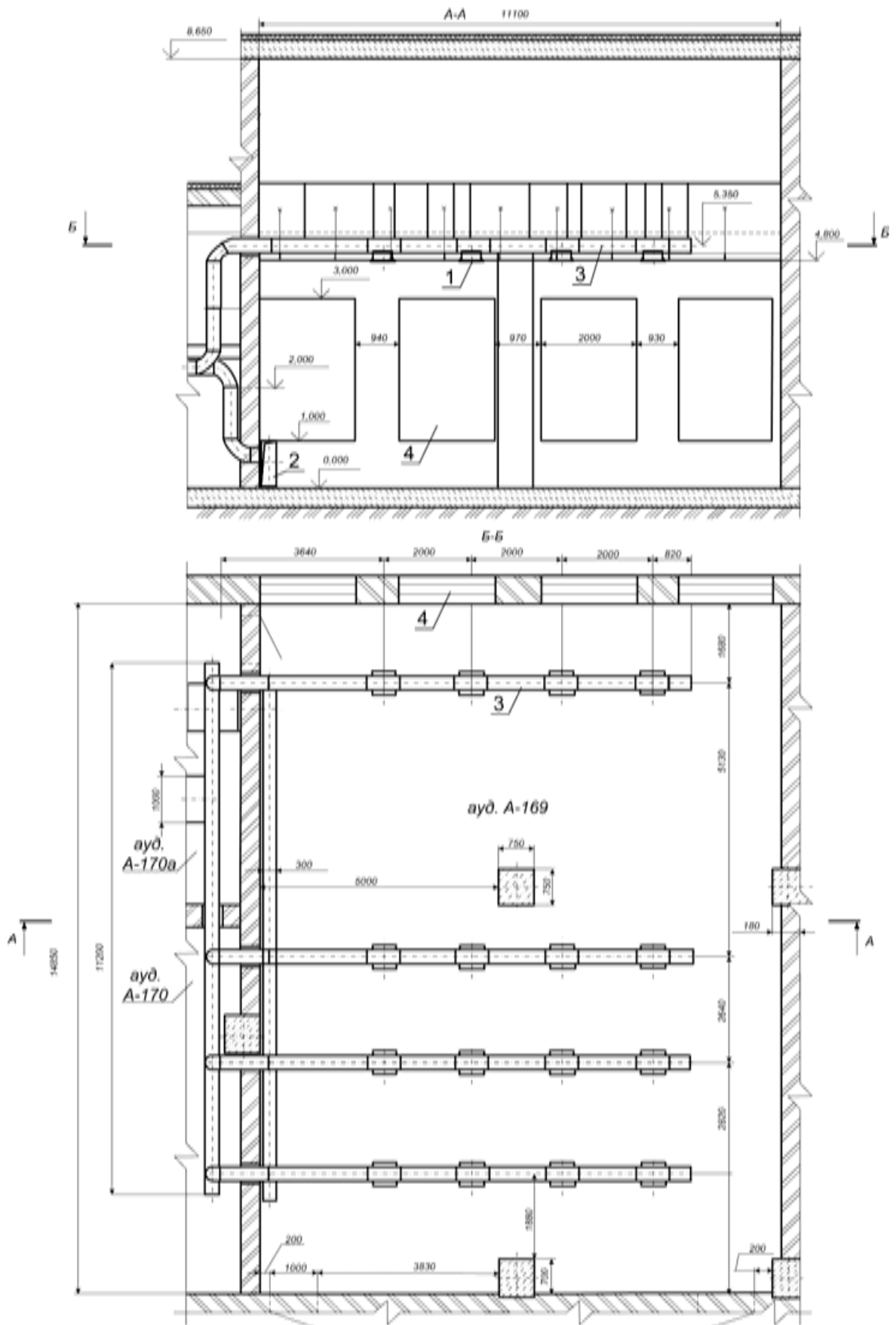


Рисунок 5.27 – Размещение элементов системы кондиционирования воздуха в помещении тренажера БЦУ АЭС (А-169): 1 – воздухораспределители; 2 – вытяжные решетки; 3 – воздуховоды; 4 – окна

#### 5.4.2 Численное моделирование динамического микроклимата в помещении тренажера БЦУ АЭС

Разработанная математическая модель динамического микроклимата для зданий с энергоэффективными светопрозрачными ограждающими конструкциями, представленная в подразделе 4.5, была реализована в ПК COMSOL Multiphysics [185] для помещения тренажера БЦУ АЭС.

Геометрическая модель помещения, а также расположенного в нем оборудования и некоторых элементов системы кондиционирования воздуха (СКВ) представлена на рисунке 5.28. геометрическая модель была создана в масштабе 1 : 1.

Был выбран физический режим моделирования Non – Isothermal Flow (неизотермический поток). Данный режим состоит из трех модулей:

- Heat transfer in fluids (теплообмен в жидкостях, газах);
- Laminar / Turbulence Flow (ламинарный / турбулентный поток);
- Heat transfer in solids (теплообмен в твердых телах).

Для моделирования движения воздушных масс была применена  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности. Радиационный теплообмен между поверхностями рассчитывался с помощью метода дискретных ординат (Discrete Ordinats (DO)) [55, 185].

Граничные условия были заданы следующим образом (см. пункт 4.5.2).

Теплообмен через ограждающие конструкции задавался с помощью граничных условий  $ГУ_1$ ,  $ГУ_2$  и  $ГУ_3$ , учитывая физические свойства каждого слоя ограждения [12, 104]. При задании сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций использовалась эквивалентная теплопроводность (см. формулу 4.65).

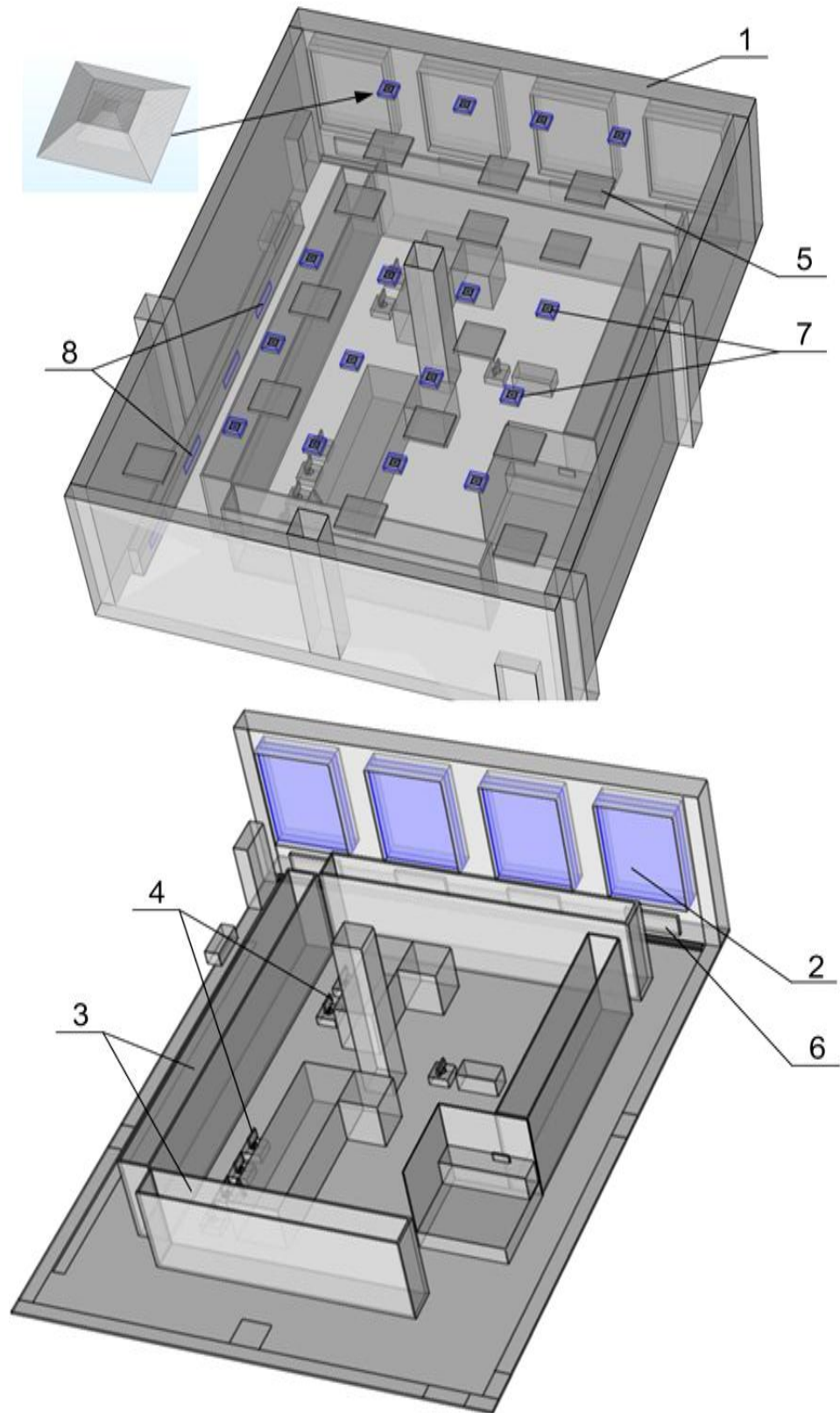


Рисунок 5.28 – Геометрическая модель помещения тренажера БЩУ АЭС с размещенным оборудованием и элементами СКВ: 1 – наружная стена; 2 – окна; 3 – блочные щиты управления и индикации; 4 – компьютеры; 5 – осветительные приборы; 6 – отопительные приборы; 7 – воздухораспределители; 8 – вытяжные решетки на вытяжном коллекторе

Соппротивление теплопередаче окон при использовании в них ставня из трех экранов и фотоэлектрической панели в темное время суток или во время отсутствия людей в помещении определялось с помощью функции

$$R_0(\Delta t, v_{вн}, v_{н}) = 1,16 + \frac{1}{9,6 + 3,8 \cdot v_{вн}} + \frac{22,3}{\Delta t + 17,9} + \frac{1}{7,34 \cdot v_{н}^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_{н}}}. \quad (5.19)$$

Тепловыделения от осветительных приборов, отопительных приборов, ЭВМ, и панелей щитов управления и индикации задавались с помощью граничных условий ГУ<sub>4</sub> для сопряженного теплообмена поверхностей оборудования с воздухом и окружающими предметами. В рабочее время текущие удельные тепловыделения от оборудования  $q(\tau)$ , Вт/м<sup>2</sup>, приведенные к площади его поверхности, определялись исходя из данных таблицы 5.8 и площади соответствующих поверхностей. Температура на поверхности отопительных приборов и трубопроводов определялась исходя из принятого в ИГЭУ температурного графика отпуска теплоты с котельной 95/70 °С.

Теплопоступления от людей, инсоляции задавались в виде тепловыделений в объеме расчетной области. Теплопоступления в результате солнечной радиации  $Q_{о.инс}(\tau)$ , поступающей на вертикальную поверхность окон, а также экранов с фотоэлектрическими панелями, обращенных на северо-восток, определялись по формуле (4.84) с использованием климатических данных [85, 123], причем коэффициент теплопропускания экранов  $k_{сз\gamma}(\tau)$ , принимался по [124] равным 0,10.

Граничное условие, отражающее инфильтрацию, было задано в виде функции Inflow heat flux (входящий тепловой поток). Были заданы текущий тепловой поток  $Q_{инф}(\tau)$ , Вт, и температура инфильтрующегося воздуха  $t_{н}$ , давление снаружи здания было принято равным атмосферному. Доменом, на котором задано данное граничное условие, являются окна (позиция 2, рисунок 5.28).

Поступающий в помещение приточный воздух был представлен в виде скорости и температуры воздуха на выходе из воздухораспределителей (позиция



7, рисунок 5.28). В рабочее время скорость приточного воздуха  $u_0$  задавалась постоянной, равной 1,21 м/с. Была использована встроенная в COMSOL функция Inlet (вход потока). Для описания воздуха, удаляемого из помещения, использовалась функция Outlet (удаление потока), причем в качестве определяющего параметра задавалось статическое давление в вытяжных отверстиях коллектора (позиция 8, рисунок 5.28).

Температура приточного воздуха в рабочее время задавалась в виде функции гармонических колебаний (формула (4.71)). Средняя температура приточного воздуха  $\bar{t}_{dm}$  принималась равной 22,0 °С, амплитуда колебаний  $A = 1,5$  °С. Частота колебаний  $\omega$  принималась равной 1 циклу в час.

Температура наружного воздуха задавалась в виде табличной функции для каждого расчетного периода с учетом похолодания в темное время суток.

Для разбиения расчетного объема модели на конечные элементы был использован режим Normal (нормальный) и построена тетраэдрическая сетка. Созданная сетка помещения тренажера БЦУ с СКВ приведена на рисунке 5.29.

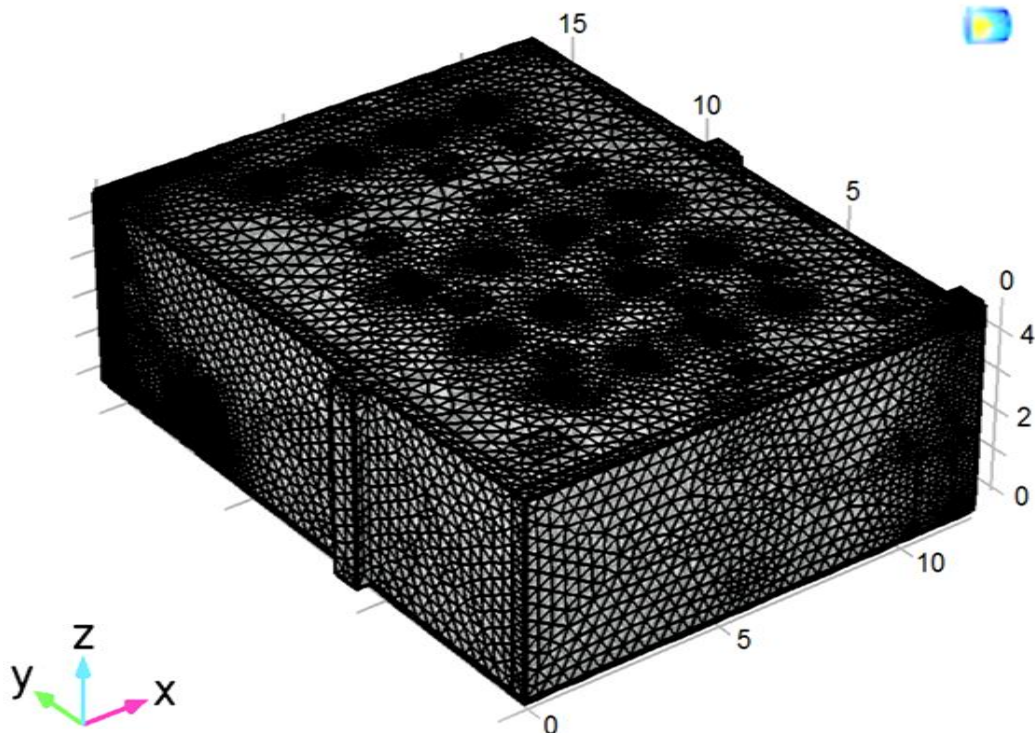


Рисунок 5.29 – Сетка конечных элементов расчетного объема помещения тренажера БЦУ АЭС

Сетка конечных элементов уплотнена в местах значительного изменения градиента температуры и скорости, а именно:

- в местах выхода воздуха из воздухораспределителя;
- в местах удаления воздуха через вытяжные отверстия коллектора;
- на поверхности магистральных трубопроводов и радиаторов отопления;
- на поверхность блочного щита;
- на поверхности светильников с люминесцентными лампами.

Было сгенерировано 538950 конечных элементов.

Так как исследование динамического микроклимата связано с нестационарными процессами, то был выбран решатель типа Time Dependent (зависимый от времени). Для моделирования процесса во времени был выбран метод «BDF» – метод дифференцирования назад. Шаг по времени  $\Delta t$  был принят равным 15 минут. Допустимое отклонение итерационных вычислений температуры и скорости воздуха задавалось равным  $5 \cdot 10^{-4}$ .

Для каждого календарного месяца на основании климатических данных для г. Иваново [109] и графика работы персонала с 8:00 до 17:00 моделировался микроклимат в рамках недельного цикла – с 15:00 среды до 14:59 среды. Для каждого месяца составлялся тепловой баланс в рабочее и нерабочее время и путем построения процесса обработки воздуха в h-d диаграмме определялись параметры приточного воздуха.

Расчет производился для 4 вариантов:

1-ый – контрольный вариант (в рабочее время поддерживается динамический микроклимат, в нерабочее время СКВ работает в режиме полной рециркуляции с постоянным значением тепловой нагрузки на подогреватель 2-ой ступени);

2-ой – применение теплоотражающих экранов в окнах при тех же условиях работы СКВ;

3-ий – применение ставня в окнах и понижение температуры внутреннего воздуха  $t_{\text{деж}}$  в нерабочее время до минимально-допустимой (см. подраздел 5.1) при отключении работы СКВ;

4-ый – применение ставня в окнах и понижение температуры внутреннего воздуха  $t_{\text{деж}}$  в нерабочее время до минимально-допустимой с предварительной осушкой воздуха (см. подраздел 5.1) при отключении работы СКВ.

Для оценки влияния работы СКВ на микроклимат часть отопительных приборов при моделировании была отключена.

На рисунке 5.30 представлено распределение линий движения потоков и скоростей воздуха в помещении во время работы СКВ (рабочее время января месяца).

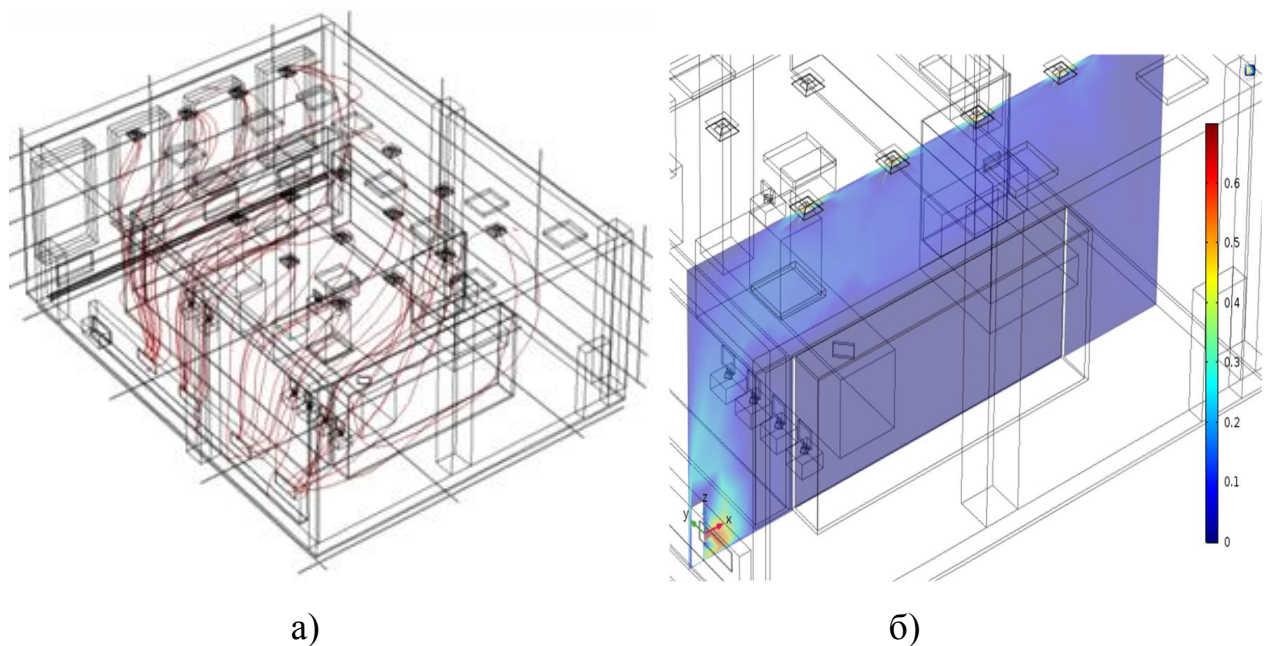


Рисунок 5.30 – Распределение линий движения потоков (а) и поле скоростей (б)  $v_{\text{в}}$ , м/с, воздуха в сечении

Наибольшие скорости воздуха фиксируются в верхней части помещения, а также в области, прилегающей к стене, где расположен вытяжной коллектор. В рабочей зоне помещения скорость не превышает значения 0,1 м/с, что входит в диапазон оптимальных параметров (не более 0,15 м/с). В области около наружной стены можно отметить минимальные значения скоростей воздуха (не более 0,06 м/с), там расположена так называемая «застойная» зона.

Анализ рисунков 5.31 и 5.32 позволяет отметить тот факт, что наибольшие значения температуры внутреннего воздуха фиксируются в зоне, граничащей с

отопительными приборами, а также у воздухораспределителей. В рабочей зоне значение температуры воздуха находятся в диапазоне от 22,1 до 22,6 °С.

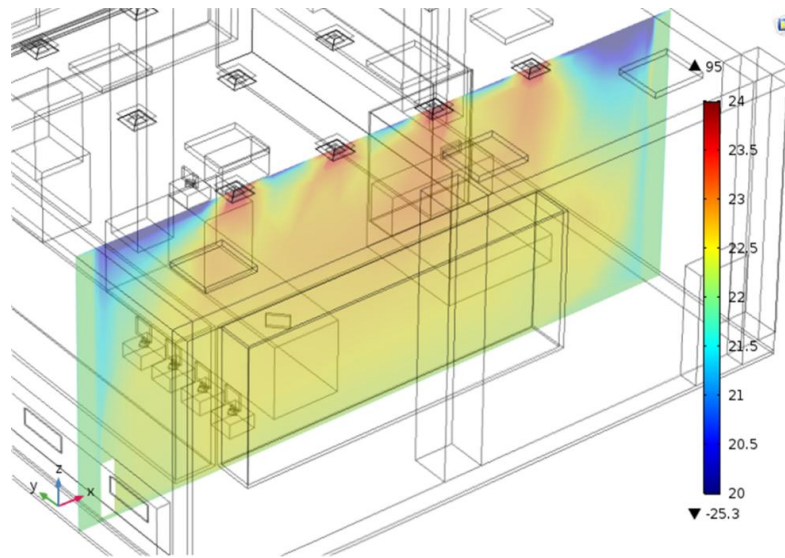


Рисунок 5.31 – Поле температур внутреннего воздуха  $t_{в}$ , °С, в рабочее время для условий января

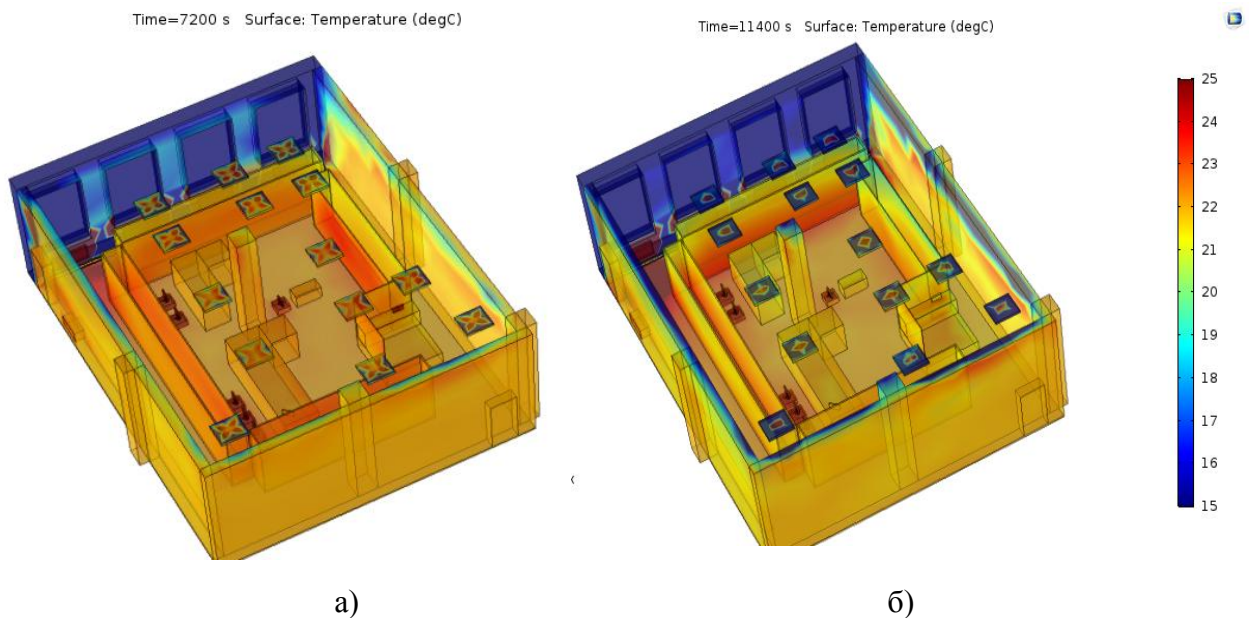


Рисунок 5.32 – Динамика остывания поверхностей ограждающих конструкций и оборудования после прекращения условий января: рабочая смена (а) и спустя 70 минут после окончания рабочей смены (3-ий вариант моделирования, условия января)

По окончании рабочей смены и прекращении подачи приточного воздуха СКВ (рисунок 5.32, б) бóльшую скорость остывания можно отметить для поверхностей щитов управления и индикации.

Наибольший интерес представляет изменение температур в течение недельного цикла работы в точках замера (см. рисунок 5.33), расположенных на расстоянии 20 см от воздухораспределителя (ВР) (поз. 1), в рабочей зоне (поз. 2) и на расстоянии 20 см от внутренней поверхности окна (поз. 3).

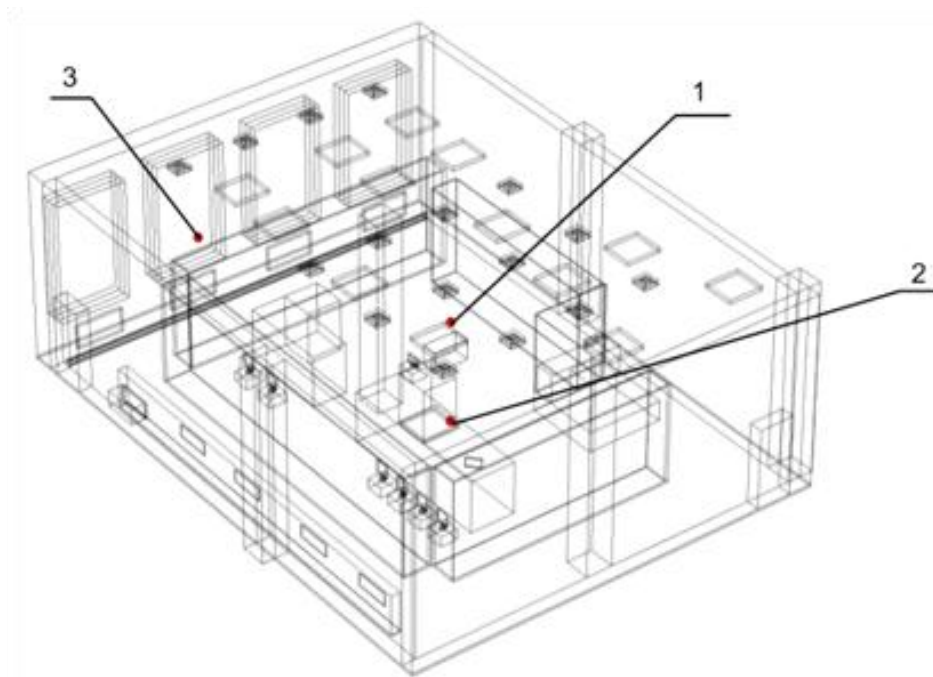


Рисунок 5.33 – Расположение контрольных точек замера температур в помещении

В качестве примера на рисунке 5.34 приведен недельный цикл работы СКВ для климатических условий января месяца. Рассмотрен первый (контрольный) вариант и четвертый (с применением ставня в окнах, дежурного режима отопления с предварительной осушкой воздуха). Анализ рисунка позволяет констатировать, что в контрольном варианте в рабочее время амплитуда колебания температуры воздуха у ВР составляет  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в рабочей зоне –  $0,9\div 1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура воздуха в рабочей зоне составляет  $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а у окна – около  $19,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За период с субботы по воскресенье температура воздуха в рабочей зоне снижается с  $22$  до  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  (или на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а у окна – от  $19,0$  до  $17,2\text{ }^{\circ}\text{C}$

(или на  $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). В связи с небольшим понижением температуры внутреннего воздуха и малой инерционностью воздуха режим прогрева помещения осуществляется за  $0,5$  часа до начала смены.

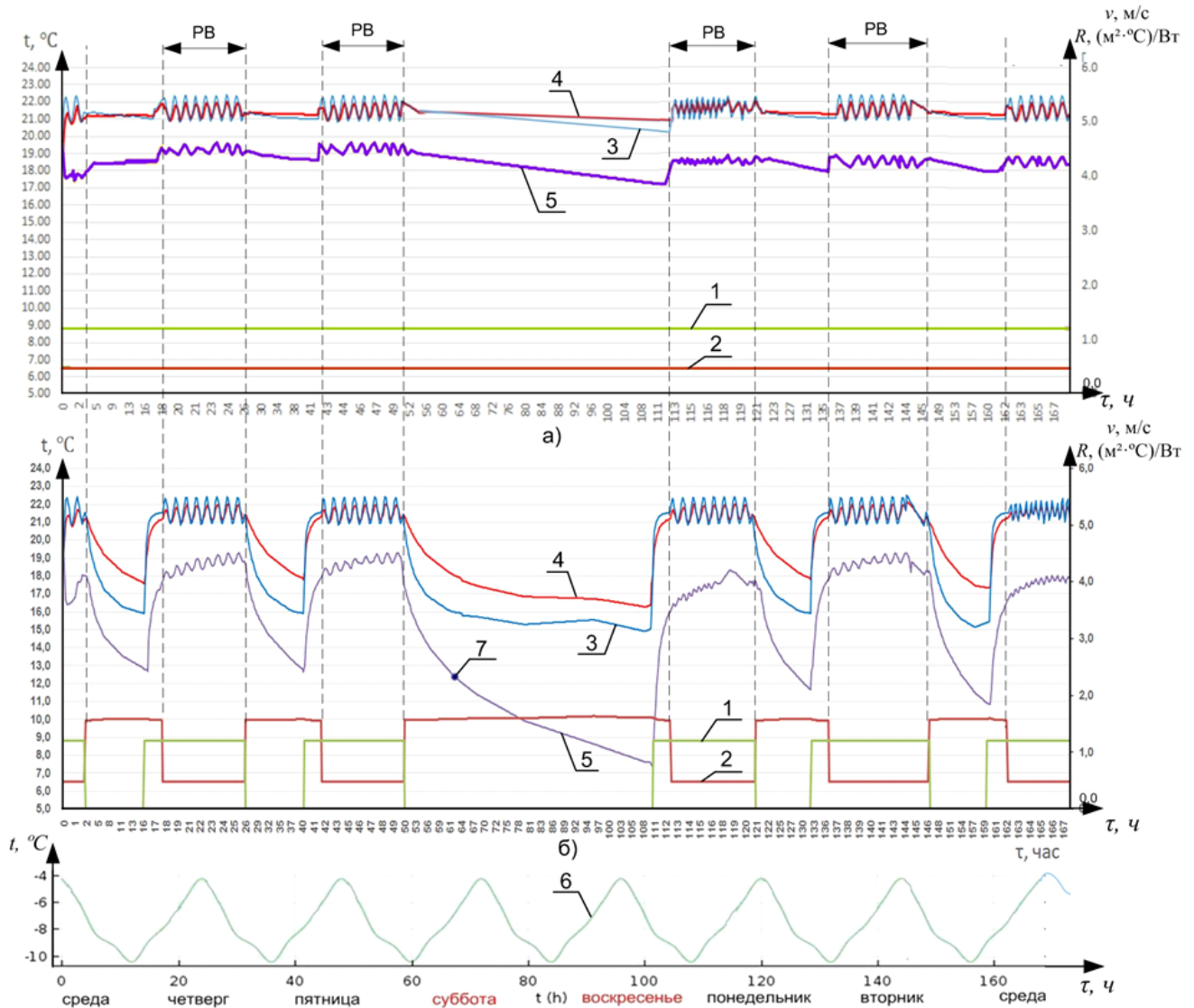


Рисунок 5.34 – Изменение параметров воздуха и приведенного сопротивления теплопередаче окон для первого (контроль) (а) и четвертого (б) варианта в зависимости от времени и режима работы СКВ в течение недели для условий января месяца: 1 – скорость приточного воздуха  $v_0$ , м/с; 2 – приведенное сопротивление теплопередаче окон  $R_0$ ,  $(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$ ; 3, 4, 5 – температура внутреннего воздуха  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , у воздухораспределителя, в рабочей зоне, у окна, соответственно; 7 – точка возобновления работы СКВ для 3-го варианта; PB – рабочее время

В четвертом варианте значения средней температуры и амплитуды колебаний температуры воздуха в рабочей зоне, у ВР, в рабочее время такие же,

как и в первом варианте. В связи с прекращением подачи приточного воздуха в нерабочее время внутренний объем помещения значительно остывает. Так, за период с субботы по воскресенье температура воздуха в рабочей зоне снижается с 21,1 до 16,2 °С (или на 4,9 °С), а у окна – от 18,5 до 7,4 °С (или на 11,1 °С). В связи с этим режим прогрева помещения осуществляется за 2,0 часа до начала смены. В нерабочее время будней температура воздуха в рабочей зоне снижается с 21,3 до 17,8 °С (или на 3,5 °С), а у окна – в среднем на 4,8 °С. Необходимо отметить, что более высокие значения в рабочей зоне вызваны тепловыделениями от компьютеров, панелей щитов управления, а также "защитного" эффекта от схемы расположения щитов (замкнутое пространство в пространстве, см. рисунок 5.32). Снижение температуры воздуха в точке 3, а также использование экранов в окнах повышает значение сопротивления  $R_0$  с 1,62 до 1,73 (м<sup>2</sup>·°С)/Вт (или на 6,8 %). Можно отследить закономерность: чем дальше точка замера температуры находится от воздухораспределителя и траекторий движения основных воздушных масс, тем больше затухание амплитуды колебаний температуры воздуха.

Следует заметить, что осушка воздуха (4-ый вариант) позволяет снизить значение минимально-допустимой температуры внутреннего воздуха в нерабочее время до 7,4 °С. Если бы осушка не производилась, то минимальная температура  $t_{\text{деж}}$  была бы ограничена значением 12,4 °С и СКВ пришлось бы запустить в работу в выходные дни в 5:00 субботы (или за 51 час до начала рабочей смены), что приведет к дополнительным затратам не только электроэнергии на привод колеса вентилятора, но и тепловой энергии в подогревателе второй ступени.

На основании анализа результатов моделирования недельных циклов работы СКВ для четырех вариантов для каждого из 12 календарных месяцев, а также построения процессов обработки воздуха в  $h-d$  диаграмме и составления энергетического баланса для кондиционера согласно методики, изложенной в [194, 63], были определены годовые затраты холода и теплоты СКВ, а также электрической энергии на привод приточного и вытяжного вентиляторов,

установленных в кондиционере (поз. 9 и 10 рисунка 5.6), мощностью 6,3 кВт. Результаты расчета представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Сравнение основных показателей эффективности вариантов моделирования динамического микроклимата

№ и краткая характеристика варианта	Годовые затраты теплоты СКВ, ГДж/год (% к базовому варианту)	Годовые затраты холода СКВ, ГДж/год (% к базовому варианту)	Годовые затраты электроэнергии, МВт·ч (% к базовому варианту)
1-ый – контрольный вариант	95,6 (100)	36,5 (100)	37,4 (100)
2-ой – применение ставня в окнах	81,4 (85,1)	35,1 (96,2)	37,4 (100)
3-ий – применение ставня в окнах и понижение $t_{\text{деж}}$ до минимально-допустимого значения	35,6 (37,2)	35,1 (96,2)	16,8 (44,9)
4-ый – применение ставня в окнах и понижение $t_{\text{деж}}$ до минимально-допустимого значения с предварительной осушкой воздуха	28,5 (29,8)	35,1 (96,2)	14,9 (39,8)

На основании данных таблицы 5.9 можно сделать вывод, что применение экранов (2-ой вариант) позволяет снизить затраты теплоты на 14,2 ГДж (или на 14,9 %) по сравнению с контрольным вариантом, дополнительное использование дежурного режима отопления (3-ий вариант) позволяет уменьшить затраты на 60,0 ГДж (или на 62,8 %), предварительная осушка – на 67,1 ГДж (или на 70,2 %). Использование экранов позволяет снизить годовые затраты холода на 1,4 ГДж (или на 3,8 %) за счет снижения поступления солнечной энергии в помещение в промежутки от рассвета до начала рабочей смены (для северо-восточной ориентации окон). Четвертый вариант также является самым эффективным с точки зрения энергосбережения для работы электродвигателей вентиляторов: расход электроэнергии уменьшается с 37,4 до 14,9 МВт·ч (или на 60,2 %).

С помощью разработанного метода были рассчитаны средние значения приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции за отопительный период  $\overline{R_{o,E}^{om}}$  с учетом временного графика использования экранов и



температурного режима эксплуатации, продолжительности рабочей смены с 8:00 до 17:00 (см. рисунок 5.35).

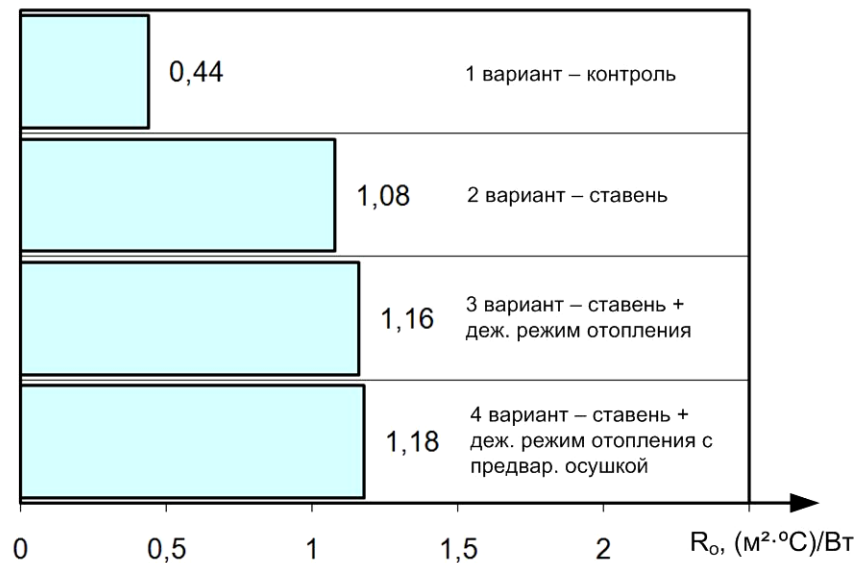


Рисунок 5.35 – Изменение сопротивления  $\overline{R_{o,E}^{om}}$  в зависимости от варианта работы СКВ

Наибольшее приведенное сопротивление теплопередаче окна  $\overline{R_{o,E}^{om}}$  относится к четвертому варианту и составляет  $1,18 (m^2 \cdot ^\circ C)/Вт$ , данное значение в 2,7 раза больше сопротивления окна без экранов.

По формуле (4.88) было определено количество электрической энергии, вырабатываемой в солнечной фотоэлектрической панели энергоэффективного ставня, которое составило  $1627 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ .

### 5.4.3 Верификация математической модели микроклимата в помещении тренажера БЦУ АЭС

В связи с тем, что предложенные энергосберегающие мероприятия требуют осуществления реконструкции тепловой защиты рассматриваемого здания, а также монтажа и наладки системы кондиционирования воздуха, что на момент проведения диссертационного исследования было затруднительно в силу ряда объективных причин, было принято решение провести верификацию

математической модели путем сравнения результатов расчета с данными эксперимента, проведенного в помещении тренажера БЩУ АЭС при существующих схеме организации микроклимата и характеристиках ограждающих конструкций (см. таблицу 5.7). Моделировался нагрев помещения при включении в работу электрооборудования.

Экспериментальные исследования по определению температуры внутреннего воздуха в помещении аудитории А-169 были выполнены при следующих условиях:

а) среднее значение температуры на поверхности отопительных приборов было равно  $63,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

б) значение температуры наружного воздуха было равно минус  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

в) эксперимент проводился в начале рабочей смены в период с 8:00 до 11:00 при включенном в работу электрооборудовании и наличии 5 человек;

г) начальная температура воздуха в рабочей зоне на высоте 1,2 м от поверхности пола (точка 2, рисунок 5.33) составляла  $22,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; на расстоянии 0,2 м от поверхности окна (точка 3, рисунок 5.33) –  $20,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

д) начальная средняя температура внутренних поверхностей ограждающих конструкций составляла: наружной стены –  $18,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; внутренних стен –  $20,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; окон –  $14,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; потолка –  $18,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; пола –  $19,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Измерение температур ограждающих поверхностей осуществлялось в центре поверхности [69] при помощи пирометра АТА-2091 фирмы «Актаком», внутреннего воздуха – с помощью термоанемометра-термометра микропроцессорного ТТМ-2-01 фирмы «Практик-НЦ».

Температура воздуха в точках во время проведения эксперимента контролировалась каждые 15 минут.

В разработанной имитационной модели микроклимата были заданы аналогичные начальные условия, внесены значения тепловыделений, определенные экспериментальным и расчетным путем, указаны характеристики ограждающих конструкций, согласно таблицы 5.7.

Относительная погрешность расчета температуры воздуха для имитационной модели микроклимата, реализованной в ПВК COMSOL Multiphysics, приведена в таблице 5.10, а график изменения температуры в точках контроля – на рисунке 5.36.

Таблица 5.10 – Относительная погрешность расчета температуры воздуха  $\delta t$  в ПВК COMSOL Multiphysics

№ опыта	Время измерений $\tau$ , мин	Точка 2			Точка 3		
		$t_{в,э}$ , °C (экс-нт)	$t_{в,р}$ , °C (расчет)	Погрешн. $\delta t$ , %	$t_{в,э}$ , °C (экс-нт)	$t_{в,р}$ , °C (расчет)	Погрешн. $\delta t$ , %
1	0	22,3	22,3	0	20,6	20,6	0
2	15	22,9	22,85	0,22	20,7	20,72	0,1
3	30	23,5	23,36	0,6	21,1	20,92	0,85
4	45	23,8	23,68	0,5	21,4	21,22	0,84
5	60	24,2	23,95	1,03	21,7	21,43	1,24
6	75	24,5	24,28	0,9	21,8	21,65	0,69
7	90	24,6	24,45	0,61	22,1	21,87	1,04
8	105	24,8	24,62	0,73	22,2	22,02	0,81
9	120	25,1	24,78	1,27	22,4	22,17	1,03
10	135	25,1	24,82	1,12	22,6	22,37	1,02
11	150	25,3	24,83	1,86	22,8	22,56	1,05
12	165	25,2	24,85	1,39	22,9	22,73	0,74
13	180	25,2	24,84	1,43	23,0	22,84	0,7

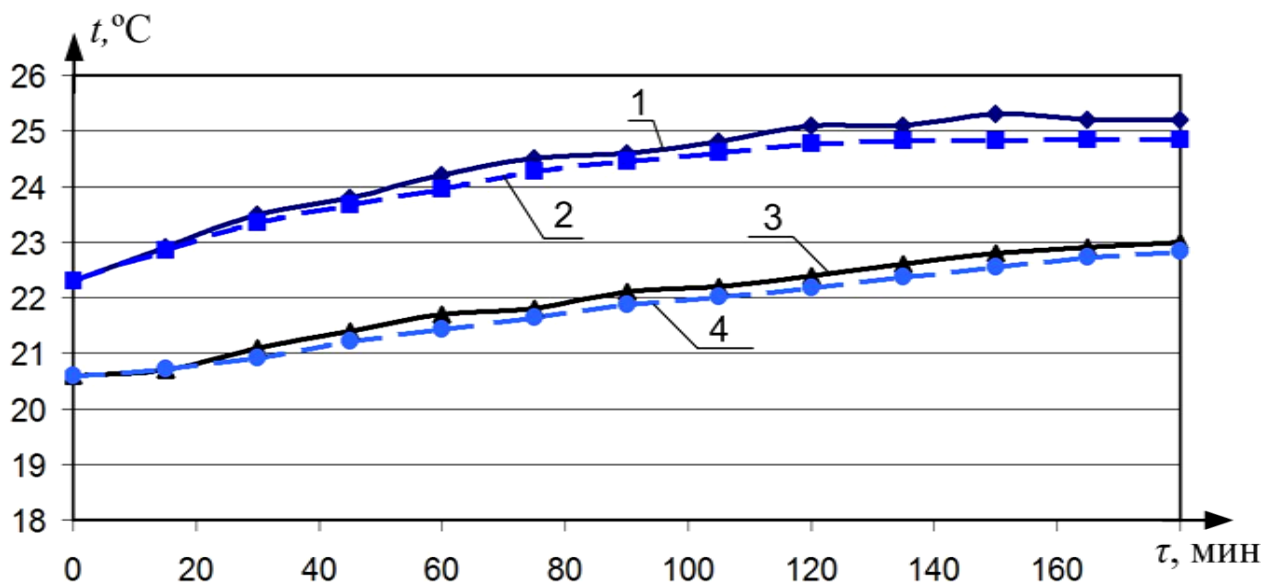


Рисунок 5.36 – Изменение температуры воздуха в точках 2 и 3 в ходе эксперимента и численного моделирования: 1 – т. 2, эксперимент; 2 – т. 2, расчет; 3 – т. 3, эксперимент; 4 – т. 3, расчет

Анализ таблицы 5.10 и рисунка 5.36 показывает, что более динамично прогревалась рабочая зона помещения (т. 2), расположенная внутри пространства, ограниченного панелями щитов управления, чем пространство около окон (т.3). Так, рост температуры, выявленный в ходе проведения эксперимента, для т. 2 составил 2,9 °С за 180 минут, а для т. 3 – 2,4 °С. Необходимо отметить, что стационарный процесс теплообмена установился для т. 2 через 120 минут после начала эксперимента.

Данные экспериментальных исследований по определению температуры внутреннего воздуха для т. 3 совпадают с результатами расчета с меньшей погрешностью, чем для т. 2. Среднее значение относительной погрешности расчета  $\delta t$  для т. 3 составила 0,84 %, максимальное значение – 1,24 %; для т. 2 среднее значение  $\delta t$  равняется 0,97 %, а максимальное – 1,86 %.

Анализ таблицы 5.10 и рисунка 5.36 свидетельствует об удовлетворительном совпадении результатов расчета процесса нагрева помещения тренажера БЩУ АЭС в ПБК COMSOL Multiphysics с результатами экспериментальных исследований, что подтверждает возможность использования разработанной имитационной модели микроклимата для расчета процессов нагрева / охлаждения помещения при отсутствии воздухообмена в помещении (дежурный режим отопления для вариантов №3 и №4). Верификация результатов моделирования микроклимата в помещении тренажера БЩУ АЭС при централизованной подаче / удалении воздуха требует проведения дополнительных экспериментов после монтажа и наладки СКВ.

#### **5.4.3 Расчет экономической эффективности применения энергоэффективных светопрозрачных конструкций при создании динамического микроклимата**

Для оценки целесообразности применения разработанных энергосберегающих мероприятия при организации динамического микроклимата в помещении

тренажера БЩУ АЭС следует выполнить расчет технико-экономических показателей, к которым относятся срок окупаемости, индекс доходности и другие. Оценка капитальных затрат и экономии производилась с учетом стоимости энергоресурсов, оборудования и материалов по состоянию на декабрь 2021 года.

*Капитальные затраты* на реализацию технического решения по применению энергоэффективного ставня в окнах  $K_{ст}$  складываются из нескольких показателей:

а) затраты на изготовление 8-ми ставней, включающих в себя три теплоотражающих экрана и солнечную фотоэлектрическую панель, общей площадью 24,5 м<sup>2</sup>;

б) затраты на приобретение электроприводов и их совместный монтаж вместе со ставнями в оконный проем;

в) затраты на приобретение и монтаж системы автоматизации управления работой привода энергосберегающего ставня (см. пункт 2.4.3);

г) затраты на приобретение и монтаж системы аккумулирования электрической энергии, выработанной в панели, преобразования постоянного электрического тока в переменный, синхронизация с работой внутренней электросети помещения (см. рисунок 2.18).

Капитальные затраты  $K_{ст}$  составили 102 500 рублей.

К капитальным затратам на организацию дежурного режима отопления  $K_{д.о}$  относятся финансовые вложения, связанные с приобретением, монтажом и наладкой контроллера, дополнительно к существующей системе автоматического управления работой центрального кондиционера, в том числе и при создании динамического микроклимата в помещении. Данные капитальные затраты оцениваются в 34 700 рублей.

*Полученную выгоду* от экономии  $\mathcal{E}$ , руб/год, в течение года теплоты, холода на организацию микроклимата, а также от генерации электрической энергии в солнечной панели можно определить по формуле

$$\mathcal{E} = (E_{m1} - E_{mj}) \cdot C_m + (E_{m1} - E_{mj}) \cdot C_x + E_{\text{э}} \cdot C_{\text{э}}. \quad (5.20)$$

где  $E_{m1}$ ,  $E_{mj}$  – соответственно, затраты теплоты при первом и j-ом варианте организации микроклимата в помещении (см. таблицу 5.9), ГДж/год;

$E_{x1}$ ,  $E_{xj}$  – соответственно, затраты холода при первом и j-ом варианте организации микроклимата в помещении (см. таблицу 5.9), ГДж/год;

$C_m$ ,  $C_x$  – соответственно, цена за 1 ГДж теплоты или холода, руб/ГДж;

$E_{э}$  – количество выработанной за календарный год в солнечной панели электрической энергии, кВт·ч;

$C_{э}$  – тариф на электрическую энергию, руб/кВт·ч.

При расчетах было принято, что  $C_m = 415$  руб/ГДж;  $C_x = 328$  руб/ГДж;  $C_{э} = 7,20$  руб/кВт·ч.

Простой срок окупаемости можно определить как

$$\tau_{ок} = \frac{K}{\mathcal{E}}. \quad (5.21)$$

Чистый дисконтированный доход ( $NPV$ ), руб, можно найти с помощью формулы

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{\mathcal{E}_t}{(1+r)^t} - K, \quad (5.22)$$

где  $n$  – число периодов;

$\mathcal{E}_t$  – экономия денежных средств за период  $t$ , руб;

$r$  – норма дисконта;

$K$  – капитальные затраты, руб.

Индекс доходности инвестиций  $PI$  можно определить как

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{\mathcal{E}_t}{(1+r)^t}}{K}, \quad (5.23)$$

Дисконтированный срок окупаемости  $DPP$  определяется из равенства

$$\sum_{t=1}^{DPP} \frac{CF_t}{(1+r)^t} = K, \quad (5.24)$$

где  $CF_t$  – денежный поток за период времени  $t$ .

Результаты расчета технико-экономических показателей приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Техничко-экономические показатели применения разработанных энергосберегающих мероприятий при организации микроклимата в помещении тренажера БЦУ АЭС (по состоянию на декабрь 2021 года)

Показатель	Обозначение	Ед. измерения	Значения по вариантам		
			2-ой (ставень)	3-ий (ставень+ деж. реж.)	4-ый (ставень + деж. реж.+ осушка)
Капитальные затраты	$K$	тыс. руб	102,5	137,2	137,2
Экономия денежных средств в период $t$	$\mathcal{E}_t$	тыс. руб/год	18,1	37,1	40,0
Срок работы проекта	$n$	лет	10	10	10
Норма дисконта	$r$	–	0,11	0,11	0,11
Чистый дисконтированный доход	$NPV$	тыс. руб	4,1	81,3	98,4
Индекс доходности инвестиций	$PI$	–	1,04	1,59	1,72
Простой срок окупаемости	$\tau_{ок}$	лет	5,7	3,7	3,4
Дисконтированный срок окупаемости	$DPP$	лет	9,4	5,1	4,6

Анализ данных, представленных в таблице 5.11, позволяет сделать вывод о том, что дисконтированный срок окупаемости для варианта применения энергоэффективного ставня в окнах, равный 9,4 года, приближается к запланированному сроку проекта  $n$  (10 лет), а индекс доходности инвестиций очень мал. Необходимо отметить, что в годовой экономии денежных средств для второго варианта из 18,1 тыс. рублей 11,7 тыс. рублей приходится на генерацию электроэнергии в солнечной панели (или 65 %). Дополнительное применение дежурного режима отопления позволяет значительно снизить срок окупаемости до 5,1 года, причем экономия увеличивается до 37,1 тыс. рублей в год (в 2,05 раза). Четвертый вариант с применением предварительной осушки воздуха является самым экономически привлекательным: срок окупаемости составляет 4,6 года, а экономия возрастает до 40 тыс. рублей в год.

Таким образом, при моделировании микроклимата в помещении тренажера БЩУ АЭС были учтены переходные процессы при изменении внутренних и внешних факторов, связанных с функционированием данного объекта. Наибольший энергосберегающий и экономический годовой эффект даёт мероприятие по снижению температуры воздуха в нерабочее время, хотя и применение энергоэффективного ставня в окнах также значительно (на 14,9 %) снижает потребление тепловой энергии.

Предложения по организации энергосберегающего режима работы оборудования, обеспечивающего динамический микроклимат в помещении, а также результаты математического моделирования динамического микроклимата использованы при разработке рекомендаций по реконструкции лаборатории «Энергоэффективные процессы и энергосберегающее оборудование» (аудитория А-170), а также помещения полномасштабного тренажера блочного щита управления АЭС (аудитория А-169), а также рекомендованы к внедрению ремонтно-строительным управлением ИГЭУ. Соответствующий акт внедрения приведен в Приложении В.

## **5.5 Выводы по пятому разделу**

1. Разработана методика определения значения минимальной температуры внутреннего воздуха в нерабочее время при условии недопущения выпадения конденсата на внутренних поверхностях разработанных светопрозрачных конструкций при наличии или отсутствии предварительной осушки воздуха. В качестве способа осушки воздуха выбран вариант смешения внутреннего и наружного воздуха. На основании разработанной методики осуществлен расчет значений минимальной температуры для климатических условий нескольких городов Российской Федерации. Выявлен значительный эффект по снижению тепловых трансмиссионных потерь (до 85 %) при совместном использовании в светопрозрачных конструкциях экранов и понижения температуры внутреннего воздуха в нерабочее время.



2. Разработан инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции за отопительный период года с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации на основе аппроксимации результатов математического моделирования, который позволяет выполнить количественную оценку эффективности использования экранов за определенный промежуток времени для условий различных населенных пунктов.

3. Разработаны мероприятия по реконструкции тепловой защиты и оптимизации теплового режима эксплуатации производственного помещения машиностроительного предприятия АО "ПСК". Выполнена энергетическая оценка их применения. В случае использования экранов в светопрозрачных конструкциях и дежурного режима отопления трансмиссионные потери тепловой энергии через светопрозрачные конструкции за отопительный период снизятся на 107,6 ГДж (или на 53,6 %). Применение теплоотражающих металлических жалюзи в межстекольном пространстве светопрозрачных конструкций позволит значительно уменьшить инсоляционные поступления тепловой энергии в помещение за теплый период года с 335 до 117 ГДж, снижение составит 218 ГДж (или 65 %). Мероприятия и результаты расчета признаны полезными и предложены для включения в стратегический план развития АО "ПСК".

4. Разработанная математическая модель динамического микроклимата, учитывающая нелинейную зависимость сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами от температурного режима эксплуатации, а также генерацию электрической энергии при помощи солнечных батарей, была реализована в ППК COMSOL Multiphysics для помещения тренажера БЩУ АЭС, расположенного в ИГЭУ. На основании выполненного моделирования были определены годовые затраты теплоты и холода системой кондиционирования воздуха для организации указанного микроклимата с учетом применения разработанных энергосберегающих мероприятий. Самый эффективный вариант из всех рассмотренных – это применение теплоотражающих экранов в окнах и понижение температуры воздуха в нерабочее время до минимально-возможной с

предварительной осушкой воздуха: потребления теплоты СКВ снизилось на 67,1 ГДж/год (или на 70,2 %), холода – на 1,4 ГДж/год (или на 3,8 %). Выработка электрической энергии в солнечных батареях составила 1627 кВт·ч за год. Разработанные мероприятия рекомендованы к внедрению.

5. Рассчитаны основные технико-экономические показатели применения разработанных энергосберегающих мероприятий при организации микроклимата в помещении тренажера БЩУ АЭС. Дисконтированный срок окупаемости при использовании энергоэффективного ставня в окнах составил 9,4 года; ставня и понижения температуры внутреннего воздуха в нерабочее время при предварительной осушке – 4,6 года.

6. Методика по определению минимальной температуры внутреннего воздуха в помещении, а также метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции за отопительный период года внедрены в учебный процесс по кафедре промышленной теплоэнергетике ИГЭУ при изучении дисциплин «Энергетические системы создания технологического и комфортного микроклимата» и «Испытание и наладка систем технологического и комфортного микроклимата», а также при выполнении обучающимися научно-исследовательской и выпускной квалификационной работы. Вышеуказанные результаты работы переданы в НКО Фонд «Энергоэффективность» (г. Ярославль).

Материалы пятого раздела опубликованы в работах автора [191, 192, 193, 195, 196, 197, 199, 201, 203].

## Заключение

1. Выполнен обзор научно-технической литературы по теме исследования, в результате которого выявлены достоинства и недостатки используемых энерго-сберегающих мероприятий при организации микроклимата, в том числе по теплозащите зданий; методов расчета и математического моделирования микроклимата в помещениях. Доказана необходимость разработки новых энергосберегающих светопрозрачных конструкций, а также их совместного использования в системах динамического микроклимата.

2. Предложены новые энергосберегающие научные и инженерные решения в светопрозрачных конструкциях, в том числе с использованием теплоотражающих экранов и солнечных фотоэлектрических батарей, которые позволяют не только снижать тепловые потери и инсоляцию, но и генерировать электроэнергию.

3. Получены новые экспериментальные данные о влиянии применения теплоотражающих экранов различной конфигурации и свойств на теплотехнические характеристики оконных блоков. Установлено, что применение металлических экранов позволяет в  $1,51 \div 3,79$  раза увеличить приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной ограждающей конструкции.

4. Разработана модель процесса теплопередачи через стеклопакет с применением теплоотражающих экранов, реализованная в ПК Matlab и Phoenics. Адекватность математической модели доказана путем сравнения результатов расчета с экспериментальными и литературными данными. Относительная погрешность моделирования составила не более 7,3%. Приведены номограммы и аналитические зависимости для определения сопротивления теплопередачи новых конструкций.

5. На основании данных физического эксперимента и математического моделирования установлена количественная зависимость приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами от геометрических размеров и физических свойств стекол, экранов и обра-

зованных ими воздушных прослоек, а также от температурного режима эксплуатации данных конструкций.

6. Разработан инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции в текущий момент времени и за отопительный период года с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации на основе аппроксимации результатов математического моделирования.

7. Разработана методика определения значения минимальной температуры внутреннего воздуха в нерабочее время при условии недопущения выпадения конденсата на внутренних поверхностях разработанных светопрозрачных конструкций при наличии или отсутствии предварительной осушки воздуха. Данная методика позволяет значительно снизить затраты энергии на поддержание заданных параметров микроклимата.

8. На основе численного моделирования классического и динамического микроклимата для различных помещений и зданий с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями определен эффект от предложенных энергосберегающих решений. Максимальная экономия годовых затрат теплоты составила 70,2 % при сроке окупаемости, равном 4,6 года.

9. Результаты диссертационной работы переданы НКО Фонд "Энергоэффективность" (г. Ярославль), АНО "Ивановостройиспытания" (г. Иваново), АО «ПСК» (г. Иваново), ИГЭУ и внедрены в учебный процесс.

## Список литературы

1. **Авраменко, М.И.** О k-ε модели турбулентности / М.И. Авраменко. – Снежинск, Издательство РФЯЦ. – ВНИИТФ, 2005. – 76 с.
2. **Аникеев, А.А.** Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики: учебное пособие / А.А. Аникеев, А.М. Молчанов, Д.С. Янышев. – М.: Книжный дом "ЛИБРИКОМ", 2010. – 149 с.
3. **Анисимова, Е.Ю.** Эффективность управления микроклиматом здания в нерабочее время / Е.Ю. Анисимова, В.И. Панферов // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – № 2. – С. 72-78.
4. **Ахмяров, Т.А.** Новое поколение энергоэффективных вентилируемых светопрозрачных и фасадных конструкций с активной рекуперацией теплового потока / Т.А. Ахмяров, А.В. Спиридонов, И.Л. Шубин // Жилищное строительство. – 2015. – № 1. – С. 18-23.
5. **Баланс энергоресурсов 2005 - 2020гг.** [Электронный ресурс]. – М.: Федеральная служба государственной статистики, 2021. – Режим доступа: [https://rosstat.gov.ru/enterprise\\_industrial](https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial) {дата обращения: 12.11.2021}.
6. **Банникова, С.А.** Математическое моделирование теплопереноса в непроходных каналах тепловых сетей / С.А. Банникова // Вестник ИГЭУ. – 2022. – № 1. – С. 12-21.
7. **Беляев, В.С.** Повышение тепловой эффективности окон и улучшение воздушного режима помещений / В.С. Беляев, С.К. Есенгабулов // Строительная физика в XXI веке: материалы научно-технической конференции. – М.: НИИСФ РААСН, 2006. – С. 88-90.
8. **Богословский, В.Н.** Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. для вузов. / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982 – 415 с.
9. **Бухмиров, В.В.** Оценка микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий / В.В. Бухмиров, М.В. Пророкова // Вестник ИГЭУ. – 2015. – № 4. – С. 5 -10.

10. **Бухмиров, В.В.** Применение тонкопленочных покрытий в целях энергосбережения / В.В. Бухмиров, А.К. Гаськов // Вестник ИГЭУ. – 2015. – № 5. – С. 26-31.
11. **Бухмиров, В.В.** Совершенствование системы тепловоздухоснабжения главного корпуса ТЭС на основе математического моделирования / В.В. Бухмиров, А.Ю. Гильмутдинов, Д.В. Ракутина. // Вестник ИГЭУ. – 2011. – № 1. – С. 4-7.
12. **Бухмиров, В.В.** Тепломассообмен: учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново: Б.и., 2014. – 360 с.
13. **Бушуев, В.В.** Инновационная электроэнергетика – 21. Технологические тенденции развития энергетики / В.В. Бушуев // Электро. – 2011. – №11. – С. 2-8.
14. **Варапаев, В.Н.** Численное моделирование сопряженной задачи теплообмена в стеклопакетах оконных ограждений / В.Н. Варапаев, С.С. Голубев // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 11. – С. 72-75.
15. **Гагарин, В.Г.** Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов В.В. // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3-1. – С. 192-200.
16. **Гаранин, А. В.** Построение модели динамического микроклимата для промышленного здания с учётом изменения температуры воздуха по его высоте / А.В. Гаранин // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – №. 3 (10). – С. 5-37.
17. **Гаранин, А.В.** Математическое моделирование динамического микроклимата промышленного здания и анализ изменения потребления теплоты и холода при выполнении энергосберегающих мероприятий / А.В. Гаранин, В.К. Пыжов // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения). – Т2 – Иваново.: ГОУ ВПО "ИГЭУ имени В.И.Ленина", 2009. – С. 254-256.
18. **Гаранин, А.В.** Моделирование теплоустойчивости многослойных ограждающих конструкций / А.В. Гаранин, В.К. Пыжов // Вестник ИГЭУ. – 2004. – № 6. – С. 20-24.

19. **Гаранин, А.В.** Разработка систем динамического микроклимата и создание на их основе энергосберегающих режимов работы оборудования: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.14.04 / Гаранин Алексей Валентинович. – Иваново, 2010. – 20 с.

20. **Гаранин, А.В.** Разработка систем динамического микроклимата и создание на их основе энергосберегающих режимов работы оборудования: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Гаранин Алексей Валентинович. – Иваново, 2010. – 210 с.

21. **Гильмутдинов А.Ю.** Совершенствование системы тепловоздухообмена главного корпуса ТЭС с целью сбережения энергоресурсов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Гильмутдинов Алексей Юрьевич. – Иваново, 2011. – 163 с.

22. **Глазов, В.С.** Введение в программный комплекс PHOENICS : учебное пособие по курсу "Математическое моделирование" по направлению "Теплоэнергетика и теплотехника" / В.С. Глазов, Н.В. Хомченко, А.Ю. Маскинская ; ред. В.С. Глазов ; Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2017 . – 60 с.

23. **Голубков, Б.Н.** Проектирование и эксплуатация установок кондиционирования воздуха и отопления: учеб. пособие / Б.Н. Голубков, Т.М. Романова, В.А. Гусев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 190 с.

24. **Горбунов, В.А.** Моделирование теплообмена в конечно-элементарном пакете FEMLAB: учеб. пособие / В.А. Горбунов; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» – Иваново, 2008. – 216 с.

25. **ГОСТ 111-2014.** Стекло листовое бесцветное. Технические условия (с Изменением N 1, с Поправкой). – Введ. 2016-04-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 8 с.

26. **ГОСТ 12.1.005-88\*** (актуализирован 19.03.2013). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны // Система стандартов безопасности труда. – Введен 1989-01-01 – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 76 с.

27. **ГОСТ 17622-72.** Стекло органическое техническое. Технические условия. – Введ. 1973-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 20 с.

28. **ГОСТ 1790-77.** Проволока из сплавов хромель Т, алюмель, копель и константан для термоэлектропроводов термоэлектрических преобразователей. Технические условия. – Введ. 1978-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 22 с.
29. **ГОСТ 24866-2014.** Стеклопакеты клееные. Технические условия (с Изменением N 1). – Введ. 2016-04-01. – М.: Стандартиформ, 2015. – 24 с.
30. **ГОСТ 24866-99.** Стеклопакеты клееные строительного назначения. Технические условия. – Введ. 2001-01-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. – 24 с.
31. **ГОСТ 26602.1-99.** Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче. – Введ. 2000-01-01. – М.: Изд-во ГУП ЦПП, 1999. – 32 с.
32. **ГОСТ 30494-96\*** (актуализирован 23.10.2010 г.) Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях / Госстрой России. – Введ. 1999-03-01. – М.: Издательство стандартов, 2012. – 17 с.
33. **ГОСТ 31364-2014.** Стекло с низкоэмиссионным мягким покрытием. Технические условия (с Изменением N 1, с Поправкой). – Введ. 2016-04-01. – М.: Стандартиформ, 2015. – 12 с.
34. **ГОСТ Р 51387-99.** Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. – Введ. 2000-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 45 с.
35. **ГОСТ Р 54531-2011** Нетрадиционные технологии. Возобновляемые и альтернативные источники энергии. Термины и определения. – Введ. 2011-11-28. – М.: ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ", 2013. – 16 с.
36. **ГОСТ Р 54852-2011** Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций [утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2011 г. N 1557-ст]. – Введ. 2012-05-01. – М.: Стандартиформ, 2012. – 19 с.
37. **ГОСТ Р 54861-2011** Окна и наружные двери. Методы определения сопротивления теплопередаче – Введ. 2012-07-01. – Отменен 2019-06-01. – М.: Стандартиформ, 2012. – 16 с.



38. **ГОСТ Р 8.736-2011.** Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. ). – Введ. 2013-01-01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.

39. **Гримитлин, М.И.** Распределение воздуха в помещении / М.И. Гримитлин. – СПб.: Издательство «Авок Северо-запад», 2004г. – 399с.

40. **Данилевский, Л.Н.** Минимизация потребления тепловой энергии в жилых зданиях / Л.Н. Данилевский // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2014. – № 2. – С. 82-87.

41. **Данилов, Н.И.** Основы энергосбережения / Н.И. Данилов, Я.М. Щелков; под. ред. Н.И. Данилова. – Екатеринбург: ГУСО «Институт энергосбережения», 2008. – 526 с.

42. **Дацюк, Т.А.** Моделирование процесса вентиляции [Электронный ресурс] / Т.А. Дацюк, А.В. Сауц, Б.Н. Юрманов, В.Р. Таурит // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=6744> {дата обращения: 03.10.2021}.

43. **Дацюк, Т.А.** Моделирование теплового режима жилых помещений при прерывистом отоплении / Т.А. Дацюк, Ю.П. Ивлев, В.А. Пухкал // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 179-185.

44. **Дебрин, А.С.** Обзор солнечных панелей и фотоэлектрических станций отечественных производителей / А.С. Дебрин, А.В. Бастрон, В.Н. Урсегов // Вестник КрасГАУ. – 2018. – № 6. – С. 136-141.

45. **Дегтярь, А.Б.** Построение алгоритма импульсного отопления зданий и исследование режимов его работы / А.Б. Дегтярь, В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – № 17. – с. 41-44.

46. **Директор, Л.Б.** Научные основы современных технологий энергосбережения и методы их реализации: автореф. дис. ... докт. тех. наук: 05.14.01 / Директор Леонид Бенцианович. – Москва, 2008. – 48 с.

47. **Дубинин, Д.В.** Энергетическая эффективность работы солнечных батарей в реальных режимах эксплуатации / Д.В. Дубинин, В.Е. Лаевский // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 58-62.

48. **Дударев, А.А.** Микроклиматический комфорт и воздухораспределение: несколько шагов навстречу / А.А. Дударев, А.Г. Сотников // Инженерные системы. АВОК Северо-Запад. – 2013. – №1. – С. 2-9.

49. **Жуков, А.Н.** Исследование возможности применения жидких керамических теплоизоляций для повышения сопротивления теплопередаче совмещенных кровельных покрытий / А.Н. Жуков, А.Г. Перехоженцев // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – №. 27. – С. 5-9.

50. **Закон** Французской республики № 2009-967 от 3 августа 2009 г. "Programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement" [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000020949548>. {дата обращения: 22.04.2022}.

51. **Ильинский, В.М.** Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий): учеб. пособие для инж.-строит. вузов / В.М. Ильинский. – М.: Высшая школа, 1973. – 320 с.

52. **Иляхин, С.В.** Комплексные мероприятия по ресурсосбережению на предприятиях туристской индустрии / С.В. Иляхин // Научный вестник МГИИТ. – 2010. – №3. – С. 54-63.

53. **Интенсивность** использования энергии на единицу ВВП при постоянном паритете покупательной способности по состоянию на 2020 год // Ежегодник Enerdata [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.ru/total-energy/world-energy-intensity-gdp-data.html> {дата обращения: 20.04.2022}.

54. **Кисс, В.В.** Расчет паровой системы теплоснабжения пищевого предприятия: учеб.-метод. пособие / В.В. Кисс, А.В. Казаков, Ю.А. Рахманов – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 68 с.

55. **Князихин, Ю.** Метод дискретных ординат решения уравнений переноса / Ю. Князихин, А. Маршак. – Таллин.: Валгус, 1987. – 163 с.

56. **Корепанов, Е.В.** Термическое сопротивление теплопередаче окна с селективным покрытием и газовым заполнением / Е.В. Корепанов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2005. – № 6 (38). – С. 59-62.

57. **Кривошеин, А.Д.** К вопросу об улучшении температурного режима современных окон в краевых зонах / А.Д. Кривошеин, Д.А. Харламов // Светопрозрачные конструкции. – 2005. – №1. – С. 10-14.

58. **Кузнецов, Г.В.** Численный анализ влияния радиационного теплообмена на тепловые режимы и тепловые потери теплопроводов / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2011. – № 5-6. – С. 12-20.

59. **Куропаткина, М.В.** Ставни, навесы, жалюзи / М.В. Куропаткина. – М.: Феникс, 2008. – 200 с.

60. **Лазаревич, М.И.** Себестоимость продукции на предприятии / М.И. Лазаревич // Экономика. Финансы. Управление. – 2008. – №2. – с.35-40.

61. **Лебедев, В.Д.** Моделирование физических процессов технических устройств в программе COMSOL Multiphysics: учебное пособие / В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков; Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново: Б.и., 2013. – 328 с.

62. **Левин, Е.В.** Мембранные системы регулировки влажности воздуха / Е.В. Левин, А.Ю. Окунев // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 505-511.

63. **Ливчак, В.И.** Энергетическая эффективность зданий. К чему приведет СП 50-13330-2012 «Тепловая защита» и как выполнить постановление Правительства России / В.И. Ливчак // Энергосовет. – 2013. – № 2 (27). – С. 32-41.

64. **Литвиненко, В.В.** Минимизация теплопотерь образовательных учреждений путем управления процессом теплообмена окон / В.В. Литвиненко, М.М. Титов, М.К. Лисин // Энергоэффективность. – 2004. – № 3. – С. 79-83.

65. **Литвинцев, К.Ю.** Совершенствование методов моделирования лучистого теплообмена и оптических свойств среды применительно к высокотехнологичным процессам и пожарам: автореф. дис. канд. тех. наук: 01.04.14 / Литвинцев Кирилл Юрьевич. – Новосибирск, 2012. – 24 с.

66. **Ловцов, В.В.** Системы кондиционирования динамического микроклимата помещений / В.В. Ловцов, Ю.Н. Хомуцкий. – Л.: Стройиздат, 1991. – 150 с.

67. **Логвиненко, В.В.** Тепловые потоки окон с технологией управляемого экранирования / В.В. Логвиненко, А.В. Щегольков // Ползуновский вестник. – 2007. – №4. – С. 71-78.

68. **Лойцянский, Л.Г.** Механика жидкости и газа: учеб. для вузов / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003 г. – 840 с.

69. **Малявина, Е.Г.** Теплотери здания / Е.Г. Малявина. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. – 144 с.

70. **Маркевич, А.С.** Воздушно-тепловой режим помещения / А.С. Маркевич, А.Г. Рымаров // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2010. – № 1. – С. 70-72.

71. **Низовцев, М.И.** Влияние толщины межстекольной прослойки на теплоизолирующие свойства однокамерного стеклопакета / М.И. Низовцев // Свето-прозрачные конструкции. – 2001. - № 4. – С. 2-3.

72. **Низовцев, М.И.** Расчетно-экспериментальные исследования энергоэффективных элементов ограждающих конструкций и климатического оборудования зданий: дис. ... доктора техн. наук: 05.23.03 / Низовцев Михаил Иванович . – Тюмень, 2009. – 338 с.

73. **Низовцев, М.И.** Светопрозрачные конструкции с регулируемыми тепловыми характеристиками / М.И. Низовцев, В.И. Терехов // Проблемы региональной энергетики. – 2011. – №. 1. – С. 60-76.

74. **Новиковский, Е.А.** Работа в системе MathCAD / Е.А. Новиковский. – Барнаул: Типография АлтГТУ, 2013. – 114 с.

75. **Ометова, М.Ю.** Повышение энергоэффективности воздухораспределительных устройств промышленных предприятий: дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Ометова Мария Юрьевна. – Иваново, 2004. – 171 с.

76. **ООО "Неро Электроникс"**. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neroelectronics.ru> . {дата обращения: 20.04.2022}.

77. **Опарина, Л.А.** Теоретические основы процессов организации жизненного цикла энергоэффективных зданий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.22 / Опарина Людмила Анатольевна. – Иваново, 2015. – 300 с.

78. **Отделение Testo в России - ООО "Тэсто Рус"**. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.testo.ru>. {дата обращения: 20.04.2022}.

79. **Панферов, В.И.** Эффективные энергосберегающие решения при теплоснабжении зданий / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова, С.В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2015. – т. 15. – №4. – С. 40-48.

80. **Пат. 18284** Российская Федерация, МПК Е 06 В 7/08 Оконный блок / М. Н. Шипко, В.М. Захаров, В.П. Яблоков, Н.М. Ладаев.; заявитель и патентообладатель ИГЭУ. – № 2000130255/20 : заявл. от 04.12.2000 : опубл. 10.06.2001.

81. **Патанкар, С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

82. **Перминов, В.А.** Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при пожарах с использованием программного обеспечения Phoenix / В.А. Перминов, А.А. Шатохин // Вестник науки Сибири. – 2014. – № 1 (11). – С. 34-38.

83. **Петров, Е.В.** Влияние различных факторов на тепловые характеристики оконных заполнений: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Петров Евгений Владимирович. – Томск, 2000. – 172 с.

84. **Поршнева, С.В.** Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB: учебное пособие для вузов / С.В. Поршнева. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 592 с.

85. **Пособие 2.91** к СНиП 2.04.05-91\*\*. Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения / АО "Промстройпроект". – М.: Промстройпроект, 1993. – 32 с.

86. **Постановление Правительства РФ №754** «Об утверждении Правил предоставления субсидий на реализацию региональных программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://government.ru/dep\\_news/14186/](http://government.ru/dep_news/14186/).

87. **Постановление Правительства РФ от 25 января 2011 г. №18** «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов» (с изменениями и дополнениями) (по состоянию на 25.05.2017 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.energsovet.ru/npb1453.html>. {дата обращения: 22.04.2022}.

88. **Приказ Минрегионразвития РФ от 28 мая 2010 года № 262** «О требованиях энергетической эффективности зданий, строений, сооружений» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/12076199>. {дата обращения: 22.04.2022}.

89. **Приказ Министра России № 98/пр от 15 февраля 2017 г.** "Об утверждении примерных форм перечня мероприятий, проведение которых в большей степени способствует энергосбережению и повышению эффективности использования энергетических ресурсов в многоквартирном доме» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=289673> {дата обращения: 22.04.2022}.

90. **Приказ Министра России от 17.11.2017 г №1550/пр** "Об утверждении Требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений" (Зарегистрирован в Минюсте России 23.03.2018 г № 50492) (по состоянию на 25.06.2018 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://rg.ru/2018/03/27/minstroj-prikaz1550-site-dok.html>. {дата обращения: 22.04.2022}.

91. **Приказ Министра РФ** от 06.06.2016 N 399/ПР "Об утверждении правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов" (Зарегистрирован в Минюсте России 8 августа 2016 г. N 43169) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=278092>. {дата обращения: 22.04.2022}

92. **Прима, Л.В.** Информационная база данных по оптическим и теплозащитным характеристикам строительных материалов / **Л.В. Прима, М.В. Горелов, В.С. Глазов, Э.К. Фелькер** // Энергосбережение – теория и практика: труды Восьмой международной школы-семинара молодых учёных и специалистов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – С. 165-170.

93. **Пророкова, М.В.** Повышение эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом комфортности микроклимата: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Пророкова Мария Владимировна. – Иваново, 2017. – 202 с.

94. **Пыжов, В.К.** Проектирование и эксплуатация систем кондиционирования, вентиляции и отопления: учеб. для вузов / В.К. Пыжов. – Иваново, 2011. – 568 с.

95. **Пыжов, В.К.** Разработка математической модели системы кондиционирования динамического микроклимата на тренажёре блочного щита управления атомной электрической станции / В.К. Пыжов, А.С. Сафронов, Д.А. Кругликов, П.А. Комарницкий, Н.Н. Смирнов // XII Международная молодёжная научная конференция «Гинчуринские чтения»: Материалы конференции. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – Т.2. – С. 121-123.

96. **Пыжов, В.К.** Энергетические системы обеспечения жизни и деятельности человека: учеб. для вузов / В.К. Пыжов. – Иваново, 2014. – 524 с.

97. **Распоряжение** Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р. Об энергетической стратегии России до 2030 года. [Электронный ресурс] – Режим доступа:

[http://energoeducation.ru/wp-content/uploads/2015/11/LAW94054\\_0\\_20151002\\_142857\\_54007.pdf](http://energoeducation.ru/wp-content/uploads/2015/11/LAW94054_0_20151002_142857_54007.pdf). – 103 с. {дата обращения: 06.01.2021}

98. **Расчет** времени восхода и захода солнца для различных городов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://voshod-solnca.ru/sun>. {дата обращения: 20.04.2022}.

99. **Редько, Ю.Б.** К вопросу о применении однокамерных стеклопакетов в оконных блоках / Ю. Б. Редько // Кровельные и изоляционные материалы. – 2014. – № 4. – С. 24-31.

100. **Руководство** по теплотехническому расчету и проектированию ограждающих конструкций зданий / НИИ строит. физики – М.: Стройиздат, 1985. – 143 с.

101. **Русяк, И.Г.** Проектирование многослойных оконных систем с заданными тепловыми характеристиками / И.Г. Русяк, С.А. Королёв // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. – 2004. – №4. – С. 71-73.

102. **Рыжков, И.Б.** Основы научных исследований и изобретательства / И.Б. Рыжков. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 224 с.

103. **Савин, В.К.** Архитектура и энергоэффективность окна / В.К. Савин, Н.В. Савина // Жилищное строительство. – 2015. – № 10. – С. 47-50.

104. **Савин, В.К.** Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение / В.К. Савин – М.: «Лазурь», 2005. – 432 с.

105. **Савин, В.К.** Теоретические основы и инженерные методы теплотехнических расчетов светопрозрачных конструкций: дис. ...докт. техн. наук: 05.23.03 / Савин Владимир Константинович. – Москва, 1985. – 381 с.

106. **Самарин, О.Д.** Расчет энергоэффективности зданий и сравнительная эффективность энергосберегающих мероприятий / О.Д. Самарин, П.С. Васин, Н.Н. Зайцев, Р.Ф. Гарифуллин, Н.В. Загорцева // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 5. – С.44-46.

107. **Самойленко, В.Ю.** Оптимизация систем утилизации теплоты воздуха, удаляемого из помещений с повышенным влаговыведением: автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.03 / Самойленко Валентина Юрьевна. – М., 2013. – 20 с.



108. **СанПиН 1.2.3685-21** Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 2] [Электронный ресурс]. – Введ. 2021-03-01. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?section=text> {дата обращения: 05.01.2022}.

109. **Светов, А.Ф.** Уметь нужно платить меньше, а получать больше. Резервы снижения себестоимости продукции / А.Ф. Светов // Экономика. Финансы. Управление. – 2008. – №3. – С.41-45.

110. **Сенникова, О.Б.** Теплоэнергетические системы промышленных предприятий: курс лекций / О.Б. Сенникова. – М.: Московский государственный индустриальный университет, 2011. – 160 с.

111. **Сеппанен, О.** Требования к энергоэффективности зданий в странах ЕС / О. Сеппанен // Энергосбережение. – 2010. – № 7. – С. 14-17.

112. **Сидорович, В.** Углеродно-нейтральный жилой район из 35 домов появится в Великобритании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://renew.ru/carbon-neutral-residential-district-35-homes-uk>. {дата обращения: 20.04.2022}.

113. **Слободяник, С.Н.** Анализ и прогнозирование сдвигов в уровне и структуре энергопотребления России: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Слободяник Светлана Николаевна. – М., 2015. – 195 с.

114. **Слободяник, С.Н.** ТЭР: тенденции ресурсоэкономии / С.Н. Слободяник, Л.И. Тишина // Международная научно-практическая конференция «Межотраслевой баланс-история и перспективы: доклады, статьи, материалы». – М.: ГУ ИМЭИ, 2011. – С. 175-181.

115. **Снегирев, А.Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие / А.Ю. Снегирев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.

116. **Соколов, А.К.** Энергосистемы обеспечения жизнедеятельности: учебное пособие / А. К. Соколов; Министерство науки и высшего образования Рос-

сийской Федерации, Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина. – Иваново: Б.и., 2021. – 160 с.

117. **Соколов, Н. А.** Измерение теплопроводности строительных материалов в России / Н. А. Соколов // Главный метролог. – 2018. – № 2(101). – С. 48-53.

118. **Соколов, Н.А.** Метрологическое обеспечении теплофизических свойств светопрозрачных ограждающих конструкций / Н.А. Соколов // Светопрозрачные конструкции. – 2002. – № 3. – С. 62-64.

119. **Соколов, Н.А.** Метрологическое обеспечение теплофизических свойств светопрозрачных ограждающих конструкций. Часть 2. Влияние параметров климатической камеры / Н.А. Соколов // Светопрозрачные конструкции. – 2002. – № 5-6. – С. 80-83.

120. **Соколов, Н.А.** Метрологическое обеспечение энергосбережения (Измерение теплопроводности и связанных с ней величин): монография / Н.А. Соколов. – СПб: НИУПЦ «Межрегиональный институт окна», 2005. – 128 с.

121. **Соколов, Н.А.** Система измерения сопротивления термического (теплопроводности) образцов конструкций СИСТОК 7076 / Н.А. Соколов // Светопрозрачные конструкции. – 2004. – № 1. – С. 22-23.

122. **СП 131.13330.2012.** Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*: [утв. приказом Минрегион России от 30 июня 2012 г. N 275]. – Введ. 2013-01-01. – М.: ФЦС, 2012. – 109 с.

123. **СП 131.13330.2020.** Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*: [утв. приказом Минстроя России от 24 декабря 2020 г. N 859]. – Введ. 2021-06-25. – М.: Стандартинформ, 2021. – 154 с.

124. **СП 23-101-2004** Проектирование тепловой защиты зданий. [утв. совместным приказом ОАО "ЦНИИпромзданий" и ФГУП ЦНС от 23 апреля 2004 г. N 01]. – Введ. 2004-06-01. – М.: ФГУП ЦПП, 2004 – 320 с.

125. **СП 370.1325800.2017.** Устройства солнцезащитные зданий. Правила проектирования [утв. приказом Минстроя России от 05 декабря 2017г. N 1615/пр]. – Введ. 2018-06-06. – М.: Стандартинформ, 2018 – 57 с.

126. **СП 426.1325800.2020.** Конструкции ограждающие светопрозрачные зданий и сооружений. Правила проектирования [утв. приказом Минстроя России от 30 декабря 2020 г. N 896/пр]. – Введ. 2021-08-01. – М.: Стандартинформ, 2021 – 50 с.

127. **СП 50.13330.2012** Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Введен 2013-07-01.– М.: ФАУ ФЦС, 2012. – 96 с.

128. **СП 52.13330.2016.** Естественное и искусственное освещение [утв. приказом Минстроя России от 7 ноября 2016 г. N 777/пр] . – Введен 2017-05-08. – М.: ЦПП, 2018. – 74 с.

129. **СП 56.13330.2011.** Производственные здания [утв. приказом Минрегиона России от 30 декабря 2010 г. N 850]. – Введен 2011-05-20. – М.: ЦПП, 2011. – 22 с.

130. **СП 60.13330.2020** Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003: [утв. приказом Минстрой России от 30.12.2020 г. № 921/пр]. – Введен 2021-07-01.– М.: Стандартинформ, 2021. – 102 с.

131. **Спиридонов, А.В.** Солнцезащитные устройства: европейская и российская практика нормирования / А.В. Спиридонов, И.Л. Шубин, В.И. Римшин, С.А. Семин //АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2014. – №. 5. – С. 64-68.

132. **Стеклостроитель.** – Лахти: Enterpress Oy, 1997. – 60 с.

133. **Степаненко, М.Н.** Анализ эффективности использования теплонасосных установок для утилизации теплоты вентиляционных выбросов / М.Н. Степаненко, А.В. Мартынов, А.Я. Шелгинский // Надежность и безопасность энергетики. – 2021. – № 4 (14). – С. 180 –188.

134. **СТО НОСТРОЙ 2.23.61-2012.** Конструкции ограждающие светопрозрачные. Окна. Технические требования к конструкциям и проектированию [утв. решением Совета Национального объединения строителей, протокол от 09 апреля 2012 г. № 28]. – Введ. 2012-04-09. – М.: Издательство «БСТ», 2013 – 37 с.

135. **Табунщиков, Ю.А.** Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.

136. **Табунщиков, Ю.А.** Ночные окна – окна с существенно переменной теплзащитой / Ю.А. Табунщиков // Энергосбережение. – 2008. – №. 1. – С. 18-21.

137. **Табунщиков, Ю.А.** Окно как интеллектуальный элемент конструкции здания / Ю.А. Табунщиков // Энергосбережение. – 2008. – №2 – С. 16-21.

138. **Табунщиков, Ю.А.** Пассивные многоэтажные здания / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н. Шилкин // Здания высоких технологий. – 2013. – № 1. – С. 13-21.

139. **Табунщиков, Ю.А.** Пути повышения энергоэффективности эксплуатируемых зданий / Ю.А. Табунщиков, В.И. Ливчак, В.Г. Гагарин, Н.В. Шилкин // АВОК. – 2009. – №5. – С. 38-44.

140. **Табунщиков, Ю.А.** Экспериментальные исследования оптимального управления расходом энергии / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач // АВОК. – 2006. – №1. – С. 32-40.

141. **Табунщиков, Ю.А.** Энергоэффективные здания и инновационные инженерные системы / Ю.А. Табунщиков // АВОК. – 2014. – №1. – С. 6-11.

142. **Телевный, А.М.** Использование конденсата, получаемого во внутреннем блоке системы кондиционирования воздуха (СКВ) для орошения наружного блока / А. М. Телевный, А. Б. Гаряев // Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. – М: Изд. дом МЭИ, 2008. – С. 366-367.

143. **Тимофеева, С.С.** Повышение эффективности систем энергообеспечения промышленных предприятий с использованием технологии газификации угля: автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.14.04: / Тимофеева Светлана Сергеевна. – Казань, 2012. – 16 с.

144. **Тренды и сценарии** развития мировой энергетики в первой половине XXI века / А.М. Белогорьев, В.В. Бушуев, А.И. Громов, Н.К. Куричев и др.; под ред. В.В. Бушуева. – М.: ИД «Энергия», 2011. – 68 с.

145. **Тюрина, Е.В.** Осушение воздуха в помещении бассейна / Е.В. Тюрина, А.А. Ивашкевич // Труды НИРС ТТГВ ТОГУ. – Хабаровск: ТОГУ, 2010. – С. 35-43.

146. **Фангер, П.О.** Качество внутреннего воздуха в XXI веке: влияние на комфорт, производительность и здоровье людей / П.О. Фангер // АВОК. – 2003. – № 4. – С. 12 – 21.

147. **Федеральный закон № 261-ФЗ** от 23 ноября 2009 г.: "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" [принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г.] // Российская газета. – 2009. – 27 ноября (№ 226).

148. **Федосов, С.В.** Высокотехнологическая система воздушного теплового насоса "три в одном" для малоэтажных и коттеджных строений / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, И. А. Зайцева, В. А. Емелин // Приборы. – 2020. – № 2(236). – С. 49-53.

149. **Федосов, С.В.** Многокритериальный процесс моделирования тепло-массопереноса в воздушных теплонасосных системах с целью энергоресурсосберегающих решений методом анализа иерархий / С.В. Федосов, В.Н. Федосеев, И.А. Зайцева // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2020. – № 3 (63). – С. 98-111.

150. **Фокин, В.Г.** Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела: учеб. пособие / В.Г. Фокин; Федеральное агентство по образованию, ФГБОУВПО «Самарский государственный технический университет». – Самара, 2010. – 131 с.

151. **Фокин, К.Ф.** Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.

152. **Цыбатов, В.А.** Экономический рост как важнейший фактор снижения энергоёмкости валового регионального продукта / В.А. Цыбатов // Экономика региона. – 2020. – № 16 (3). – С. 739-753.

153. **Чернов, В.А.** Тепловой режим жилых зданий в зимних условиях Крайнего Севера: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Чернов Виктор Александрович. – М., 1981. – 179 с.

154. **Шепелев, И.А.** Аэродинамика воздушных потоков в помещении / И.А. Шепелев. – М.: Стройиздат, 1978. – 94с.

155. **Энергетическая стратегия** России на период до 2035 года [Электронный ресурс]. [утв. Распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р]. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> – 92 с. {дата обращения: 22.04.2022}

156. **Яковлев, И.В.** Применение теплового насоса для глубокой утилизации теплоты влажного вентиляционного воздуха в бассейне НИУ "МЭИ" / И.В. Яковлев, А.Б. Горяев, С.П. Манчха, В.Ю. Самойленко, Парёхина И.В. // Экологическое образование и охрана окружающей среды. Технические университеты в формировании единого научно-технологического и образовательного пространства СНГ: сборник докладов. – М.: 2014. – С. 233-239.

157. **Arasteh, D.K.** A versatile procedure for calculating heat transfer through windows / D.K. Arasteh, M.S. Reilly, M.D. Rubin. – Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, 1989. – 24 p.

158. **Ballif, C.** Integrated thinking for photovoltaics in buildings / C. Ballif, LE. Perret-Aebi, S. Lufkin, E. Rey // Nature Energy. –2018. –№ 3. – pp. 438–442.

159. **Barenburg, A.W.T.** Psychrometry and psychrometric charts / A.W.T. Barenburg // 3rd Edition. – Cape Town, S.A.: Cape and Transvaal Printers Ltd., 1974. – 147 p.

160. **Bozsaky, D.** Laboratory tests with liquid nano-ceramic thermal insulation coating / D. Bozsaky //Procedia Engineering. – 2015. – Т. 123. – С. 68-75.

161. **Casini, M.** Smart windows for energy efficiency of buildings / M. Casini // Proceedings of Second International Conference on Advances in Civil, Structural and Environmental Engineering–ACSEE. – 2014. – pp. 273-281.

162. **Chan, L.S.** Investigating the thermal performance and Overall Thermal Transfer Value (OTTV) of air-conditioned buildings under the effect of adjacent shading against solar radiation / L. S. Chan //Journal of Building Engineering. – 2021. – Т. 44. – С. 103-211.

163. **CO<sub>2</sub> Emissions** from Fuel Combustion Highlights, 2013. International Energy Agency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2013.pdf>

164. **Curcija, D.Ch.** Energy savings from window attachments / D.Ch. Curcija, M.Yazdanian, C. Kohler, R. Hart, R. Mitchell. – Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013. – 106 с.

165. **David, M.** Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades / M. David, M. Donn, F. Garde, A. Lenoir // Building and Environment. – 2011. – Т. 46. – №. 7. – С. 1489-1496.

166. **Dudley, B.** BP statistical review of world energy / B. Dudley. – London, 2012. – 48 pp.

167. **Energy efficiency** indicators. Highlights (2019 edition) [электронный ресурс] – France: International Energy Agency, 2019 – 154 pp. – Режим доступа: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyEfficiencyIndicatorsHighlights\\_2019.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyEfficiencyIndicatorsHighlights_2019.pdf) {дата обращения: 10.10.2021}

168. **Energy performance** of buildings directive 2020 / European Commission [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en). {дата обращения: 22.06.2021}.

169. **Energy performance** of buildings directive – EPBD report / European Commission [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive-report\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive-report_en). {дата обращения: 20.04.2022}.

170. **Gatta, D.** Assessment of building energy modelling studies to meet the requirements of the new Energy Performance of Buildings Directive / D. Gatta, Ch. Yousifa, M. Cellurab, L. Camilleric, F. Guarinob // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – № 127. – 8 p. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109886.

171. **Gauthier S.** et al. The colours of comfort: from thermal sensation to person-centric thermal zones for adaptive building strategies // *Energy and Buildings*. – 2020. – V. 216. – pp. 132-154.

172. **Gustavsen, A.** Developing low-conductance window frames: Capabilities and limitations of current window heat transfer design tools – State-of-the-art review / A. Gustavsen, D. Arasteh et al. // *Journal of building physics*. – 2008. – V. 32. – №. 2. – pp. 131-153.

173. **Gustavsen, A.** Key elements of and material performance targets for highly insulating window frames / A. Gustavsen, S. Grynning, D. Arasteh, B.P. Jelle // *Energy and Buildings*. – 2011. – T. 43. – №. 10. – C. 2583-2594.

174. **Ito, N.** A field experiment study on the convective heat transfer coefficient on the exterior surface of a building / N. Ito, K. Kimura // *ASHRAE Transactions*. – 1972. – Vol. 78, issue 2. – 184 p.

175. **Karlsson, J.** Windows – optical performance and energy efficiency / J. Karlsson. – Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis, 2001. – 49 p.

176. **Lauder, B.E.** The numerical computation of turbulent flow / B.E. Launder, D.B. Spalding // *Comp. Math. In Appl. Mech. & Eng.* – 1974. – v. 3. – p.269.

177. **McAlister, D.D.** The impact of carding micro-climate on cotton moisture content and fiber and yarn quality / D.D. McAlister, D.T.W. Chun, G.R. Gamble, L.C. Godbey, D.R. Cobb, E.E. Backe // *Journal of cotton science*. – 2005. – Vol. 9. – Issue 2. – pp. 97–101.

178. **Merrill, J.L.** Overview of moisture-related damage in one group of Wisconsin manufactured houses / J.L. Merrill, A. TenWolde // *ASHRAE Transactions*. – 1989. – Vol. 95. – Issue 1. – pp. 56-64.

179. **Mohammadi, B.** Analysis of the k-epsilon turbulence model / B. Mohammadi, O. Pironneau. – Paris: John Wiley & Sons, 1994. – 212 p.

180. **Muneer, T.** Frequency of condensation occurrence on double-glazing in the United Kingdom / T. Muneer, N. Abodahab // *Energy conversion and management*, Elsevier. – 1998. – Vol. 39. – Issue 8. – pp. 717–726.



181. **Pagliari, M.** Flexible Solar cells / M. Pagliaro, R. Ciriminna, G. Palmisano, // ChemSusChem. – 2008. – № 1. – issue 11. – pp. 880–891.
182. **Rudolph, S.E.** Technologies for smart windows / S.E. Rudolph, J. Dieckmann, J. Brodrick // ASHRAE Journal. – 2009. – Т. 51. – №. 7. – pp. 104-106.
183. **Russia:** A land of cold [международный электронный ресурс РИА Новости (Sputnik International)]. – Режим доступа: <http://sptnkne.ws/bUBS> {дата обращения: 10.10.2021 }
184. **Simisiroglou N.** et al. The actuator disc concept in PHOENICS // Energy Procedia. – 2016. – Т. 94. – С. 269-277.
185. **Solomenko, Z.** Heat transfer with radiation in participating media and the discrete ordinates method [Электронный ресурс] / Z. Solomenko. – Опубликовано на официальном сайте COMSOL 08.05.2019. – Режим доступа: <https://www.comsol.com/blogs/heat-transfer-in-participating-media-and-the-discrete-ordinates-method/> {дата обращения: 08.10.2021 }.
186. **Stathopoulou, O.I.** Numerical study of the indoor environmental conditions of a large athletic hall using the CFD code PHOENICS / O.I. Stathopoulou, V.D. Assimakopoulos // Environmental Modeling & Assessment. – 2008. – Т. 13. – № 3. – С. 449-458.
187. **Wright, J.L.** Natural convection in sealed glazing units: a review / J.L. Wright, H.F. Sullivan // ASHRAE Transactions. – 1989 – Vol. 95. – pp. 592-603.

**Публикации автора по теме диссертации****Научные статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК**

188. **Смирнов, Н.Н.** Снижение нагрузок на системы энергоснабжения зданий при использовании энергосберегающих ограждающих конструкций с теплоотражающими экранами / **Н.Н. Смирнов** // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – №2. – С. 59-63.

189. **Захаров, В.М.** Снижение энергозатрат путём применения теплоотражающих экранов в окнах / В.М. Захаров, **Н.Н. Смирнов**, Д.А. Лапатеев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – №1. – С. 54-60.

190. **Бомон, С.** Разработка и испытание автоматизированных окон с теплоотражающими экранами, отвечающих Российским и Европейским требованиям в области энергосбережения / С. Бомон, Э. Хольтсвейлер, **Н.Н. Смирнов**, В.М. Захаров, А.А. Яблоков, Д.А. Лапатеев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – №5. – С. 13-24.

191. **Захаров, В.М.** Двойной энергетический эффект в системах теплоснабжения зданий от использования автоматизированных энергосберегающих окон для различных регионов России / В.М. Захаров, **Н.Н. Смирнов**, А.А. Яблоков, Ю.С. Колосова, Д.А. Лапатеев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – №3. – С. 15-21.

192. **Захаров, В.М.** Энергосберегающий потенциал от использования теплоотражающих экранов с солнечными батареями в окнах для систем энергоснабжения зданий / В.М. Захаров, В.В. Тютиков, **Н.Н. Смирнов**, Д.А. Лапатеев, Б. Фламан, М. Барба // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – №2. – С. 5-14.

193. **Захаров, В.М.** Эффективность совместного применения теплоотражающих экранов в окнах и технологии предварительной осушки воздуха для систем прерывистого отопления зданий в различных регионах России и Франции / В.М. Захаров, В.К. Пыжов, **Н.Н. Смирнов**, Д.А. Лапатеев, Б. Фламан // Вестник

Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – №5. – С.16-25.

194. **Захаров, В.М.** Разработка, программная реализация и проверка адекватности математической модели процесса теплопередачи через окно с теплоотражающими экранами / В.М. Захаров, Е.Г. Авдюнин, **Н.Н. Смирнов**, А.А. Яблочков, Д.А. Лапатеев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. –2016. – №3. – С.13-26.

195. **Смирнов, Н.Н.** Использование окон с регулируемым сопротивлением теплопередаче для повышения энергетической эффективности систем динамического микроклимата помещений / **Н.Н. Смирнов**, В.К. Пыжов, В.М. Захаров, Е.Г. Авдюнин, Д.А. Лапатеев // Вестник ИГЭУ. – 2016. – №6. – С.26-42.

#### **Научные статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS**

196. **Zakharov, V.M.** Energy efficiency by use of automated energy-saving windows with heat-reflective screens and solar battery for power supply systems of European and Russian buildings / V.M. Zakharov, V.V. Tyutikov, **N.N. Smirnov**, B. Flament // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Bristol: IOP Publishing. – 2015. – №93. – pp.1-6.

197. **Tyutikov, V.V.** Analysis of energy efficiency from the use of heat-reflective window screens in different regions of Russia and France / V.V. Tyutikov, **N.N. Smirnov**, D.A. Lapateev // Procedia Engineering. – 2016. – №150. – pp. 1657-1662.

198. **Smirnov, N.** Mathematical and physical modeling of heat transfer through window with heat-reflecting screens to determine the potential of reducing thermal costs for microclimate parameters maintaining / **N. Smirnov**, V. Tyutikov, V. Zakharov // MATEC Web of Conferences. HMTTSC-2017 — Les Ulis, France: EDP Sciences.— 2017.— № 110 (01096). – pp.1-6, DOI: 10.1051/mateconf/201711001096

199. **Parfenov, G.I.** Improving the energy efficiency of dynamic air condition systems in buildings with controlled resistance to window heat transfer / G.I. Parfenov,

**N.N. Smirnov, V.K. Pyzhov, V.V. Tyutikov** // Journal of Physics: Conference Series — 2018.— № 1111.— iss. 1. – pp.1-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1111/1/012043

200. **Тютиков, В.В.** Энергоэффективность применения прерывистого режима отопления и окон с теплоотражающими экранами в зданиях текстильных предприятий для условий России и Франции / В.В. Тютиков, В.М. Захаров, **Н.Н. Смирнов**, Д.А. Лапатеев, Б. Фламан // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016. – №5 (365). – С.188-195.

### **Тезисы и полные тексты докладов конференций**

201. **Смирнов, Н.Н.** Тройной энергетический эффект от применения автоматизированных энергосберегающих окон с теплоотражающими экранами / **Н.Н. Смирнов**, Д.А. Лапатеев, В.М. Захаров // Двадцать первая международн. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тезисы докладов. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2015. – Т.3. – С. 188..

202. **Lapateev, D.A.** Efficient use of energy-saving windows in conditions of Russia and France / D.A. Lapateev, **N.N. Smirnov**, B. Flament, M. Barbat // X Международная молодёжная научная конференция «Гинчуринские чтения»: Материалы конференции. – Казань: РИО Казань. – 2015. – Т.2. – С. 68-69.

203. **Смирнов, Н.Н.** Оценка эффективности применения разработанных энергосберегающих мероприятий при создании динамического микроклимата в помещениях различного функционального назначения / **Н.Н. Смирнов**, Г.И. Парфенов, В.М. Захаров, В.К. Пыжов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения): Материалы международной научно-технической конференции. – Иваново: ИГЭУ. – 2021. – С.386-389.

### **Результаты интеллектуальной деятельности**

204. Пат. **84042** Российская Федерация, МПК Е 06 В 7/08. Оконный блок / В.М. Захаров, **Н.Н. Смирнов**; заявитель и патентообладатель ИГЭУ. – №2008150026/22; заявл. 17.12.2008; опубл. 27.06.2009, бюл. №18.

205. **Пат. 95725** Российская Федерация, МПК Е 06 В 7/08. Оконный блок / В.М. Захаров, **Н.Н. Смирнов**; заявитель и патентообладатель ИГЭУ. – № 2010106473/22; заявл. 24.02.2010; опубл. 10.07.2010, бюл. № 19.

206. **Пат. 135696** Российская Федерация, МПК Е 06 В 7/08. Автоматизированный оконный блок / В.М. Захаров, **Н.Н. Смирнов**, А.А. Яблоков, Д.А. Лапатеев; заявитель и патентообладатель ИГЭУ. – № 2013130095/12; заявл. 01.07.2013; опубл. 20.12.2013, бюл. №35.

207. **Пат. 146566** Российская Федерация, МПК Е 06 В 9/17. Автоматический наружный ставень / В.М. Захаров, **Н.Н. Смирнов**, Д.А. Лапатеев, Д.С. Трухин, Е.С. Румянцев; заявитель и патентообладатель ИГЭУ. – № 2014127023/12; заявл. 02.07.2014; опубл. 10.10.2014, бюл. №28.

208. **Пат. 153159** Российская Федерация, МПК Е 06 В 9/17. Оконный блок с внутренним ставнем / В.М. Захаров, **Н.Н. Смирнов**, Д.А. Лапатеев, Д.С. Трухин; заявитель и патентообладатель ИГЭУ. – № 2014142401/12; заявл. 21.10.2014; опубл. 10.07.2015, бюл. №19.

209. **Пат. №154163** Российская Федерация, МПК Е 06 В 9/17. Многофункциональный энергоэффективный ставень / В.М. Захаров, **Н.Н. Смирнов**, Д.А. Лапатеев, Д.С. Трухин, А.А. Яблоков, Ю.С. Колосова; заявитель и патентообладатель ИГЭУ.– №2014137231/12, заявл. 15.09.2014; опубл. 20.08.2015, бюл. №23.

210. **Пат. № 2574997** Российская Федерация, МПК Е 06 В 7/08. Система управления теплоотражающими экранами оконного блока / В.М. Захаров, **Н.Н. Смирнов**, А.А. Яблоков, Д.А. Лапатеев; заявитель и патентообладатель ИГЭУ. – №2014109183/12; заявл. 11.03.2014; опубл. 10.02.2016, бюл. №4.

211. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615250 Российская Федерация. Программа для расчёта процесса теплопередачи для двухкамерного стеклопакета с металлическими теплоотражающими экранами / А.А. Яблоков, В.В. Тютиков, **Н.Н. Смирнов**, В.М. Захаров, Д.А. Лапатеев; заявитель и патентообладатель ИГЭУ. – №2016612420; заявл. 21.03.2016; зарег. 19.05.2016.

**Раздел в учебнике**

212. **Пыжов, В.К.** Баланс помещений по вредностям / В.К. Пыжов, **Н.Н. Смирнов** // Системы кондиционирования, вентиляции и отопления: учебник / В.К. Пыжов, **Н.Н. Смирнов**. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – Разд. 3. – С. 73-144. ISBN 978-5-9729-0345-0.

## **Приложения**

## Приложение А

Результаты экспериментального исследования оконного блока "Стильпласт краус"  
(двухкамерный стеклопакет СПД 4М1-10-4М1-10-4М1 в переплете из ПВХ) в климатической камере АНО "Ивановостройиспытания"

Журнал испытаний от 15.04.08. Время: 15:33:16

Тип окна Стильпласт краус (контроль - СП 4М1-10-4М1-10-4М1)  
Температура в теплом отделении камеры  $t_w$  20,60 °С  
Температура в холодном отделении камеры  $t_n$  -14,90 °С

Номер зоны	Площадь i-ой зоны, м <sup>2</sup>	Номер термопары	Температура зоны, °С		Номер тепломера	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>	Терм. сопр. зоны $R_{z}$ , м <sup>2</sup> К/Вт	Привед. термич. сопротивл., м <sup>2</sup> К/Вт		Привед. сопр. теплопередаче $R_{0}$ , м <sup>2</sup> К/Вт
			$T_w$	$T_n$				светопр.	непрозр.	
1	0,1074	1		-8,91	1	70,74	0,305	0,3014	0,5573	0,515
		1	12,70							
2	0,0780	2		-10,50	2	74,69	0,319			
		2	13,32							
3	0,3440	3		-9,42	3	74,73	0,295			
		3	12,63							
4	0,0780	4		-10,63	4	75,46	0,303			
		4	12,22							
5	0,1074	5		-9,38	5	76,52	0,282			
		5	12,19							
6	0,1000	6		-9,90	6	45,60	0,545			
		6	14,95							
7	0,1000	7		-9,83	7	45,80	0,546			
		7	15,20							
8	0,1000	8		-11,61	8	46,10	0,578			
		8	15,04							
9	0,1000	9		-11,74	9	46,90	0,560			
		9	14,53							
10	0,1000	10		-11,23	10	46,20	0,558			
		10	14,55							
11	0,0976	11		-8,49	11	70,27	0,308			
		11	13,13							
12	0,0636	12		-8,16	12	71,31	0,308			
		12	13,82							
13	0,2186	13		-8,18	13	68,13	0,314			
		13	13,23							
14	0,0636	14		-7,75	14	72,52	0,285			
		14	12,93							
15	0,0976	15		-9,58	15	72,92	0,302			
		15	12,41							

Пересчет приведенного термического сопротивления оконного блока типоразмерного ряда при  $V=0,7$  0,350 (м<sup>2</sup> К)/Вт

Пересчет сопротивления теплопередачи оконного блока на величину % остекления;  
равного:

0,6	0,537	(м <sup>2</sup> К)/Вт
0,75	0,508	
0,8	0,500	
0,7	0,518	

Рисунок А.1 – Журнал испытаний оконного блока "Стильпласт краус"  
(двухкамерный стеклопакет СПО 4М1-10-4М1-10-4М1 в переплете из ПВХ)



№ ТП

Температура в ХО

Температура в ТО

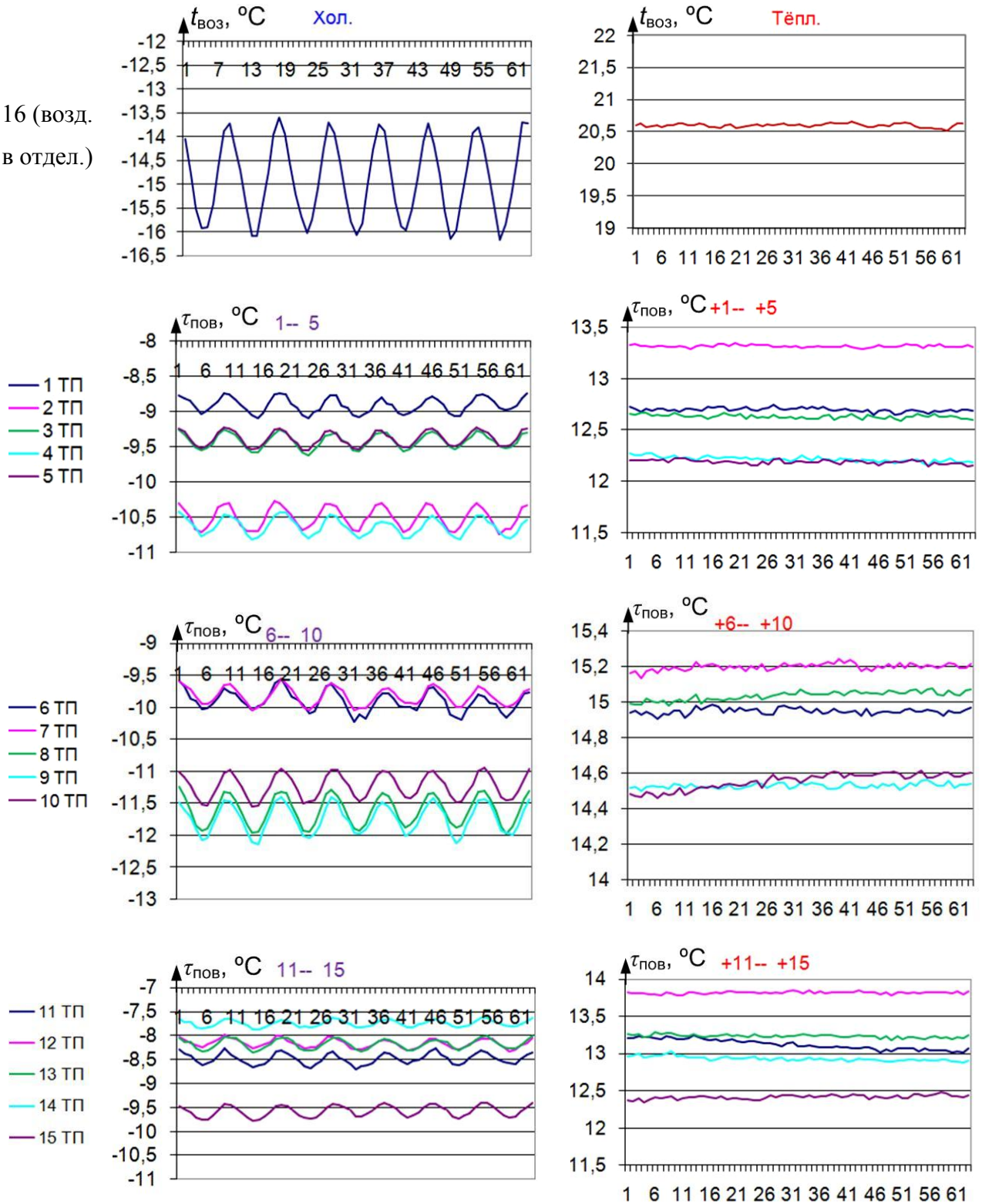
16 (возд.  
в ОТДЕЛ.)

Рисунок А.2 – Графики изменения температуры воздуха  $t_{\text{воз}}$  и температуры поверхности  $\tau_{\text{пов}}$  стекол (в точках установки термодпар (ТП)), обращенных в холодное (ХО) и теплое (ТО) отделения климатической камеры, в течение 63 замеров (временной шаг – 30 секунд) при проведении испытаний оконного блока "Стильпласт краус"

(двухкамерный стеклопакет СПО 4М1-10-4М1-10-4М1 в переплете из ПВХ)

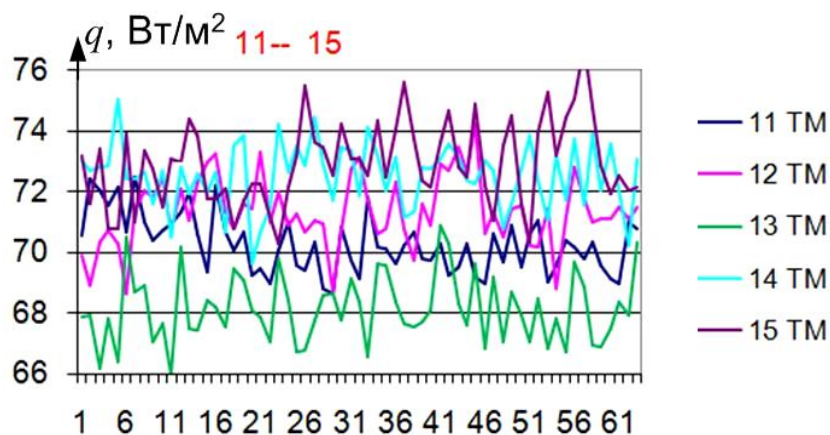


Рисунок А.3 – Графики изменения удельных тепловых потоков  $q$ , проходящих через стеклопакет, измеренные в точках установки термомеров (ТМ), в течение 63 замеров (временной шаг – 30 секунд) при проведении испытаний оконного блока "Стильпласт краус" (двухкамерный стеклопакет СПО 4М1-10-4М1-10-4М1 в переплете из ПВХ)

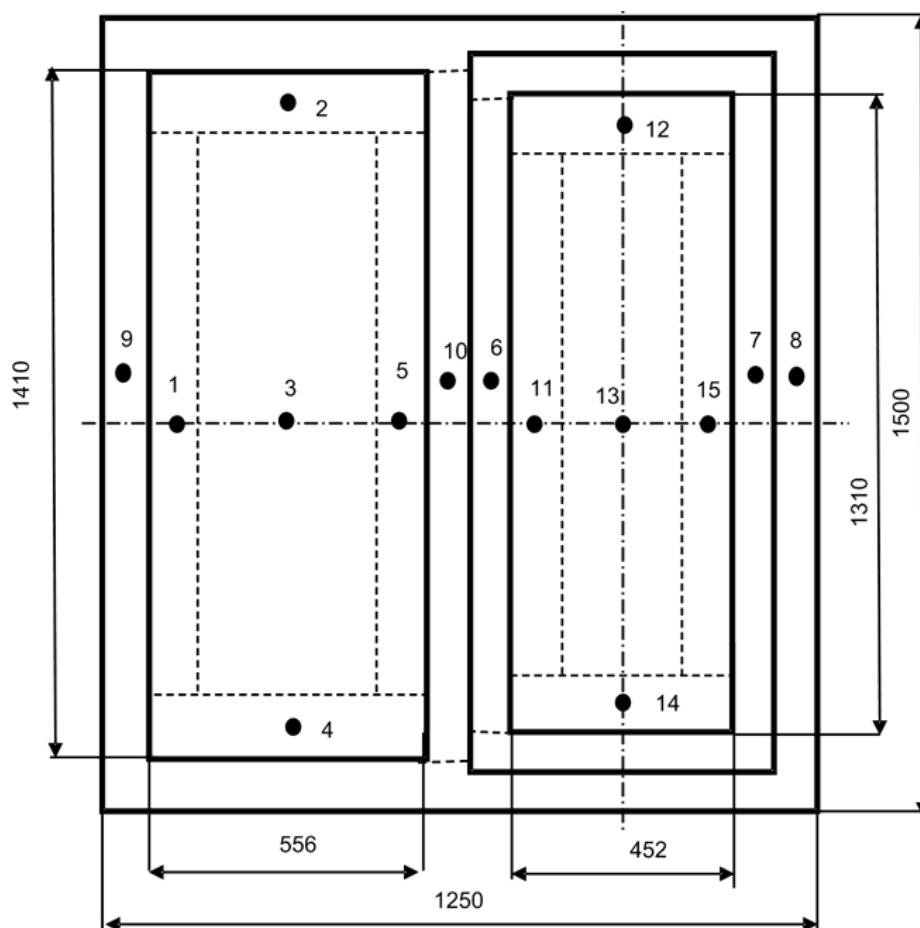


Рисунок А.4 – Схема размещения термопар и термомеров на образце оконного блока (цифрами указаны номера точек замера температур и тепловых потоков)

## Приложение Б

### ЛИСТИНГ

программы для расчёта процесса теплопередачи для двухкамерного стеклопакета с металлическими теплоотражающими экранами [211]

#### Б.1 Описание математической модели процесса теплопередачи для стеклопакета и металлических экранов

```
function
F=Universal_Window(x,T_in,T_out,Epsilon_air,Epsilon_glass,Epsilon_hs,d_glass,h_ai
r_space,h_air_space_hs,lambda_glass,n_glass,n_ht>window,v_in,v_out,variant)

%Расчет приведенной степени черноты
E_correct1=1/(1/Epsilon_air+1/Epsilon_glass-1); %Приведенное значение степе
ни черноты среды и поверхности воздух-стекло
E_correct2=1/(1/Epsilon_glass+1/Epsilon_glass-1); %Приведенное значение сте
пени черноты поверхностей стекло-стекло
E_correct_hs1=1/(1/Epsilon_glass+1/Epsilon_hs-1); %Приведенное значение сте
пени черноты поверхностей стекло-экран
E_correct_hs2=1/(1/Epsilon_air+1/Epsilon_hs-1); %Приведенное значение степе
ни черноты среды-поверхности воздух-экран
E_correct_hs3=1/(1/Epsilon_hs+1/Epsilon_hs-1); %Приведенное значение степе
ни черноты поверхностей экран-экран

%Формирование решаемой системы уравнений
n_zone=2*n_glass+n_ht+1; %Количество зон окна
i=1;
while (i<=n_zone)
    if (i==1)
```

```

if (window(i)==1)
    if (variant==0)
        alpha_conv_in=1.66*nthroot(T_in-x(2),3); %Конвективная составляющая
коэффициента теплоотдачи от внутреннего воздуха к экрану, естественная кон-
векция
    end
    if (variant==1)
        alpha_conv_in=5.6+3.9*v_in; %Конвективная составляющая коэффици-
ента теплоотдачи от внутреннего воздуха к экрану, вынужденная конвекция
    end
    alpha_rad_in=5.67*(E_correct_hs2)*(((T_in+273.15)/100)^4-
((x(2)+273.15)/100)^4)/(T_in-x(2)); %Лучистая составляющая коэффициента теп-
лоотдачи от внутреннего воздуха к экрану
    alpha_in=alpha_rad_in+alpha_conv_in; %Коэффициент теплоотдачи от
внутреннего воздуха к экрану
end
if (window(i)==2)
    if (variant==0)
        alpha_conv_in=1.66*nthroot(T_in-x(2),3); %Конвективная составляющая
коэффициента теплоотдачи от внутреннего воздуха к экрану, естественная кон-
векция
    end
    if (variant==1)
        alpha_conv_in=5.6+3.9*v_in; %Конвективная составляющая коэффици-
ента теплоотдачи от внутреннего воздуха к экрану, вынужденная конвекция
    end
    alpha_rad_in=5.67*(E_correct1)*(((T_in+273.15)/100)^4-
((x(2)+273.15)/100)^4)/(T_in-x(2)); %Лучистая составляющая коэффициента теп-
лоотдачи от внутреннего воздуха к стеклу

```

```

alpha_in=alpha_rad_in+alpha_conv_in; %Коэффициент теплоотдачи от
внутреннего воздуха к стеклу
end
F(1)=(x(1)/(alpha_in))+x(2)-T_in;
end
if (i==n_zone)
if (window(i)==7)
alpha_conv_out=7.34*v_out^0.656+3.78*exp(-1.91*v_out); %Конвективная
составляющая коэффициента теплоотдачи от экрана к наружному воздуху
alpha_rad_out=5.67*(E_correct_hs2)*(((x(i)+273.15)/100)^4-
((T_out+273.15)/100)^4)/(x(i)-T_out)); %Лучистая составляющая коэффициента те-
плоотдачи от экрана к наружному воздуху
alpha_out=alpha_rad_out+alpha_conv_out; %Коэффициент теплоотдачи от
экрана к наружному воздуху
end
if (window(i)==8)
alpha_conv_out=7.34*v_out^0.656+3.78*exp(-1.91*v_out); %Конвективная
составляющая коэффициента теплоотдачи от стекла к наружному воздуху
alpha_rad_out=5.67*(E_correct1)*(((x(i)+273.15)/100)^4-
((T_out+273.15)/100)^4)/(x(i)-T_out)); %Лучистая составляющая коэффициента те-
плоотдачи от стекла к наружному воздуху
alpha_out=alpha_rad_out+alpha_conv_out; %Коэффициент теплоотдачи от
стекла к наружному воздуху
end
F(i)=(x(1)/(alpha_out))+T_out-x(i);
end
if (window(i)==3)
F(i)=x(1)*d_glass/lambda_glass+x(i+1)-x(i);
end
if (window(i)==4)

```

```

alpha_conv_air_space=0.447*((x(i)-x(i+1))/h_air_space)^0.25; %Конвективная
составляющая коэффициента теплоотдачи воздушной прослойки между стёклами
alpha_rad_air_space=5.67*E_correct2*(((x(i)+273.15)/100)^4-
((x(i+1)+273.15)/100)^4)/(x(i)-x(i+1))); %Лучистая составляющая коэффициента
теплоотдачи воздушной прослойки между стёклами
alpha_air_space=alpha_rad_air_space+alpha_conv_air_space; % Коэффициент
теплоотдачи воздушной прослойки между стёклами
F(i)=(x(1)/(alpha_air_space))+x(i+1)-x(i);
end
if (window(i)==5)
alpha_conv_air_space_hs=0.447*((x(i)-x(i+1))/h_air_space_hs)^0.25; %Кон-
вективная составляющая коэффициента теплоотдачи воздушной прослойки меж-
ду стеклом и экраном
alpha_rad_air_space_hs=5.67*E_correct_hs1*(((x(i)+273.15)/100)^4-
((x(i+1)+273.15)/100)^4)/(x(i)-x(i+1))); %Лучистая составляющая коэффициента
теплоотдачи воздушной прослойки между стеклом и экраном
alpha_air_space_hs=alpha_rad_air_space_hs+alpha_conv_air_space_hs; % Ко-
эффициент теплоотдачи воздушной прослойки между стеклом и экраном
F(i)=(x(1)/(alpha_air_space_hs))+x(i+1)-x(i);
end
if (window(i)==6)
alpha_conv_hs=0.447*((x(i)-x(i+1))/h_air_space_hs)^0.25; %Конвективная со-
ставляющая коэффициента теплоотдачи воздушной прослойки между экранами
alpha_rad_hs=5.67*E_correct_hs3*(((x(i)+273.15)/100)^4-
((x(i+1)+273.15)/100)^4)/(x(i)-x(i+1))); %Лучистая составляющая коэффициента
теплоотдачи воздушной прослойки между экранами
alpha_hs=alpha_rad_hs+alpha_conv_hs; %Коэффициент теплоотдачи воз-
душной прослойки между экранами
F(i)=(x(1)/(alpha_hs))+x(i+1)-x(i);
end

```

```

    i=i+1;
end
end

```

## **Б.2 Задание начальных данных и расчёт созданной математической модели процесса теплопередачи для стеклопакета и металлических экранов**

### **% Исходные данные**

```

T_in=20; %Температура внутри помещения, град. С
T_out=-15; %Температура снаружи помещения, град. С
Epsilon_air=1; %Степень черноты окружающих предметов
Epsilon_glass=0.96; %Степень черноты стекла
Epsilon_hs=0.05; %Степень черноты экрана
d_glass=0.004; %Толщина стекла, м
h_air_space=0.01; %Толщина воздушной прослойки, м
h_air_space_hs=0.01; %Толщина воздушной прослойки между окном и экра-
НОМ, м
lambda_glass=0.76; %Теплопроводность стекла, Вт/(град.С*м)
variant=1; %Если значение равно 0, то учитывается естественная конвекция на
внутренней поверхности окна, если 1 - вынужденная конвекция на внутренней
поверхности
v_out=5; %Скорость воздуха снаружи, м/с
v_in=0; %Скорость воздуха у внутренней поверхности окна, м/с

% Конструкция окна
n_glass=3; %Количество стекол в окне
n_ht=3; %Количество теплоотражающих экранов
window=[2;3;4;3;4;3;5;6;6;7]; %Задание элементов конструкции окна: 1 – внут-
ренний воздух - экран; 2 – внутренний воздух - стекло; 3 – Стекло; 4 – прослойка

```

между стёклами; 5 – прослойка между стеклом и экраном; 6 – прослойка между экранами; 7 – экран - наружный воздух; 8 – стекло-наружный воздух

### **%Расчет окна**

$x0 = [50;18;17;8;7;-2;-3;-12;-13;-14]$ ; % Начальное приближение (задаём удельный тепловой поток и температуры всех описанных поверхностей (от внутренней к наружной))

$f=@(x)Universal\_Window(x,T\_in,T\_out,Epsilon\_air,Epsilon\_glass,Epsilon\_hs,d\_glass,h\_air\_space,h\_air\_space\_hs,lambda\_glass,n\_glass,n\_ht>window,v\_in,v\_out,variant)$

$[x,fval] = fsolve(f,x0)$  %Вызов оптимизатора и нахождение искомым значений удельного теплового потока и температур поверхностей

$Heat\_flux=x(1)$  %Рассчитанный удельный тепловой поток

$Heat\_transfer\_resistance=(T\_in-T\_out)/x(1)$  %Рассчитанное сопротивление стеклопакета с экранами





УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ИГЭУ  
д.т.н., профессор



Тютиков В.В.  
2022 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор  
НКО Фонд «Энергоэффективность»



Видякин Д.С.  
2022 г.

АКТ

передачи результатов диссертационной работы

Комиссия в составе: от НКО Фонд «Энергоэффективность» в лице начальника отдела ГИС Грачева Е.В. с одной стороны и от Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) в лице доцента кафедры ПТЭ, к.т.н. Захарова В.М. и соискателя Смирнова Н.Н. с другой стороны составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы соискателя Смирнова Н.Н. переданы НКО Фонд «Энергоэффективность» в виде отчета в котором содержатся:

- рекомендации по совершенствованию конструкций оконных блоков путем применения в них теплоотражающих экранов, позволяющих снизить тепловые потери. В отчете также содержится информация о результатах экспериментальных исследований в климатической камере новых энергосберегающих конструкций, а также математического моделирования в программно-вычислительных комплексах Matlab и Phoenics процесса теплопередачи через данные энергосберегающие оконные блоки;


- инженерный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции в текущий момент времени и за холодный период года с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации на основе аппроксимации результатов математического моделирования;

- методика определения минимальной температуры воздуха в нерабочее время для помещений с регулируемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций, отличающаяся учетом термовлажностных режимов эксплуатации здания и эффекта от предварительной осушки воздуха.

Использование предложенных энергосберегающих конструкций окон с теплоотражающими экранами, метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции и методики определения минимальной температуры воздуха позволит значительно снизить затраты топливно-энергетических ресурсов при поддержании нормируемых параметров микроклимата в помещениях различного назначения.

От НКО Фонд «Энергоэффективность»

Начальник отдела ГИС



Грачев Е.В.

От ИГЭУ

Доцент кафедры ПТЭ, к.т.н.



Захаров В.М.

Соискатель



Смирнов Н.Н.

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный  
энергетический университет имени В.И. Ленина»



*(Signature)*  
А.В. Гусенков

» *(Date)* 2022 г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы  
Смирнова Николая Николаевича

Результаты кандидатской диссертационной работы Смирнова Николая Николаевича используются в ИГЭУ на кафедре «Промышленная теплоэнергетика» (ПТЭ) при проведении практических и лабораторных занятий для студентов направлений подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (уровень бакалавриата) и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (уровень магистратуры) при изучении дисциплин «Энергетические системы создания технологического и комфортного микроклимата» и «Испытание и наладка систем технологического и комфортного микроклимата», а также при выполнении обучающимися по данным направлениям научно-исследовательской и выпускной квалификационной работы.

Внедрены следующие результаты диссертационной работы Смирнова Н.Н.:

- технические решения по использованию теплоотражающих экранов и солнечных фотоэлектрических панелей в светопрозрачных конструкциях при реализации задач по повышению энергоэффективности во всех видах учебной и научно-исследовательской деятельности;
- метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции в текущий момент времени с учетом временного графика использования экранов и температурного режима эксплуатации на основе аппроксимации результатов математического моделирования;
- методика определения минимальной температуры воздуха в нерабочее время для помещений с регулируемым сопротивлением теплопередаче светопрозрачных конструкций, учитывающая термовлажностные режимы эксплуатации здания и эффект от предварительной осушки воздуха;
- математическая модель динамического микроклимата для помещений, учитывающая нелинейную зависимость сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами от температурного режима эксплуатации, а также генерацию электрической энергии при помощи солнечных батарей;
- демонстрационный стенд «Энергоэффективный оконный блок с применением теплоотражающих экранов и солнечной фотоэлектрической панели»;
- учебник «Системы кондиционирования, вентиляции и отопления».

Декан теплоэнергетического  
факультета, к.т.н., доцент

*(Signature)*

С.Б. Плетников

Заведующий кафедрой ПТЭ,  
к.т.н., доцент

А.В. Банников



**УТВЕРЖДАЮ**Технический директор  
АО "ПСК"

А.В. Созинов

«17» сентября 2022 г.**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

Настоящий акт составлен о том, что в энергобюро АО "ПСК" рассмотрены технические решения по повышению тепловой защиты производственного помещения ремонтно-механического цеха (Строение ПК05) за счет применения теплоотражающих экранов и жалюзи в светопрозрачных ограждающих конструкциях, по снижению температуры внутреннего воздуха в нерабочее время, а также результаты расчета энергетического эффекта от использования данных мероприятий, предложенные в диссертационной работе Смирнова Николая Николаевича. Внедрение разработанных энергосберегающих мероприятий позволит значительно снизить количество тепловой и электрической энергии на поддержание необходимых параметров микроклимата в помещении, что приведет к уменьшению затрат на топливно-энергетические ресурсы.

Данные технические решения признаны полезными и предложены для включения в стратегический план развития АО "ПСК".

Инженер энергобюро

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Ю.Ю. Кольчугина", is written over a horizontal line.

Ю.Ю. Кольчугина