

А.М. ПРОТАСЕВИЧ

**СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА ОГРАЖДАЮЩИХ
КОНСТРУКЦИЙ И МИКРОКЛИМАТ ПОМЕЩЕНИЙ**

Под редакцией д-ра техн. наук, проф.,
акад. НАН Республики Беларусь
Б.М. Хрусталёва

Минск
БНТУ
2016

Протасевич, А.М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций и микроклимат помещений / А.М. Протасевич. – Минск : БНТУ, 2016. – 452 с. – ISBN 978-985-550-935-7.

На основании современных положений теорий технической термодинамики, тепло- и массопереноса, аэродинамики и результатов натурных и лабораторных экспериментальных исследований изложены вопросы теплового режима зданий и сооружений с рассмотрением теплофизических процессов в ограждающих конструкциях с учётом обеспечения микроклимата помещений системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Учтены новейшие научные разработки по теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и по системам отопления и вентиляции.

Монография адресована студентам, магистрантам, аспирантам, научным работникам и инженерно-техническим сотрудникам организаций, занимающихся вопросами тепло- и массопереноса в ограждающих конструкциях и обеспечением микроклимата в помещениях отапливаемых зданий и сооружений.

Табл. 53. Ил. 138.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол №7 от 28.09.2016 г.)

Рецензенты:

кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция» Белорусского национального технического университета (зав. каф. *Б.М. Хрусталёв*);
д-р техн. наук, проф. *П.И. Дячек*;
канд. техн. наук, доцент *И.А. Терехова*

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. Тепловой режим зданий	12
1.1 Физиологическое воздействие тепловлажностного и воздушного режимов помещения на человека	12
1.2 Тепловой комфорт в помещении	15
1.3 Энергетический кризис и влияние его последствий на тепловой режим зданий строительства до 1994 г.	24
1.4 Обеспечение теплового режима в эксплуатируемых зданиях в условиях энергетического кризиса	37
1.5 Энергосберегающие технологии и микроклимат помещений .	42
1.5.1 Взаимосвязь микроклимата и энергоэффективности здания	42
1.5.2 Тепловая защита зданий	50
1.5.3 Модернизация абонентских вводов систем теплоснабжения	54
1.6 Методология энергосбережения при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений	62
1.7 Выводы	65
ГЛАВА 2. Термодинамические основы использования энергии в низкотемпературных процессах и системах зданий и сооружений	68
2.1 Здание или сооружение – как единая энергетическая система. Задачи анализа и синтеза	68
2.2 Термодинамический анализ – основа оценки использования энергии	72
2.3 Эксергия теплового потока и эксергия излучения	76
2.4 Эксергия вещества в потоке	78
2.5 Эксергетическая оценка основных процессов инженерных систем зданий и сооружений	80
2.5.1 Анализ процесса нагрева тел	81
2.5.2 Смешение с целью регулирования температуры теплоносителя	83
2.5.3 Передача теплоты в теплообменных аппаратах	85
2.5.4 Дросселирование	88
2.6 Энергетические балансы зданий и сооружений	90
2.6.1 Тепловой баланс зданий и сооружений	90
2.6.2 Эксергетический баланс зданий и сооружений	92

2.6.3 Полный энергетический баланс зданий и сооружений	93
2.7 Термодинамический анализ потоков теплоты в зданиях	95
2.8 Эксергетическая диаграмма Грассмана	100
2.9 Энергоэкономичные и энергоактивные здания	107
2.10 Выводы	110
ГЛАВА 3. Контроль параметров микроклимата помещений, теплотехнических характеристик ограждающих конструкций и инженерных систем зданий	112
3.1 Общие положения	112
3.2 Энергетическое обследование зданий	113
3.3 Измерение параметров микроклимата и воздухообменов помещений	116
3.4 Оценка теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий	119
3.4.1 Общие сведения	119
3.4.2 Поверхностные температурные поля ограждающих конструкций зданий в ИК-лучах спектра излучения	120
3.4.3 Методические особенности термографирования ограждающих конструкций зданий	125
3.5 Определение сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий	128
3.5.1 Исследования в натуральных условиях	128
3.5.2 Аналитический подход к оценке теплового режима ограждающих конструкций	130
3.5.3 Экспериментальная оценка теплового и влажностного режимов ограждающих конструкций	141
3.5.4 Контактные методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций	142
3.5.5 Погрешности измерений сопротивления теплопередаче ..	149
3.5.6 Развитие контактных методов теплотехнических исследований ограждающих конструкций зданий	156
3.6 Выводы	159
ГЛАВА 4. Ограждающие конструкции современных зданий.....	162
4.1 Приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен.....	162
4.2 Расчёт приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций	166
4.3 Теплотехнические особенности подвалов и крыш	179

4.3.1 Подвальные помещения	179
4.3.2 Крыши	186
4.4 Выводы	198
ГЛАВА 5. Светопрозрачные ограждения.....	201
5.1 Общие сведения	201
5.2 Воздухопроницаемость оконных заполнений и естественный приток воздуха.....	209
5.3 Теплотехнические особенности современных оконных заполнений	220
5.4 Особенности тепловлажностного режима современных оконных заполнений	232
5.5 Монтаж оконных блоков в проемах	244
5.6 Окна для пассивного дома	247
5.7 Натурные исследования микроклимата помещений с современными оконными заполнениями или светопрозрачным фасадом.....	248
5.8 Выводы	261
ГЛАВА 6. Особенности влажностного режима ограждающих конструкций зданий	265
6.1 Влагоперенос в строительных материалах и ограждающих конструкциях	265
6.2 Увлажнение и сушка материалов ограждающих конструкций	268
6.3 Оценка влажностного режима ограждающих конструкций	273
6.4 Влажностный режим наружных стен жилых зданий, построенных до 1995 года	277
6.5 Влажностный режим наружных стен зданий с дополнительной теплоизоляцией	290
6.6 Влажностный режим теплоизолированных наружных стен зданий из газосиликатобетона.....	302
6.7 Выводы	308
ГЛАВА 7. Теплоизоляционные материалы ограждающих конструкций зданий	312
7.1 Общие сведения	312
7.2 Пенополистирол. Тепломассообменные характеристики	312
7.3 Минеральная вата. Тепломассообменные характеристики	320
7.4 Пенополиуретан, эковата и другие теплоизоляционные материалы	332

7.5 Засыпки из сыпучих материалов	334
7.6 Выводы	339
ГЛАВА 8. Воздухопроницаемость материалов и ограждающих конструкций	341
8.1 Общие положения	341
8.2 Воздухопроницаемость материалов	343
8.3 Экспериментальные исследования воздухопроницаемости теплоизоляционных материалов	347
8.4 Воздухопроницаемость ограждающих конструкций	356
8.5 Воздухопроницаемость плёнок и мембран	359
8.6 Выводы	363
ГЛАВА 9. Повышение теплозащитных качеств ограждающих конструкций путём их дополнительной теплоизоляции	366
9.1 Общие положения	366
9.2 Лёгкая штукатурная система теплоизоляции	368
9.3 Тяжёлые штукатурные системы теплоизоляции	371
9.4 Вентилируемая система теплоизоляции	373
9.4.1 Экспериментальные исследования наружных стен эксплуатируемых зданий	376
9.4.2 Аэродинамический режим вентилируемых прослоек	380
9.4.3 Фильтрация воздуха в стенах зданий теплоизолированных по системе «вентилируемый фасад»	390
9.4.4 Сопротивление теплопередаче наружных стен с «вентилируемым фасадом»	395
9.4.5 Влажностный режим наружных стен зданий с системами теплоизоляции «вентилируемый фасад»	404
9.5 Выводы	408
ГЛАВА 10. Теплофизические и аэродинамические особенности зданий с «теплыми» чердаками	414
10.1 Общие положения	414
10.2 Моделирование воздушного режима «теплых» чердаков жилых зданий	417
10.2.1 Приближенное моделирование аэродинамического режима систем вентиляции жилых домов	417
10.2.2 Экспериментальная проверка принятой методики приближенного моделирования	421
10.2.3 Модель «теплого» чердака зданий серии 464-У1	423

10.3 Повышение располагаемого давления вытяжных шахт «теплых» чердаков	434
10.3.1 Аэродинамические исследования на модели вытяжной шахты.....	434
10.3.2 Натурные исследования вытяжных шахт эксплуатируемых зданий	438
10.3.3 Естественно-механические системы вентиляции зданий с «теплыми» чердаками.....	441
10.4 Повышение устойчивости аэродинамического режима систем вентиляции зданий с «теплыми» чердаками	444
10.5 Выводы	450

ВВЕДЕНИЕ

Для создания в зданиях нормального воздушного и теплового режимов, т.е. комфортных условий для пребывания человека, необходимо обеспечить их отопление, замену и поддержание заданных параметров воздуха, а также определённую температуру поверхностей ограждающих конструкций. Комплексное решение указанной задачи является сложной проблемой из-за большого количества факторов, влияющих на микроклимат помещений. Кроме того, указанные вопросы необходимо увязать с требованиями энергосбережения при эксплуатации инженерного оборудования и ограждающих конструкций.

Использование энергии уже более 30 лет находится в центре внимания мирового сообщества. Вызвано это, в первую очередь, наступившим в 70-е годы прошлого столетия и продолжающимся в настоящее время энергетическим кризисом, а также экологическим влиянием использования энергии на природную среду. Решение энергетической проблемы во всех странах мира приравнивается к обеспечению безопасности и решается на основании долгосрочных программ по развитию энергетики и энергосбережению. Так, в Европе с 2008 г. проводится работа по разработке пакета стандартов (Directive on the Energy Performance of Building – EPBD) по энергопотреблению и микроклимату зданий. Снижение энергопотребления и увеличения доли энергии от возобновляемых источников является основной целью создания указанных документов. Энергосбережение на данном этапе развития не просто бережное расходование ресурсов, а политика, определяющая развитие техники, производства, распределения и использования энергии.

Энергосбережение затрагивает все отрасли хозяйства стран, в том числе, строительство, коммунально-бытовой сектор, промышленность. От рационального использования первичных и вторичных энергоресурсов при проектировании, монтаже и эксплуатации ограждающих конструкций и систем теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха во многом зависит выполнение государственных программ энергосбережения.

Особое внимание обращается на разработку принципов оценки существующего и проектированию нового фонда зданий на базе современных научных достижений в области термодинамики, строи-

тельной теплофизики, микроклимата помещений, аэродинамики потоков и других направлений.

В монографии в краткой форме изложены те положения и законы технической термодинамики, на которых базируется эксергетический метод исследований использования энергии в низкотемпературных процессах и инженерных системах зданий и сооружений. Описана методика составления и анализа полного энергетического баланса зданий, построены эксергетические диаграммы Грассмана.

Эксергетический метод исследований, к сожалению, не вышел за рамки научно-исследовательских работ и не стал широко применяемым практическим методом. Его использование показывает ценность метода и результатов, достигнутых благодаря применению.

Изложены результаты, полученные при проведении многолетних исследований на эксплуатируемых и вновь возводимых зданиях, а также материалы комплекса научных аналитических и экспериментальных исследований. При этом, особенностью проведения экспериментальных работ явилась необходимость выполнения как натуральных, так стендовых и лабораторных исследований. Натурные исследования проведены на вновь возводимых зданиях в завершающей фазе их строительства, и с необходимостью определения характеристик ограждений и систем отопления и вентиляции в реальных температурно-влажностных условиях наружного воздуха. Поэтому исследования по времени планировались по годовым циклам, таким образом, чтобы их проведение совпадало с требуемыми условиями.

Организованный воздухообмен является основным способом обеспечения чистоты воздуха в помещениях общественных зданий и квартирах жилых домов. От качества и надёжности работы системы вентиляции зависит комфортность пребывания и проживания людей, сохранность и долговечность ограждающих конструкций.

В жилищном строительстве, как правило, применяются системы естественной вентиляции. Приточный, наружный воздух поступает в квартиры через неплотности в оконных переплётах, форточки, фрамуги или открываемые окна. Основными достоинствами естественной вентиляции являются простота и невысокая её стоимость, а также практически полное отсутствие обслуживания. Недостаток – неустойчивый воздушный режим квартир, вызываемый значительным влиянием температуры наружного воздуха и ветровым воздей-

ствием, дискомфорт от открывания форточек при низких наружных температурах.

Высокая герметичность современных окон, используемых последние годы в жилищном строительстве, а также в общественных зданиях, значительно ухудшили работоспособность систем естественной вентиляции. Это сказалось на влажностном режиме помещений и, особенно, наружных стен зданий из-за конденсации на их поверхности влаги. Результаты исследований тепловлажностного состояния помещений и наружных конструкций зданий изложены в нескольких главах монографии.

Представлены результаты исследований воздухопроницаемости материалов и элементов ограждающих конструкций зданий. Исследования проведены на специально созданном экспериментальном стенде, позволившем получить данные по современным теплоизоляционным материалам, плёнкам и мембранам.

Ряд глав монографии посвящены повышению теплозащитных качеств ограждающих конструкций путём их дополнительной теплоизоляции и исследованию теплофизических и аэродинамических особенностей «тёплых» чердаков зданий.

Аэродинамические и теплофизические исследования «тёплых» чердаков проведены на основании разработанной методики приближенного моделирования на моделях зданий серии 464–VI. В аэродинамической трубе проведены испытания моделей вытяжных шахт «тёплых» чердаков, результаты которых проверены при натурных исследованиях эксплуатируемых зданий.

Материалы исследований получены на новом этапе развития науки и техники, когда решение проблем строительной теплофизики, микроклимата помещений, энергосбережения находится не только в современных технологиях, но и в грамотном использовании известных методов на базе новых подходов к их осуществлению. Достигнутый уровень в электронике, компьютерной технике и телекоммуникациях создал условия для появления «энергоэффективных», «пассивных» и «умных» зданий, в которых осуществляется управление процессами потребления энергии и обеспечение микроклимата.

Известно, что существует прямая коррекция между плотностью населения городов и затратами на энергосбережение, которая стимулирует строительство зданий повышенной этажности, высотных

зданий. При этом особое внимание уделяется разработке концепции «энергоэффективного дома» с обеспечением повышенной комфортности в помещениях зданий и экономией энергетических ресурсов. А это требует новых неординарных решений теплозащиты зданий и систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, которые определяют формирование их теплового режима.

Рассмотрены возможности перехода на низкотемпературные системы отопления зданий, в том числе с использованием возобновляемых источников энергии и применением теплонасосных установок и аккумуляторов теплоты.

Представленные в монографии материалы, получены при выполнении собственных исследований, а также на основании анализа и обобщения работ отечественных и зарубежных учёных. Соавторами ряда научных направлений являются научные сотрудники НИИЛСТИСЗ БНТУ. После каждой главы дан список литературы с информацией о совместных работах.

ГЛАВА 1. Тепловой режим зданий

1.1 Физиологическое воздействие тепловлажностного и воздушного режимов помещения на человека

Особенности климата на территории страны и производственная деятельность вынуждают человека 70–80% времени проводить в закрытых помещениях. Для создания нормальных условий его пребывания необходимо поддерживать в этих помещениях определенные тепловой, воздушный и влажностный режимы, т.е. создать и обеспечить определенный микроклимат. Поддержание микроклимата – важная, но непростая задача в связи с многообразием конструктивно-планировочных решений зданий, наличием атмосферных воздействий, повышенными требованиями к уровню обеспечения режимов и стремлением к экономному расходованию энергии.

Тепловлажностный и воздушный режимы в помещениях обеспечиваются системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, но во многом определяются теплотехническими качествами ограждающих конструкций. Наружные ограждения защищают помещения от климатических воздействий: резких переохлаждения или перегрева, промерзания, увлажнения, паро- и воздухопроницания.

Здоровье человека и его работоспособность зависят от экологической безопасности воздушной среды помещений. Воздух в помещения поступает из окружающей среды, а в больших городах и промышленных центрах он загрязнен оксидами азота и углерода, диоксидом серы, полиароматическими углеводородами, фенолом, тяжелыми металлами, различными взвешенными веществами и другими выбросами предприятий.

При строительстве зданий и внутренней отделке помещений повсеместно используются органические полимеры и пластмассы, что приводит к опасности поступления в воздух химически вредных веществ. Присутствуя в воздухе в малых концентрациях эти вещества сразу не вызывают заболеваний, но, накапливаясь, влияют на здоровье и работоспособность человека.

Среда помещений содержит загрязняющие включения биологического происхождения и продукты деятельности человека. Особенно велико влияние воздушной среды на развитие бактерий и

грибка в воздухе и на внутренней поверхности ограждающих конструкций. Причиной их возникновения служат микроскопические живые организмы (споры грибов и клетки бактерий). Микроорганизмы и плесневые грибы способны размножаться на увлажненных откосах оконных проемов, на влажных участках ограждений, на мебели и др. Значительно подвержены биологическому загрязнению сырые помещения с плохой вентиляцией, вызывающей повышенную относительную влажность воздуха и конденсацию водяного пара на поверхностях.

Таким образом, влияние воздушной среды на человека связано с наличием газообразных и биологических загрязнений и зависит от эффективности работы вентиляции, обеспечивающей воздухообмен и перемещение воздуха в помещениях с определенной скоростью.

При взаимодействии человека с воздушной средой и окружающими предметами помещений происходит поглощение теплоты или отдача её в окружающую среду. В организме человека в результате биохимических процессов непрерывно продуцируется теплота большая часть которой удаляется.

Процесс теплообмена человека с окружающей средой происходит путем конвективного и лучистого теплообмена, испарения и через дыхание. Взаимосвязь теплопродукции человека и теплообмена его с окружающей средой можно представить в виде баланса теплоты

$$W = \pm Q_k \pm Q_l \pm Q_i \pm Q_d \pm \Delta Q, \quad (1.1)$$

где W – тепловая мощность вырабатываемая организмом человека, Вт;

Q_k – мощность суммарного теплового потока за счет конвективного теплообмена, Вт;

Q_l – мощность суммарного теплового потока за счет лучистого теплообмена, Вт;

Q_i – мощность теплового потока, расходуемого на испарение влаги с поверхности кожи, Вт;

Q_d – мощность теплового потока, расходуемого на нагревание или охлаждение вдыхаемого воздуха, Вт;

ΔQ – локальное изменение мощности тепловыделения человека в процессе жизнедеятельности, Вт.

Масса людей различна, поэтому для теплотехнических расчетов принимается так называемый стандартный человек, рост которого 175 см, поверхность тела $1,8 \text{ м}^2$. Если человек находится в покое (глубокий сон), в его теле вырабатывается энергия, равная 80 Вт. При повышении активности человека количество энергии возрастает. В спокойном состоянии взрослый человек выделяет 120 Вт энергии, при легкой работе – до 250 Вт, при тяжелой – до 500 Вт. Если выработанная телом энергия используется и отводится полностью, то человек не ощущает влияние окружающей среды и чувствует себя хорошо. Такое его состояние оценивается как комфортное, а условия в помещениях – комфортными.

При комфортных условиях конвективный теплообмен составляет 14-30 % от общей величины теплообмена и зависит от разности температуры тела человека и внутреннего воздуха, а также от подвижности воздуха в помещении.

Теплообмен излучением колеблется в пределах 45-65% от общей величины теплообмена. Зависит от разности температур внутренних поверхностей помещения и поверхности тела человека.

Отвод теплоты путем испарения влаги с поверхности тела человека, обусловленный разностью парциального давления водяных паров на поверхности кожи и в воздухе, при оптимальных условиях составляет 20-30% от общей величины его теплопотерь.

Для теплового комфорта необходимо, чтобы тепловой режим в помещении обеспечивал указанные выше соотношения отдельных видов теплообмена между человеком и окружающей средой. Нарушение этих соотношений или их перераспределение приводят к изменению физиологических процессов в организме человека и вызывают дискомфорт.

На рис. 1.1 представлена диаграмма, показывающая изменения мощности потоков теплоты по видам теплообмена человека, не выполняющего физической работы, в зависимости от температуры воздуха.

При повышении температуры воздуха в помещении возрастает теплоотдача человека за счет испарения влаги. Чем ниже температура окружающей среды, тем выше теплоотдача тела за счет конвективного и лучистого теплообмена.

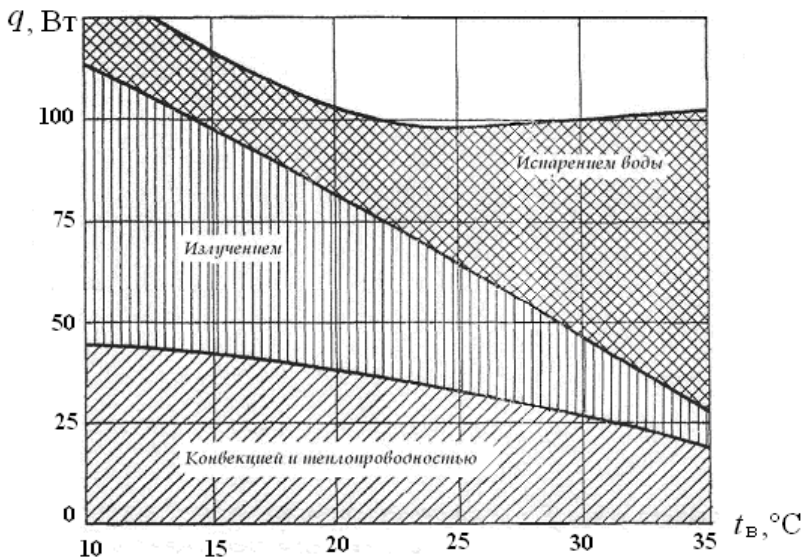


Рис. 1.1. Теплопотери человека, не выполняющего физической работы, в зависимости от температуры окружающего воздуха [1.1]

Перечисленные ниже факторы определяют санитарно-гигиенические условия взаимодействия человека с воздушной средой и ограждениями, а внутреннюю среду помещения, определяемую параметрами воздуха и температурой поверхностей ограждающих конструкций и оборудования, оценивают как микроклимат помещения.

1.2 Тепловой комфорт в помещении

Здоровый человек имеет постоянную температуру тела. Вырабатываемая его телом теплота отводится в окружающее пространство. Состояние, при котором в окружающее пространство отводится столько теплоты, сколько ее вырабатывается человеком, называется состоянием теплового равновесия тела человека. Постоянная температура тела человека и тепловое равновесие являются основным критерием его теплового комфорта.

Теплоощущения человека непосредственно связаны с параметрами микроклимата помещения. Среди теплотехнических параметров следует выделить четыре наиболее важных, которые поддаются прямому измерению и регулированию:

температура воздуха t_a , °С;

относительная влажность воздуха, φ , %;

скорость движения воздуха v , м/с;

радиационная температура поверхностей ограждающих конструкций t_R , °С;

Параметры микроклимата помещения изменяются в довольно узких пределах. Колебание температуры внутреннего воздуха от нормируемого значения должно быть не больше 3°С, а подвижность воздуха в помещении – в пределах 0,1 – 0,2 м/с. Почти безболезненно воспринимается относительная влажность внутреннего воздуха от 30 до 70%.

Выше изложенное характеризуется результатами определения зоны комфорта по величине относительной влажности в зависимости от температуры воздуха (рис. 1.2).

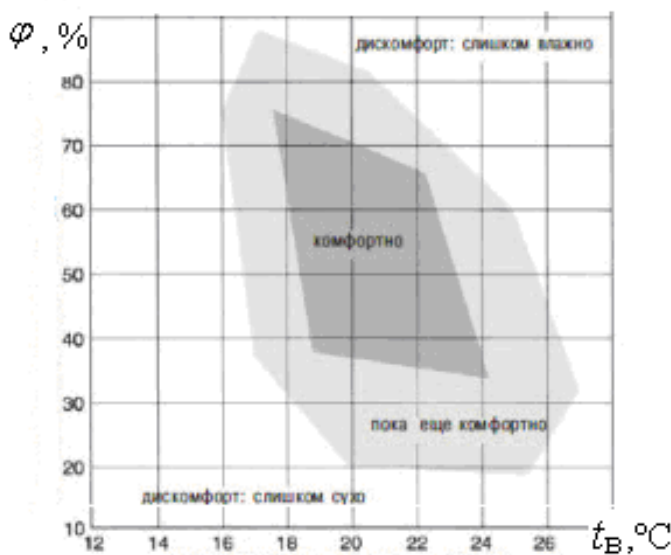


Рис. 1.2. Зона комфорта по уровню относительной влажности воздуха

При относительной влажности от 30 до 70 % воздух помещения способен полностью ассимилировать выделенный человеком водяной пар.

Скорость воздушного потока в закрытых помещениях оказывает существенное влияние на самочувствие человека. Сквозняки, вызываемые слишком холодным воздухом или потоком воздуха с повышенной скоростью, являются следствием неудовлетворительной работы систем вентиляции и кондиционирования. При нормальных температурах в пределах 18...22 °С, с учетом турбулентности потока, скорость воздуха не должна превышать 0,25 м/с.

Радиационная температура помещения, осредненная по площади температура внутренних поверхностей, ориентировочно определяется по формуле:

$$t_R = \sum_{i=1}^n t_{(в.п.)i} F_i / \sum_{i=1}^n F_i, \quad (1.2)$$

где $t_{(в.п.)i}$ – температура поверхностей ограждающих конструкций и оборудования, °С;

F_i – площадь поверхностей ограждающих конструкций и оборудования, м².

Точный расчет радиационной температуры выполняется по выражению:

$$t_R = \sum t_{(в.п.)i} \cdot \varphi_{r \rightarrow i}, \quad (1.3)$$

где $\varphi_{r \rightarrow i}$ – коэффициент излучения поверхности тела человека в сторону поверхностей ограждающих конструкций и оборудования.

Коэффициенты излучения могут быть определены по графикам, построенным И.И.Шаркаускасом на основании результатов исследований процесса теплообмена излучением на световых моделях и представленных в [1.2].

Радиационная температура помещений зависит от сопротивления теплопередаче и теплофизических свойств материалов конструкций ограждений.

Комплексным параметром, определяющим температурные условия, служит результирующая температура помещения, определяемая как

$$t_p = \frac{t_R + t_B}{2}.$$

Результирующую температуру помещения принимают равной температуре шарового термометра при диаметре сферы 150 мм, измеренной при скорости движения воздуха до 0,2 м/с.

Температура помещения определится исходя из равенства фактических конвективных и лучистых потоков теплоты при различных значениях t_B и t_R тому потоку, который имел бы место при равенстве $t_B = t_R = t_p$.

Связь указанных параметров может быть установлена, исходя из соотношения коэффициентов конвективного и лучистого теплообмена на поверхности тела человека. В большинстве практических случаев связь между t_B , t_p и t_R описывается следующим уравнением:

$$t_p = A \cdot t_B + B \cdot t_R, \quad (1.4)$$

где коэффициенты А и В принимаются в зависимости от подвижности воздуха, v , м/с (табл. 1.1)

Таблица 1.1
Значения коэффициентов А и В в формуле (1.4)

v , м/с	0	0,15	0,3	0,5	1	2	4
А	0,5	0,55	0,6	0,67	0,74	0,8	0,85
В	0,5	0,45	0,4	0,33	0,26	0,2	0,15

Параметры микроклимата устанавливаются в нормативных документах в зависимости от назначения помещения и периода года [1.3] и [1.4].

Параметры микроклимата для жилых зданий приведены в таблице 1.2.

Под оптимальными параметрами микроклимата следует понимать сочетание значений показателей микроклимата, которые при

длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нормальное тепловое состояние организма при минимальном напряжении механизмов терморегуляции и ощущение комфорта не менее чем у 80% людей, находящихся в помещении.

Допустимые параметры микроклимата определяют сочетание значений показателей микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут вызывать общее и локальное ощущение дискомфорта, ухудшение самочувствия и понижение работоспособности при усиленном напряжении механизмов терморегуляции и не вызывают повреждений или ухудшения состояния здоровья.

Указанные характеристики микроклимата даны вне связи друг с другом. Учитывая это ряд авторов: В.Н.Богословский [1.5], И.А.Казанцев [1.6] и другие, предложили комплексные критерии оценки микроклимата помещений.

Таблица 1.2

Температура, относительная влажность и скорость движения воздуха в обслуживаемой зоне помещений жилых зданий и общежитий

Период года	Наименование помещений	Температура воздуха, °С		Результирующая температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с		
		20-22	18-24 (20-24)			0,15	0,2	
Холодный	Жилая комната	20-22	18-24 (20-24)	19-20 17-23 (19-23)	45-30 60	0,15	0,2	
	То же, в районах с температурой наиболее холодной пятидневки (обеспеченностью 0,92) минус 31°С и ниже	21-23	20-24 (22-24)	20-22 19-23 (21-23)	45-30 60	0,15	0,2	
	Кухня	19-21	18-26	18-20 17-25	НН*	НН	0,15	0,2
	Туалет	19-21	18-26	18-20 17-25	НН	НН	0,15	0,2
	Ванная, совмещенный санузел	24-26	18-26	23-27 17-26	НН	НН	0,15	0,2
	Помещения для отдыха и учебных занятий	20-22	18-24	19-21 17-23	45-30 60	0,15	0,2	
	Межквартирный коридор	18-20	16-22	17-19 15-21	45-30 60	0,15	0,2	
	Вестибюль, лестничная клетка	16-18	14-20	15-17 13-19	НН	НН	0,2	0,3
	Жилая комната	22-25	20-28	22-24 18-27	60-30 65	0,2	0,3	

* НН – не нормируется.

В.Н.Богословский разработал методику оценки микроклимата помещений по двум условиям комфортности. По первому условию комфортности поддерживается такой температурный режим в помещении ($t_e, t_R, \text{°C}$), при котором человек, находясь в середине помещения, не испытывает перегрева или переохлаждения.

Зависимость между t_R и t_e в холодный период можно выразить формулой

$$t_R = 1,57 \cdot t_p - 0,57 \cdot t_b \pm 1,5, \quad (1.5)$$

где t_p – результирующая температура помещения, равная (при спокойном состоянии человека $t_p = 23 \text{ °C}$, при легкой работе – $t_p = 21 \text{ °C}$, при умеренной работе – $t_p = 18,5 \text{ °C}$, при тяжелой работе $t_p = 16 \text{ °C}$).

Зависимость между t_R и t_b в теплый период можно записать как

$$t_R = 1,5 \cdot t_p - 0,5 \cdot t_b \pm 1,5, \quad (1.6)$$

где t_p – то же, что и уравнение (1.5) (при спокойном состоянии человека $t_p = 26 \text{ °C}$, при умеренной работе – $t_p = 24 \text{ °C}$, при тяжелой работе $t_p = 22 \text{ °C}$).

Расчетные значения t_b определяются назначением помещений: в жилых помещениях $t_b = 18 \text{ °C}$; на лестничной клетке $t_b = 16 \text{ °C}$; на кухне $t_b = 18 \text{ °C}$; в помещениях детских и больничных учреждений $t_b = 18...25 \text{ °C}$; в служебных помещениях $t_b = 16...18 \text{ °C}$.

Второе условие комфортности определяет температурный режим для человека, находящегося вблизи нагретых или охлажденных поверхностей в рабочей зоне (главным образом в условиях производственных цехов). За расчетное значение t_b принимают температуру воздуха на высоте 1,5 м от пола и на расстоянии 1 м от наружной стены.

Второе условие комфортности исключает перегрев или переохлаждение отдельных частей тела, связанный с несимметричным лучистым тепловым воздействием на человека. При этом условии комфортности интенсивность лучистого теплообмена между наиболее чувствительной частью поверхности человека и нагретой или

охлажденной поверхностью ограждающей конструкции является такой, при которой человек не испытывает перегрева или переохлаждения.

Из уравнения лучистого теплообмена при контакте человека с окружающими поверхностями допустимая температура нагретой поверхности в помещении $t_{\text{п}}^{\text{доп}}$, °С, для холодного периода года определится как

$$t_{\text{п}}^{\text{доп}} \leq 19,2 + 8,7/\varphi_{\text{г}}, \quad (1.7)$$

где $\varphi_{\text{г}}$ – коэффициент излучения с поверхности тела человека в сторону нагретых поверхностей [1.2].

В теплый период года температура нагретых поверхностей должна быть не более

$$t_{\text{п}}^{\text{доп}} \leq 29,3 + 2,7/\varphi_{\text{г}}. \quad (1.8)$$

Допустимая температура холодной поверхности в холодный период года, определяемая выражением

$$t_{\text{п}}^{\text{доп}} \geq 23 - 5/\varphi_{\text{г}}, \quad (1.9)$$

обеспечивает условие недопустимости конденсации влаги на внутренней поверхности наружных ограждений.

Допустимая температура на внутренней поверхности окна:

$$t_{\text{ок}}^{\text{доп}} \geq 14 - 4,4/\varphi_{\text{г}}. \quad (1.10)$$

Различными специалистами разработан ряд методов расчета параметров микроклимата. При кондиционировании воздуха методика расчета изложена Е.В.Стефановым [1.6], инженерные методы расчета в виде уравнений и диаграмм разработаны П.О.Фангером и подробно изложены в монографии [1.8].

В инженерной практике широко используется метод, который связывает два параметра $t_{\text{в}}$ и $t_{\text{р}}$. При этом на все другие параметры

накладываются ограничения, хотя по мнению физиологов теплоощущения нельзя характеризовать лишь двумя параметрами.

В качестве примера на рис. 1.3 приведен график для определения приемлемых параметров микроклимата (первое условие комфортности) в помещении при различной физической нагрузке. Пользуясь диаграммой, определяется необходимая температура воздуха в помещении в зависимости от его радиационной температуры, времени года и тяжести работы, выполняемой человеком.

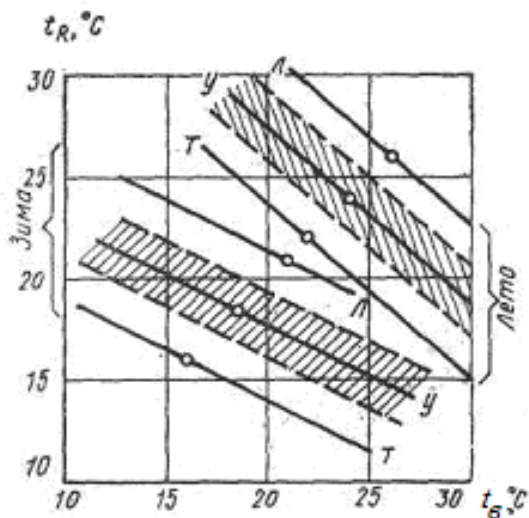


Рис. 1.3. График определения условий комфортности температурной обстановки (первое условие) в помещении
 Т – тяжелая; У – умеренная; Л – легкая работа (область допустимых отклонений температур показана штриховкой только для умеренной работы)

Оценить приемлемые параметры микроклимата можно, используя расчетные формулы (1.5) и (1.6).

Учитывая сложную зависимость влияния всех факторов на комфорт человека можно компенсировать отклонение одного параметра за счет изменения значения другого. Например, сумма температур помещения жилых и общественных зданий в зимнее время года должна быть 38°C. Температура воздуха 20°C и радиационная температура внутренних поверхностей 18°C. Но сумму температур по-

мещения можно обеспечить комбинацией температуры воздуха и средней температуры внутренних поверхностей (рисунок 1.3). Если, например, радиационная температура поверхностей помещения $t_R = 6 \text{ }^\circ\text{C}$, то необходимая температура внутреннего воздуха 22°C , а при $t_R = 14 \text{ }^\circ\text{C} - t_B = 24 \text{ }^\circ\text{C}$.

Обеспечение теплового комфорта позволяет избежать большинства биологических загрязнений в помещениях.

1.3 Энергетический кризис и влияние его последствий на тепловой режим зданий строительства до 1994 г.

Невозобновляемые источники энергии являются сегодня основной энергетикой мира. Эти источники составляют 90% всей потребляемой энергии. При этом темпы их расходования таковы, что запасов некоторых разведанных видов природного топлива хватит лишь на несколько десятков лет. Исчерпываются, в основном, дешевые источники энергии, а это приводит к удорожанию ее стоимости. Этот фактор, а также неравномерность распределения природных ресурсов в мире, привели к тому, что получило название энергетического кризиса.

Для бытовых и промышленных целей, в том числе и для нужд теплоснабжения зданий, в настоящее время используются в основном нефтепродукты, газ и уголь, как более дешевые и удобные в эксплуатации топлива.

Невозобновляемые источники энергии пока обеспечивают мир энергией и составят основу энергетики ещё, во всяком случае, на столетие. Но существенного роста потребления энергии на их базе достичь не удастся как в силу ограниченности, так и отсутствия во многих странах мира. Дефицит энергии и повышение стоимости требует изучения возможности ее экономии, в том числе и при обеспечении теплового режима зданий.

Отличительной особенностью больших городов и населенных пунктов Республики Беларусь является использование для снабжения теплотой зданий систем централизованного теплоснабжения. Поддержание необходимого теплового режима в помещениях зданий связано с режимом регулирования подачи теплоносителя требуемых параметров. Для районов массовой застройки, где преобла-

дает отопительная нагрузка, как правило, применяется центральное качественное регулирование подачи теплоты.

Например, в г. Минске с населением в 1,8 млн. человек теплоснабжение осуществляется от ТЭЦ и районных котельных. Все производители теплоты объединены в единую кольцевую систему. Централизация теплоснабжения города выше 95%. Суммарная часовая теплопроизводительность по сетевой воде 8,8 Гкал/ч (10,2 МВт) и по пару – 680 т/ч.

До 80 – 90 годов прошлого столетия централизованное теплоснабжение города осуществлялось по традиционному графику центрального качественного регулирования 150/70°C. Использование централизованного теплоснабжения изначально предполагало возможность подачи теплоносителя потребителям с определенными отклонениями от температурного графика. Поэтому каждый потребитель должен был иметь свою систему индивидуального регулирования для рационального использования потенциала теплоносителя.

Основным типом абонентских присоединений, в том числе и в Минске, систем отопления к тепловым сетям была зависимая схема с элеваторным узлом, оснащенная регулятором расхода прямого действия (РР). Для комбинированных систем отопления и горячего водоснабжения с двухступенчатым подсоединением теплообменников использовалась зависимая схема с РР и терморегулирующим вентилем (РТВ). Кроме указанных регуляторов использовались также регуляторы давления (РД), предназначенные для поддержания давления до регулировочного клапана («до себя»).

Схема индивидуального теплового пункта (ИТП) с элеваторным смещением теплоносителей и двухступенчатым по смешанной схеме подогревом воды для горячего водоснабжения показана на рис. 1.4.

В основе регулирования параметров теплоносителя, поступающего из тепловых сетей на ИТП, лежат температурные графики, выражающие зависимость температуры сетевой воды от температуры наружного воздуха (рис. 1.5). Указанный метод является комбинированным качественным методом центрального регулирования подачи теплоносителя для всех видов нагрузки. Увеличение нагрузки горячего водоснабжения в общем балансе теплотребления зданий и характер ее неравномерности в различные дни недели учитывают с помощью повышенных температурных графиков (1', 2', 1'', 2'').

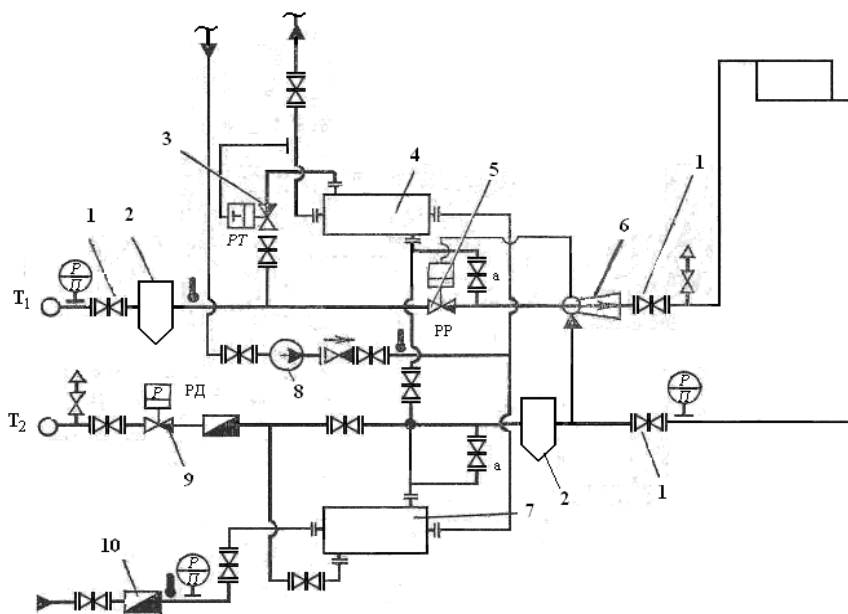


Рис. 1.4. Схема индивидуального теплового пункта с двухступенчатым подогревателем горячего водоснабжения и зависимым подсоединением системы отопления:

- 1 – задвижки; 2 – грязевик; 3 – регулятор температуры; 4 – теплообменник II ступени; 5 – регулятор расхода; 6 – элеватор; 7 – теплообменник I ступени; 8 – циркуляционный насос; 9 – регулятор подпора; 10 – водомер

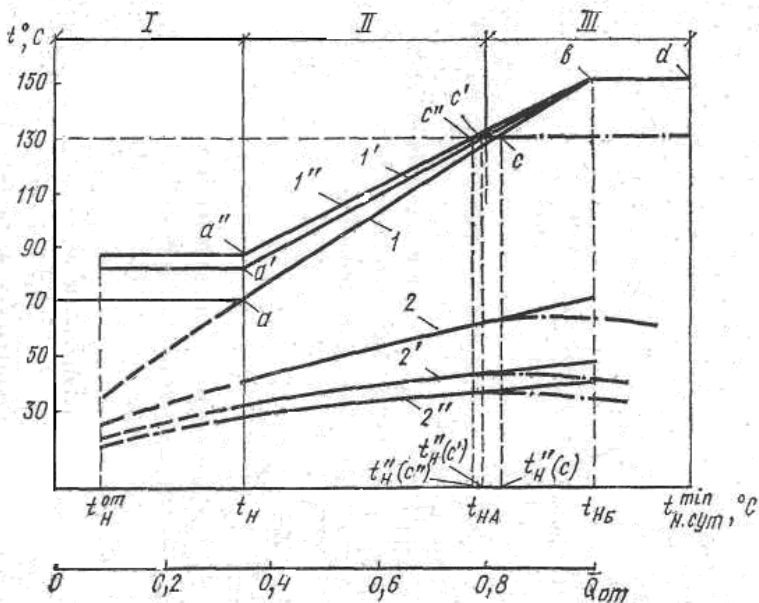


Рис. 1.5. Изменение температуры воды в подающем (1, 1', 1'') и обратном (2, 2', 2'') трубопроводах тепловой сети закрытой системы теплоснабжения [1.10]

1, 2 – при нормальном температурном графике;

1', 2' – при повышенном температурном графике для рабочих дней недели;

1'', 2'' – то же, для нерабочих и предпраздничных дней недели

Приведенные на рисунке повышенные графики рассчитаны с учетом коэффициента « β », который определяет величину относительного среднечасового расхода теплоты на горячее водоснабжение по отношению к расчетному расходу теплоты на отопление. Коэффициент « β » может быть принят по [1.9].

При реализации температурного графика учитывается среднесуточное значение температуры наружного воздуха. По условиям теплоснабжения отопительный период делится на три диапазона температур наружного воздуха. Первый диапазон ограничивается температурой $t_H^{от}$, соответствующей началу и окончанию отопительного периода (принимается равной $+8^\circ\text{C}$) и температурой $t_{H, \beta}$, соответствующей так называемой точке излома температурного графика

(точка а), при которой температура сетевой воды равна минимально необходимой для обеспечения горячего водоснабжения. В этом диапазоне температура теплоносителя поддерживается на постоянном уровне не ниже 70°C и превышает требуемую для отопления температуру (пунктирная линия кривой 1).

Поэтому для поддержания необходимых тепловых условий в помещениях требуется дополнительное регулирование отопительной нагрузки у потребителей путем уменьшения расхода сетевой воды, т.е. количественное регулирование изменением расхода теплоносителя.

Граница второго диапазона температур, в пределах которого осуществляется качественное регулирование отопительной нагрузки, определяется практически обеспечиваемым нагревом сетевой воды до температуры не более $130 - 135^{\circ}\text{C}$, вместо расчетной 150°C . Такой температуре сетевой воды на графиках соответствуют температуры наружного воздуха t''_H , которые близки t_{HA} , средней температуре наиболее холодного периода года.

Поэтому второй диапазон температур наружного воздуха ограничивают более высокие температуры, чем t_{HA} (средняя температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92), которая является расчетной температурой для проектирования систем отопления. Характерной особенностью режима теплоснабжения в этом диапазоне является существенное влияние на него достоверности прогноза наружных температурных условий.

Минимальная температура третьего диапазона – температура наиболее холодных суток t_H^{\min} обеспеченностью 0,98. При построении температурных графиков за минимальную принимается температура t_{HB} . Ей соответствуют расчетные (максимальные) температуры в тепловой сети и максимальная тепловая нагрузка $\bar{Q}_{от} = 1$. При более низких температурах наружного воздуха температура воды в теплосети не изменяется (отрезок b – d кривой 1).

В действительности же в третьем диапазоне температур наружного воздуха (вследствие поддержания температуры сетевой воды ниже расчетной) подача теплоты на отопление характеризуется величиной $\bar{Q}_{от}$ меньше единицы. Дефицит тепловой энергии является

причиной значительных отклонений внутренней температуры отапливаемых помещений от оптимальных значений даже при бесперебойной работе системы теплоснабжения.

В пределах третьего температурного диапазона должно осуществляться дополнительное количественное регулирование отопительной нагрузки.

При эксплуатации ИТП требования по дополнительному количественному регулированию подачи теплоты в здания не выполнялись, что приводило к нарушениям теплового режима зданий, особенно в весенний и осенний периоды года.

Одной из причин неудовлетворительной работы ИТП с элеваторным смещением является также введение в эксплуатацию зданий, оборудованных современными двухтрубными системами отопления с терморегуляторами у отопительных приборов и автоматическими балансировочными клапанами на стояках, и однетрубных систем с терморегуляторами у приборов. А так как элеватор работает при постоянном гидравлическом режиме, а терморегуляторы создают переменный, то возникает несовместимость режимов, которая снижает эффективность систем отопления, а часто делает их неработоспособными.

Возникшая в период с 1990 г. необходимость экономии энергии, что равнозначно экономии топлива, связана с отступлениями от графика центрального качественного регулирования в сторону его снижения. При этом не исключались ситуации, когда срезка графика могла происходить до 105 °С, а точка излома его с 70 °С опуститься до 60 – 63 °С.

Создание указанных условий эксплуатации центрального теплоснабжения приводит к недотопу зданий, к перебоям в обеспечении потребителей горячей водой. Тепловые потери через ограждающие конструкции зданий не изменяются, а подача теплоты системой отопления уменьшается. Эксплуатация абонентских вводов становится бесконтрольной, а тепловые сети теряют управляемость. Вследствие этого происходит нарушение теплового режима зданий.

Вторым основным фактором, определяющим расход теплоты на поддержание теплового режима помещений, являются недостаточные теплозащитные качества ограждающих конструкций зданий. Для Республики Беларусь и стран СНГ характерна эксплуатация зданий, построенных в послевоенные годы. В этот период, наравне

со зданиями из кирпича, возводились крупнопанельные и крупноблочные дома по индустриальному способу строительства.

В настоящее время кирпичные, панельные и блочные дома, особенно застройки 50...70 годов физически изнашивались. Особенно это отразилось на плохом состоянии их тепловой защиты и повышенному расходу энергии на поддержание теплового режима.

Для жилищного фонда Республики Беларусь выполнена оценка теплозащитных характеристик и среднего потребления энергии на 1 м^2 общей площади на период с 1950 по 1995 г. В указанные годы были спроектированы и возведены дома массовых серий застройки. Выполнение анализа осуществлено с разделением жилого фонда Республики на восемь типов зданий. Каждый тип представлен зданиями с различными конструктивными решениями, но со схожими теплоэнергетическими характеристиками. Результаты анализа представлены в табл. 1.3.

Они показывают, что существенных различий в технических и энергетических характеристиках (по количеству этажей и виду материала) выбранных типов по отдельным периодам постройки не существует. Различия в характеристиках определяются в основном видом материала. Например, в кирпичных домах наружная стена имеет толщину 51 см; данная конструкция не менялась на протяжении многих лет (до 1994 года). Конструкции бетонных панелей практически также не улучшались, их сопротивление теплопередаче оставалось постоянным и равным $R_T = 1,1 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ до 1994 г.

Нежилой фонд зданий сгруппирован по критерию направления использования по 6 типам. Основные характеристики каждого типа сведены в табл. 1.4.

Таблица 1.3

Характеристики жилого фонда Республики Беларусь

№	Характеристики зданий	Кол-во зданий, тыс.ед	Период строительства	Среднее $R_{т, м^2С/Вт,}$ огр.контр	Вид отопления	Горячее водоснабжение	Вентиляция	Средний расход теплоты на $1 м^2$ об. площади кВт.ч/($м^2 \cdot$ го д)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип 1	2 х-этажные одельно стоящие дома	284,14 18,02	1950... 1995	0,90... 1,3	индивид. газовое или на твердом топливе	индивид. газовое	естественная	299,9
	– кирпичные – из бетон. панелей							
Тип 2	3 х-этажные многоквартир. дома	61,53 2,59 5,46	1950... 1978	0,90... 1,3	50% центральное	50% центральное	естественная	185,2
	– кирпичные							
	– из бет. блоков – из бет. панелей							
Тип 3	5-этажные дома	8,753 0,914	1964... 1985	0,9	центральное	центральное	естественная	170,0
	– кирпичные – из бет. блоков							
Тип 4	5-этажные дома	4,225 0,136	1964... 1978	1,0... 1,3	центральное	центральное	естественная	140,0
	– из бет. панелей – объемноблочные							

Окончание таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип 5	9-этажные кирпичные дома	2,597	1964... 1973	1,03	центральное	цен- тральное	естест- венная	120,0
	9-этажные дома – из бетон. пане- лей	4,670 0,614	1974... 1985	1,20... 1,23	центральное	цен- тральное	естест- венная	103,5
Тип 7	12-этажные дома	1,447	1979... 1985	1,20... 1,23	центральное	цен- тральное	естест- венная	115,2
	– из бетон. панелей – объемноблочные	0,004						
Тип 8	12-этажные дома	0,425	1979... 1985	1,00... 1,50	центральное	цен- тральное	естест- венная	113,5
	– кирпичные – монолитные	0,196						

Таблица 1.4

Характеристики зданий нежилого фонда Республики Беларусь

Тип	Год строительства	Кол-во зданий, тыс. шт.	Общая площадь, тыс. м ²	R_T , м ² °С/Вт	Средний расход теплоты на 1 м ² общей площади кВт·ч/(м ² ·год)
Тип 1					
Офисы	1982		747,586	0,9...1,3	134,2
Тип 2					
Госпитали	до 1985		3863,94	0,9...1,3	157,9
Поликлиники	1985-1994		1046,06		
Тип 3					
Школы	до 1985	3,979	–	0,9...1,3	143,7
	1985-1989	0,695	–		
	до 1985	0,881	–		
Тип 4					
Университеты	после 1985	0,083	–	0,9...1,3	156,4
ПТУ	1951-1985	3464	–		
Тип 5					
Детские сады	после 1985	1229	–	0,9...1,3	327,0
	1984	–	–		
Тип 6					
Магазины				0,9...1,3	238,0

На территории СНГ исторически сложилось, что основной нормируемой характеристикой теплозащитных свойств ограждающих конструкций служит величина сопротивления теплопередаче « R_T », м²·°С/Вт.

В странах Европейского Союза теплозащитные свойства ограждающих конструкций оцениваются коэффициентом теплопередачи « K », Вт/(м²·°С).

До 1971 года в нормативных документах СССР расчет сопротивления теплопередаче проводился по санитарно-гигиеническому критерию, как минимально допустимому для поддержания на внутренней поверхности ограждения температуры, при которой на ней не происходит конденсации водяного пара из воздуха помещений.

Сопротивление теплопередаче ограждений принималось как величина R_T^{TP} и рассчитывалось по формуле

$$R_T^{TP} = \frac{t_b - t_n \cdot n}{\alpha_b \cdot \Delta t_n}, \quad (1.11)$$

где t_b – расчетная температура внутреннего воздуха, °С;
 t_n – расчетная температура наружного воздуха, принимается с учетом тепловой инерции ограждающих конструкций, °С;
 n – коэффициент, учитывающий положение наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху;

α_b – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, Вт/(м²·°С);

Δt_n – расчетный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждения, °С.

В формуле 1.11 расчетная зимняя температура принимается постоянной величиной в зависимости от степени массивности ограждающих конструкций, которая определяется их тепловой инерцией. В действительности эксплуатация зданий происходит со сложными процессами неустановившегося охлаждения конструкций. Поэтому принятием определенных расчетных значений температур наружного воздуха учитывается способность ограждений воспринимать колебания теплового потока вызванного атмосферными изменениями.

Колебания температуры наружного воздуха передаются к воздуху помещений через массив ограждений с разной скоростью, определяемой их теплоустойчивостью, свойством ограждения сохранять относительное постоянство температурного поля при колебаниях внешних тепловых воздействий.

При определении R_T^{TP} ограждающих конструкций за расчетную принимается средняя температура наиболее холодного промежутка времени в течении которого завершается охлаждение этой конструкции, определяемое предельным понижением температуры на внутренней, обращенной в помещение, поверхности.

В нормативных документах для оценки теплоустойчивости ограждений используется характеристика его тепловой инерции

$D = \sum_{i=1}^n R_i S_i$. Величина D не учитывает всей сложности процессов

теплопереноса и затухания колебаний температуры в наружных стенах и перекрытиях и может быть использована лишь для приближенной оценки их теплоинерционности.

При выполнении расчетов зимняя температура наружного воздуха принимается по климатическим справочникам в соответствии с рекомендациями табл. 1.5 по результатам расчета тепловой инерции ограждающих конструкций.

Таблица 1.5
Расчётные зимние температуры наружного воздуха

Тепловая инерция ограждающей конструкции D	Расчетная зимняя температура наружного воздуха $t_{н}$, °С
До 1,5 включ.	Средняя температура наиболее холодных суток обеспеченностью 0,98
Св. 1,5 ... 4,0	То же, обеспеченностью 0,92
Св. 4,0 ... 7,0	Средняя температура наиболее холодных трех суток
Св. 7,0	Средняя температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,98

Требуемое сопротивление теплопередаче, определенное по формуле 1.11, приравнивается к расчетному $R_T^{TP} = R_T$ для рассматриваемого ограждения.

В табл. 1.6 приведены результаты расчета R_T^{TP} наружных стен и совмещенного покрытия жилого дома для условий г. Минска, построенного до 1995 г.

Практически до 1990 года строительство на территории СССР зданий различного назначения осуществлялось с ограждающими конструкциями, имеющими сопротивление теплопередаче от 0,8 до $1,3 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$.

Таблица 1.6

Сопrotивление теплопередаче ограждающих конструкций

Ограждающая конструкция	Расчетная температура внутреннего воздуха, $t_{в}, ^\circ\text{C}$	Тепловая инерция ограждающей конструкции, D	Расчетная температура наружного воздуха, $t_{н}, ^\circ\text{C}$	Расчетный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности, $\Delta t_{в}, ^\circ\text{C}$	Требуемое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_{Т}^{тp}$, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$
1. Наружные стены квартир здания	+18	5,7	-26	6,0	0,84
2. Совмещенное покрытие	+18	4,2	-26	4,0	1,26

Сопоставление рекомендаций СНиП II-A.7-62 в части $R_{Т}$ с аналогичными требованиями, действующими в рассматриваемый период времени в странах Западной Европы показывают существенное их различие. Например, в Едином Скандинавском строительном кодексе величины $R_{Т}$ выше установленных СНиП для различных видов ограждающих конструкций на 30...150%, а в среднем на 90% [1.11].

Только с 1971 года в СНиП II-3-71 «Строительная теплотехника. Нормы проектирования» вводится требование, по которому сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций следует принимать равным экономически целесообразному сопротивлению теплопередаче $R_{Т}^{ок}$, определяемому исходя из условия обеспечения минимальных приведенных затрат, но которое должно быть не менее требуемого сопротивления теплопередаче, т.е.

$$R_{Т}^{ок} > R_{Т}^{тp}.$$

Низкие теплозащитные качества ограждающих конструкций определяли повышенный расход теплоты на отопление зданий. Приведенные в табл. 1.3 и 1.4 данные показывают, что средний расход

теплоты на 1 м^2 площади зданий строительства 1950...1990 гг. находился в пределах $115...300 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$.

Принятые с началом энергетического кризиса административные меры по экономии энергии в централизованном теплоснабжении городов привели, вследствие слабой теплозащиты ограждений, к недотопу зданий. Недостаток теплоты вызвал снижение температуры воздуха и нарушение других параметров микроклимата в помещениях, что послужило причиной нарушения теплового режима зданий в массовом порядке.

1.4 Обеспечение теплового режима в эксплуатируемых зданиях в условиях энергетического кризиса

При организации городского теплоснабжения по графику центрального качественного регулирования (ЦКР) экономия энергии (топлива) традиционно осуществляется путем коррекции графика в сторону снижения температур теплоносителя. Указанная коррекция, выполненная в начале 90-х годов в системе теплоснабжения в г. Минске, привела к массовому недотопу зданий.

Основу жилого фонда города в указанный период составляли здания типовых серий 1-464, 1-335, М.111-90, М90, М464-9, М335 из бетонных панелей, объемноблочные здания и из силикатных блоков, монолитные железобетонные и здания из кирпича серий 1-434 и 1-447. Все они построены по ранее действовавшим нормативным требованиям с минимально допустимым уровнем теплозащиты $R_T = 0,8...1,3 \text{ м}^2\cdot\text{°C}/\text{Вт}$ ограждающих конструкций. Недополучение зданиями теплоты, при отсутствии запаса надежности теплозащиты, привело к нарушениям микроклимата помещений. Снижение температуры воздуха и внутренних поверхностей помещений, повышение относительной влажности воздуха вызывает конденсацию пара, увлажнение ограждений и появление на них колоний грибка. Участки ограждающих конструкций жилых и подсобных помещений увлажненные и пораженные колониями грибка показаны на рис. 1.6...1.9.

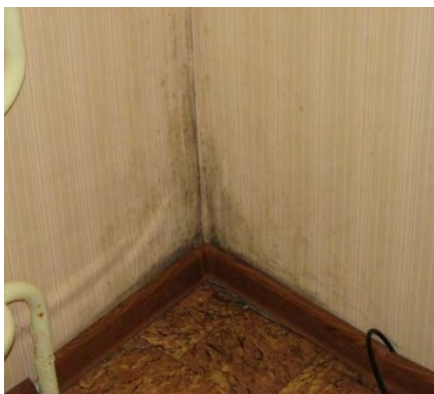


Рис. 1.6. Плесень и деформация обоев на внутренней поверхности наружных стен жилых комнат



Рис. 1.7. Колонии «грибка» на внутренней поверхности наружных стен квартиры



Рис. 1.8. Плесень наружной стены по стыку с перекрытием в жилой комнате



Рис. 1.9. Увлажнение и плесень потолка в ванной комнате и санузле

Образование плесени на стенах и перекрытиях, в углах комнат и на откосах окон в эксплуатируемых зданиях стало проблемой жилого фонда города. Ограждения увлажняются из-за конденсации водяного пара. Со снижением температуры воздуха до $t_b = 15^\circ\text{C}$ и при относительной влажности его $\varphi_b = 65\%$, температура точки росы

$\tau_p = 8^\circ\text{C}$. Допустимая температура поверхности стен по требованиям нормативных документов должна быть не ниже $t_{\text{пов}} = t_{\text{в}} - \Delta t_{\text{н}} = 18 - 6 = 12^\circ\text{C}$.

Температура «точки росы» зависит от температуры и относительной влажности воздуха. Зависимость между указанными параметрами и характеристиками воздуха представлена на рис. 1.10а.

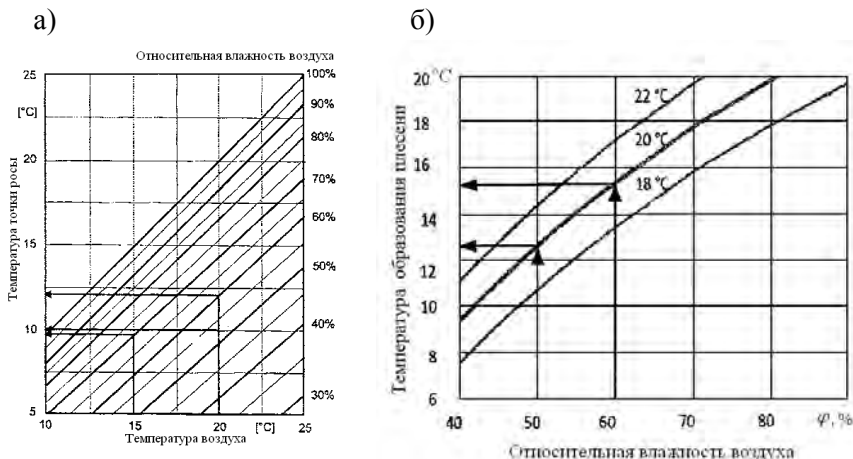


Рис. 1.10. Характеристики влажного воздуха в помещениях:
а – общая зависимость между температурой воздуха в помещении, относительной влажностью воздуха и температурой точки росы;
б – зависимость температуры образования плесени от относительной влажности воздуха и температуры в помещении

Чем выше относительная влажность при постоянной температуре воздуха в помещении, тем выше температура «точки росы».

Если на внутренней поверхности ограждающих конструкций, в слоях воздуха прилегающих к ним (в пограничном слое), относительная влажность равна или выше 80%, то создаются условия образования и роста плесени. Для возникновения плесневого грибка необходимы влага и тепловые условия, соответствующие температуре их образования. Даже если в помещении относительная влажность воздуха в пределах 55...60%, на поверхности конструкций могут создаваться условия, при которых устанавливается температура «возникновения плесени». Рост плесневого грибка начинается

при превышении на поверхности конструкции температуры «точки росы» на несколько градусов. Например, при $t_{в} = 20^{\circ}\text{C}$ и $\varphi_{в} = 60\%$, температура «точки росы» $\tau_{р} = 12,0^{\circ}\text{C}$, а температура возникновения грибка равна $15,3...15,4^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.106).

Для борьбы с плесенью необходимо повысить температуру внутренних поверхностей ограждающих конструкций выше температуры «точки росы» и температуры «образования плесени» и организовать систему вентиляции помещений, обеспечивающую требуемую относительную влажность воздуха.

В качестве причин появления плесени можно также назвать капиллярную влагу, поднимающуюся по цоколю и стенам здания, внешнюю дождевую влагу и др. При рассмотрении каждого конкретного случая увлажнения ограждений необходимо учитывать также год строительства, конструктивные особенности зданий, материал ограждений. Но во всех случаях общим является недостаточная теплоизоляция, низкая температура внутреннего воздуха и повышенная относительная влажность воздуха.

Обеспечение теплового режима помещений и зданий может быть выполнено с помощью повышения теплоизоляции ограждений и эффективности использования потенциала системы теплоснабжения. Но наиболее вероятно комбинированное использование, как дополнительной теплоизоляции, так и повышения эффективности теплоснабжения. При этом должно быть определено, какое из указанных направлений в меньшей или большей степени следует использовать.

Иначе говоря, выход из создавшегося положения состоит в уменьшении затрат теплоты на поддержание требуемого теплового режима зданий.

Реальными путями решения указанной задачи энергосбережения являются два направления.

Первое – в системах центрального теплоснабжения следует осуществить переход на количественное и качественно-количественное регулирование подачи теплоты в здания, с автоматизацией абонентских вводов.

Второе направление – снижение расхода теплоты путем повышения теплозащитных качеств ограждающих конструкций. Для

эксплуатируемых зданий это означает выполнение дополнительной теплоизоляции ограждений.

1.5 Энергосберегающие технологии и микроклимат помещений

1.5.1 Взаимосвязь микроклимата и энергоэффективности здания

Последние десятилетия в центре внимания строительной отрасли находятся две проблемы. Первая связана с повышением энергетической эффективности эксплуатируемых и вновь возводимых зданий и сооружений, а вторая – с разработкой и внедрением новых принципов и систем жизнеобеспечения, т.е. создания и поддержания микроклимата. Современный дом – это сложная техническая система, в которой должны быть учтены и взаимоувязаны как требования по энергоэффективности инженерных систем, так и по обеспечению внутреннего климата помещений.

Начиная с 1990-х годов, происходит медленное, но неуклонное изменение требований к нормам и стандартам создания среды обитания человека. При этом проблема энергосбережения выдвигается на первый план. Вопросам же качества микроклимата помещений хотя и уделяется внимание, но недостаточно целенаправленно.

Снижение энергопотребления в зданиях обеспечивается выполнением энергосберегающих мероприятий, связанных с эффективным использованием энергии в зданиях и их инженерных системах.

Повышение эффективности использования энергии проще решать при проектировании и строительстве объектов, когда существует возможность обоснования и выбора приемлемых вариантов проектных решений. Эксплуатация зданий связана с потреблением того или иного количества топливно-энергетических ресурсов. Поэтому каждое государство формирует и проводит политику энергосбережения, в которую включается комплекс научно-технических мер, направленных на снижение потребления энергии в эксплуатируемых и вновь строящихся зданиях.

Задача энергосбережения – уменьшение потребления энергии с учетом экологического, экономического и социального аспектов, при обеспечении требований по микроклимату в помещениях зданий.

Экономические аспекты энергосбережения связаны с сокращением потребления теплоты вследствие выполнения дополнительной теплоизоляции ограждающих конструкций и совершенствованием инженерных систем зданий.

Экологические аспекты энергосбережения определяются снижением выбросов в окружающую среду продуктов сгорания топлива.

Мероприятия по энергосбережению также позволяют снизить расходы на эксплуатацию зданий или отдельных квартир, повысить условия обеспечения микроклимата в помещениях.

Разработан ряд конструктивных решений и технологий возведения ограждающих конструкций зданий с повышенным сопротивлением теплопередаче: кирпичные стены с теплоизоляционным слоем, монолитные конструкции из пенополистиролбетона, пеногазобетона, с использованием несъемной теплоизолирующей опалубки, совмещенные или вентилируемые фасадные системы утепления однослойных стеновых конструкций. Разработаны и активно внедряются новые энергоэффективные системы отопления и вентиляции. Многообразие конструктивных решений ограждающих конструкций и инженерных систем здания с одной стороны, ставят задачу выбора наиболее эффективных вариантов. Т.е., при проектировании тепловой защиты здания должен быть обеспечен принцип нормирования энергозатрат, с оценкой его энергоэффективности.

В нормативных документах ЕС [1.12] под показателем энергоэффективности принято «отношение энергопотребления к кондиционируемой (отапливаемой) площади здания». Тенденция сближения требований ЕС и СНГ по оценке энергосберегающих мероприятий в направлении единой европейской методики расчета, диктует принятие следующего определения. Показателем энергоэффективности здания служит общее удельное потребление энергии идущей на отопление, вентиляцию, кондиционирование, горячее водоснабжение, освещение и эксплуатацию инженерной инфраструктуры за определенный промежуток времени. Определение эффективности выполняется как для здания в целом, так и для отдельных его систем. Например, в Финляндии ориентируются на показатели энергоэффективности зданий дифференцированные по принципу ограничения энергозатрат [1.13]. Нормативные величины представлены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Типы зданий и потребление энергии для обычных зданий,
низкоэнергосэкономных домов, пассивных домов

Тип здания	Расход энергии на отопление, кВтч/год					
	Обычное здание (современное)		Низкоэнергосэкономное здание		Пассивный дом	
	на 1 м ²	на 1 м ³	на 1 м ²	на 1 м ³	на 1 м ²	на 1 м ³
Жилой сектор	100	32	50	16	20	7
Офисные помещения	90	29	45	14	15	5
	Общий расход энергии, кВтч/год					
Тип здания	Обычное здание (современное)		Низкоэнергосэкономное здание		Пассивный дом	
	на 1 м ²	на 1 м ³	на 1 м ²	на 1 м ³	на 1 м ²	на 1 м ³
Жилой сектор	200	64	140	45	80	26
Офисные помещения	140	45	85	27	45	15

В последних нормативных документах России в качестве показателя энергоэффективности здания введен параметр $q_{от}^p$, Вт/(м³·°С), определенный как удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания.

$$q_{от}^p = [k_{об} + k_{вент} - k_{быт} + k_{рад} \cdot v \cdot \zeta] \cdot 1 - \xi \cdot \beta_h, \quad (1.12)$$

где $k_{об}$ – удельная теплозащитная характеристика здания, Вт/(м³·°С);

$k_{вент}$ – удельная вентиляционная характеристика здания, Вт/(м³·°С);

$k_{быт}$ – удельная характеристика бытовых тепловыделений здания, Вт/(м³·°С);

$k_{рад}$ – удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации, Вт/(м³·°С);

β_n, ν, ζ – коэффициенты, определенные в приложении Г в СНиП 23-02-2003 [14], которые характеризуют систему отопления и не связаны со свойствами ограждающих конструкций;

ξ – коэффициент, учитывающий снижение теплопотребления жилых зданий при наличии поквартирного учета тепловой энергии на отопление (до получения статистических данных фактического снижения принимается $\xi = 0,1$).

Формулы для определения величин $k_{об}$, $k_{вент}$, $k_{быт}$ и $k_{рад}$ берутся из методики расчета из приложения Г СНиП 23-02-2003 [14].

Требования к показателю энергетической эффективности здания традиционны: расчетное значение должно быть не больше нормируемой величины: $q_{от}^p \leq q_{от}^{np}$, представленной в таблице 1.8.

В Республике Беларусь удельную тепловую характеристику здания $q_{зд}$, Вт/(м²·°С), оценивали по теплотехническим характеристикам ограждающих конструкций используя формулу:

$$q_{зд} = \frac{1}{F_{от}} \cdot \left(\frac{F_{ст}}{R_{т ст}} + \frac{F_{ок}}{R_{т ок}} + \eta_1 \frac{F_{пок}}{R_{т пок}} + \eta_2 \frac{F_{1 пол}}{R_{т1 пол}} + \frac{F_{2 пол}}{R_{т2 пол}} \right), \quad (1.13)$$

где $F_{от}$ – отапливаемая площадь здания (сумма площадей пола этажей здания), м²;

$F_{ст}$, $F_{ок}$, $F_{пок}$, $F_{1 пол}$, $F_{2 пол}$ – площади наружных ограждающих конструкций отапливаемых помещений здания: соответственно стен, заполнений световых проемов, покрытия (чердачного перекрытия), пола первого этажа, пола над проездами, м²;

$R_{т ст}$, $R_{т ок}$, $R_{т пок}$, $R_{т1 пол}$, $R_{т2 пол}$ – сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций отапливаемых помещений здания: соответственно стен, заполнений световых проемов, покрытия (чердачного перекрытия), пола первого этажа, пола над проездами, м²·°С/Вт;

η_1 , η_2 – коэффициент, учитывающий положение наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху, соответственно покрытия (чердачного перекрытия), пола первого этажа.

Нормируемая (базовая) удельная характеристика расхода теплоты на отопление и вентиляцию зданий за отопительный период $q_{от}^{пр}$ зданий, Вт/(м³·°С)

Тип здания	Этажность здания											
	1	2	3	4, 5	6, 7	8, 9	10, 11	12 и выше				
1. Жилые многоквартирные, гостиницы, общежития	0,455	0,414	0,372	0,359	0,336	0,319	0,301	0,290				
2. Общественные, кроме перечисленных в строках 3-6 таблицы	0,487	0,440	0,417	0,371	0,359	0,342	0,324	0,311				
3. Поликлиники и лечебные учреждения, дома-интернаты	0,394	0,382	0,371	0,359	0,348	0,336	0,324	–				
4. Дошкольные учреждения, хосписы	0,521	0,521	0,521	–	–	–	–	–				
5. Сервисного обслуживания, культурно-досуговой деятельности, технопарки, склады	0,266	0,255	0,243	0,232	0,230	–	–	–				
6. Административного назначения (офисы)	0,417	0,394	0,382	0,313	0,278	0,255	0,232	0,232				

Рекомендуемые значения удельных тепловых характеристик жилых зданий приведены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

Рекомендуемые значения удельной тепловой характеристики для жилых зданий

Тип здания и ограждающих конструкций	Удельная тепловая характеристика $q_{зд}$, Вт/(м ² ·°С)
1. Многоэтажные здания (9 этажей и более) с наружными стенами из	
Панелей	0,49
монолитного бетона	0,53
мелкоштучных материалов	0,55
2. Многоэтажные здания 6-8 этажей с наружными стенами из	
Панелей	0,50
монолитного бетона	0,54
мелкоштучных материалов	0,56
3. Здания средней этажности с наружными стенами из	
Панелей	0,51
монолитного бетона	0,55
мелкоштучных материалов	0,57
4. Двухэтажные здания с наружными стенами из	
Панелей	0,95
мелкоштучных материалов	1,03
5. Жилые дома усадебного типа и коттеджи	
	1,15

Методология оценки энергоэффективности зданий непрерывно совершенствуется. На основании анализа результатов практического использования энергосберегающих технологий уточняются понятия и требования, разрабатываются принципы долгосрочных или малозатрат-

ных мероприятий по экономии энергии. Соответственно вносятся и изменения в методики оценки энергоэффективности зданий.

Введена практика маркировки зданий по энергоэффективности. В мировой практике сложились две основные системы маркировки энергоэффективности.

Первая система принята в США, Канаде, Мексике. Американская модель предполагает анализ энергопотребления однотипных зданий и выделение из них примерно 25 % с наименьшим энергопотреблением, которым и присваивается почетная марка Energy Guide (энергетический ориентир).

Количественные характеристики энергоэффективности, выражаемые, как правило, в относительных единицах для каждого вида зданий, регламентируются государственными стандартами. Стандарты вводятся на период 2-3 года и по мере совершенствования энергосберегающих технологий обновляются.

Вторая модель маркировки, принятая в странах ЕС, предполагает разделение всех зданий однотипной группы на семь классов, от А до G.

Разделение производится по равным диапазонам количественных показателей энергоэффективности во всем интервале характеристик однотипных зданий – от самых энергоэкономичных до самых энергорасточительных. Характеристики энергоэффективности также подкрепляются стандартами, обновляемыми по мере необходимости.

В нормативных документах России [1.14] установлена маркировка энергоэффективности зданий по классам (табл. 1.10).

Маркировка зданий стимулирует реализацию мер по повышению их энергоэффективности. Оценка энергоэффективности зданий и повышение уровня обеспечения микроклимата помещений взаимосвязаны. Решая одну из указанных проблем необходимо рассматривать и вторую.

Таблица 1.10

Классы энергоэффективности жилых и общественных зданий

Обозначение класса	Наименование класса	Величина отклонения расчетного (фактического) значения удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания от нормируемого, %	Рекомендуемые мероприятия, разрабатываемые субъектами РФ
При проектировании и эксплуатации новых и реконструируемых зданий			
A++		Ниже -60	
A+	Очень высокий	От -50 до -60 включительно	Экономическое стимулирование
A		От -40 до -50 включительно	
B+	Высокий	От -30 до -40 включительно	Экономическое стимулирование
B		От -15 до -30 включительно	
C+		От -5 до -15 включительно	
C	Нормальный	От +5 до -5 включительно	Мероприятия не разрабатываются
C-		От +15 до +5 включительно	
При эксплуатации существующих зданий			
D	Пониженный	От +15,1 до +50 включительно	Реконструкция при соответствующем экономическом обосновании
E	Низкий	Более +50	Реконструкция при соответствующем эконом. обосновании или снос

1.5.2 Тепловая защита зданий

В тепловой защите зданий за последние десятилетия произошли принципиальные изменения. В странах СНГ значения нормируемых теплотехнических показателей ограждающих конструкций зданий были повышены, благодаря чему уровень их теплозащиты вырос в несколько раз.

С 1991 г. нормативы сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций в Республике Беларусь были увеличены в два раза. В соответствии с введенными нормами их величины для стен составляли от 2,0 до 2,5 м²·°С/Вт, покрытий – 3,0 м²·°С/Вт, перекрытий над подвалами от 1,5 до 2,5 м²·°С/Вт, заполнения световых проемов – 0,6 м²·°С/Вт. Эти нормативные значения распространялись как на новое строительство, так и на реконструкцию и капитальный ремонт зданий. На сегодняшний день нормативные требования к сопротивлению теплопередаче наружных ограждающих конструкций вновь изменены. Для жилых и общественных зданий при новом строительстве, реконструкции и модернизации они принимаются не менее нормативной величины $R_{Т.норм}$.

Нормативные сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций при проектировании ремонтных и реставрационных работ жилых и общественных зданий и зданий производственного назначения оставлены на прежнем уровне [1.15].

В России с 1995 года уровень теплозащиты зданий был увеличен примерно в 3 раза. Новые требования учитывают также вопросы энергосбережения и эффективного использования теплоты.

С 2003 года действующим нормативным документом служит СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». В указанном документе регламентированы требования по энергоэффективности и теплозащитным качествам наружных ограждающих конструкций зданий в зависимости от градусо-суток района строительства. При этом предусмотрено право выбора величин приведенного сопротивления теплопередаче отдельных конструкций при неукоснительном обеспечении регламентируемых удельных величин расхода теплоты на отопление здания.

На региональном уровне предусмотрена возможность применения повышающих требований к приведенному сопротивлению теп-

лопередаче ограждающих конструкций. Например, правительство Москвы в 2010 г. своим постановлением приняло при проектировании новых и реконструируемых многоквартирных домов следующие требования.

Приведенное сопротивление теплопередаче принимается для:

- наружных стен – $3,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;
- перекрытий холодного чердака – $4,6 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;
- совмещенных покрытий – $5,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;
- окон, балконных дверей – $0,8 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Допускается снижение сопротивления теплопередаче несветопрозрачных ограждений до уровня, действующего на 2010 год норматива СНиП 23-02-2003 при достижении удельного теплопотребления на отопление и вентиляцию по нормам правительства Москвы. Этим же постановлением предусмотрено последующее повышение величин приведенного сопротивления теплопередаче ограждений начиная с 2016 г.

На Украине с 1994 г. проводилось реформирование нормативной базы направленной на повышение энергоэффективности зданий. В основу новых документов положены принципы, разработанные и апробированные в России и ЕС. В нормах ДБНВ 2.06-31:2006 «Конструкции зданий и сооружений. Тепловая изоляция зданий» введено поэлементное альтернативное нормирование в зависимости от градусо-суток отопительного периода и климатического зонирования территории страны с теплотехническими требованиями к зданию в целом.

Отличительной особенностью норм является климатическое зонирование территории Украины на четыре зоны с установлением в пределах каждой из зон единой расчетной температуры наружного воздуха и единых средних градусо-суток отопительного периода для расчета удельного расхода тепловой энергии на отопление.

В странах Западной Европы, начиная с 70-х годов, были пересмотрены требования к тепловой защите наружных ограждающих конструкций в сторону их увеличения. Данные о нормативных величинах сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций различных стран приведены в табл. 1.11.

Таблица 1.11

Сводная таблица сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий в странах мира

Страна, нормативный документ, год введения	Сопротивление теплопередаче, $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$, элементов наружных ограждающих конструкций зданий			
	стены	покрытия верхнего этажа	полы нижнего этажа	окна, балконные двери
Финляндия, СЗ, 1998	3,87	2,2 – 4,55	2,2 – 4,55	0,6
Канада, NRS 80, 1978	2,5 – 4,76	2,5 – 7,14	2,5 – 4,76	–
Швеция, SBN, 1980	3,3 – 4,0	5,0 – 5,9	2,0 – 3,3	0,5
Великобритания, В 385, L 1985	1,42 – 1,67	1,67 – 2,86	1,42 – 1,67	–
США, Standart 90, 1985	1,94 – 4,4	5,28 – 6,69	1,94 – 5,28	0,35 – 0,48
Дания, BR-95, 1995	3,3 – 5,0	6,7	5,0	0,56
Норвегия, NS	1,25 – 3,3	1,67 – 5,0	3,3	0,41
Литва, 1994	4,2	6,1	–	0,6
Германия, 1999	3,0	3,66	–	0,6
Франция, 2000	2,9	4,5	–	0,6
Польша, 1998	4,03	6,03	–	0,6

В нормах зарубежных стран ранее было принято нормировать коэффициенты теплопередачи в основном только по глади конструкций, т.е. без учета теплопроводных включений. Этим и объясняются значения величин сопротивления теплопередаче, представленные в табл. 1.11.

Выполнение нормативных требований по повышению теплозащитных качеств ограждающих конструкций связано с дополни-

тельной теплоизоляцией эксплуатируемых зданий и созданием ограждающих конструкций нового поколения с повышенным сопротивлением теплопередаче.

Достижение необходимого уровня тепловой защиты возможно с применением в наружных ограждающих конструкциях современных эффективных теплоизоляционных материалов. Это материалы на основе минеральной ваты, стекловаты, пенополистирола и пенополиуретана. В ограждающих конструкциях зданий применяются также и традиционные теплоизоляционные материалы из ячеистого бетона, газосиликата, на основе перлита, гравий и песок керамзитовый, аглопаритовый и др.

Для дополнительной теплоизоляции наружных стен существующих зданий используются различные конструктивно-технологические решения, называемые системами утепления. Наибольшее распространение, как в мире, так и на территории СНГ получили:

- тяжелые штукатурные системы;
- легкие штукатурные системы;
- вентилируемые системы.

В новом строительстве наружные стены могут быть однослойными или многослойными. Однослойные наружные стены изготавливают из ячеистого бетона, полистиролбетона. Основным критерием указанных материалов является плотность, определяющая их прочность и коэффициент теплопроводности.

Перспективно в однослойных наружных стенах применение ячеистых бетонов плотностью в диапазоне 400...600 кг/м³. Ячеистые блоки применяются в несущих стенах домов малой и средней (до 4) этажности, а также в ненесущих наружных стенах многоэтажных зданий при клеевых кладочных швах и использовании базальтовых связей. Ячеистый бетон в конструкции наружных стен может сочетаться с облицовкой из кирпича и эффективными теплоизоляционными материалами.

Современным теплотехническим требованиям соответствуют трехслойные панели с гибкими связями и эффективными теплоизоляционными материалами.

Проведенный анализ указывает на повышение требований по экономии энергии при проектировании и эксплуатации теплозащиты зданий, начиная с наступления энергетического кризиса. В наступившем столетии постепенное повышение требования, как к те-

плотностью защитным качествам ограждающих конструкций, так и к обеспечению микроклимата помещений повсеместно продолжается. При этом указанная тенденция в разных странах проводится исходя из особенностей их географического расположения и экономического потенциала.

1.5.3 Модернизация абонентских вводов систем теплоснабжения

К малозатратным, с низким сроком окупаемости, технологиям энергосбережения относятся мероприятия, проводимые при автоматизации систем теплоснабжения зданий, получающих теплоноситель от центрального теплоснабжения. При этом обязательным является перестройка систем потребления на качественно-количественное или количественное регулирование. Качественно-количественное регулирование осуществляется одновременным изменением расхода и температуры теплоносителя, а количественное – изменением расхода теплоносителя при постоянной температуре на вводе в регулируемую систему. Указанный переход сопровождается полной автоматизацией абонентских вводов – центральных (ЦТП) и индивидуальных тепловых пунктов (ИТП), т.е. перенесением регулирования расхода теплоты на системы потребления.

Посредством теплового пункта объекта осуществляется управление местными системами потребления (отоплением, горячим водоснабжением, вентиляцией), производится трансформация параметров теплоносителя (температуры и давления, поддержание постоянства расхода, учет расхода теплоты и др.).

Количественное и количественно-качественное регулирование на ИТП и ЦТП организовывается с использованием системы автоматического регулирования (САР), представляющей замкнутую динамическую систему с отрицательной обратной связью. Принцип регулирования по отклонению регулируемого параметра (температуры, давления, расхода и др.) используется на всех тепловых пунктах. САР обеспечивает изменение регулируемого параметра в зависимости от изменения другого параметра. Результатом автоматизации является обеспечение комфортных условий в помещениях зданий и реальная экономия энергии.

В новом строительстве ориентируются на проектировании ИТП с размещением их на обслуживаемых объектах. Это позволяет повысить общую эффективность использования автоматического регулирования потребления теплоты, снизить потери теплоты при транспорте теплоносителя, уменьшить капитальные и текущие затраты.

О преимуществе ИТП по сравнению с ЦТП в реализации стратегии энергосбережения указывает и тот факт, что автоматизация ЦТП экономит около 10% годового потребления теплоты на отопление, а ИТП – 25% и больше [1.16].

На вновь вводимых в эксплуатацию ИТП предпочтение отдается независимой схеме подключения к тепловым сетям.

На эксплуатируемых объектах автоматизация сопровождается заменой оборудования. Элеваторные узлы смешения заменяются узлами регулирования с насосным смешением и регуляторами дифференциального давления (РПД). Это позволяет получить относительную независимость систем потребления от входных параметров на вводе в ИТП – располагаемого давления и температуры. Дополнительно устанавливаются или заменяются грязевики на фильтры тонкой механической очистки, а в системе горячего водоснабжения (ГВС) устанавливаются циркуляционные насосы.

Индивидуальный тепловой пункт осуществляет согласование и стабилизацию гидравлических режимов в тепловых сетях и в системах теплоснабжения за счет автоматизации их работы.

При автоматизации ИТП работающей по зависимой схеме наиболее простым вариантом узла смешения остается регулируемый водоструйный элеватор, в котором с помощью иглы, соединенной с сервомотором изменяется сечение сопла (рис. 1.11). Условием эффективной работы элеватора служит наличие на вводе достаточного перепада давления.

Расход теплоносителя, регулируемого по температурам воздуха в помещении и вне его, а также по температуре смешанной воды, обеспечивается электронным блоком (программируемым контроллером). Следует отметить, что регулируемый водоструйный элеватор не создает достаточного располагаемого давления, как для однотрубной, так и для двухтрубной систем отопления, отопительные приборы которых оснащены терморегуляторами, а стояки автоматическими регуляторами гидравлических параметров. Применение

регулируемых гидроэлеваторов, как в новом строительстве, так и при реконструкции систем отопления не имеет перспектив.



Рис. 1.11. ИТП с водоструйным регулируемым элеватором:
1 – регулирующий элеватор; 2 – грязевик; 3 – расходомер

Автоматизацию эксплуатируемых ИТП надежнее осуществить с использованием смесительных и циркуляционных насосов. В этом случае вариантами узлов смешения являются схемы с применением двухходовых или трехходовых регулирующих клапанов. Использование двухходовых регулирующих органов обычно осуществляется совместно с насосом, устанавливаемым на перемычке или подающем трубопроводе системы отопления. Наиболее применяемые схемы смешения теплоносителя показаны на рис. 1.12.

Основными элементами системы являются регулирующий клапан, насос, контроллер. На каждый стояк системы отопления установлен балансировочный клапан.

Среднегодовая экономия теплоты при отоплении здания и использовании указанной САР равна 20%.

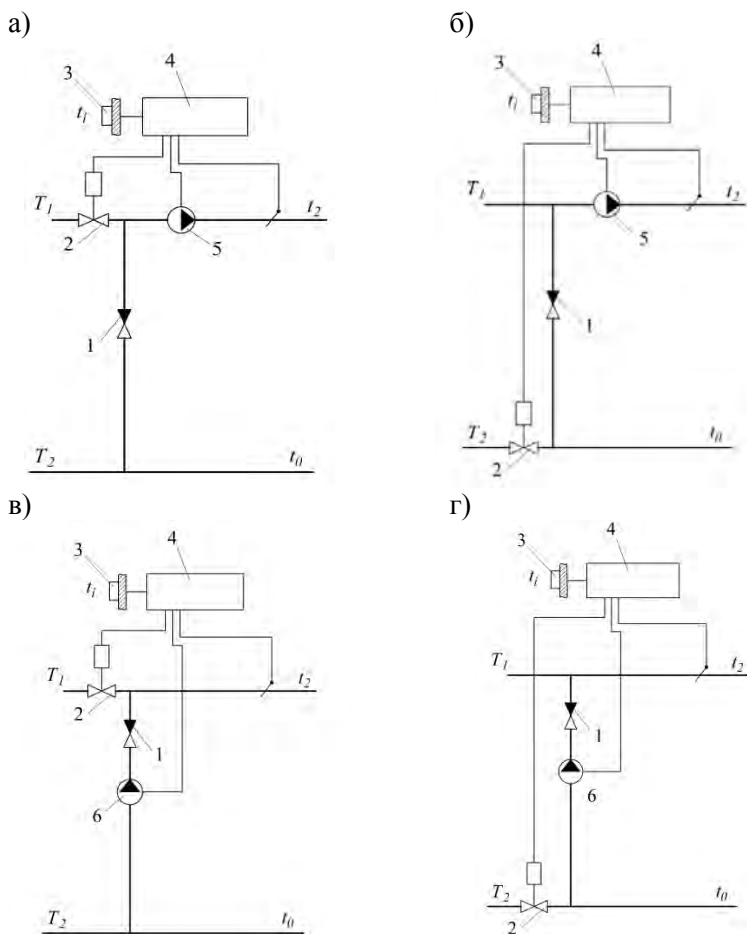


Рис. 1.12. Схемы смешения теплоносителя с двухходовым регулирующим клапаном и насосом при зависимом присоединении абонента:

- a* – с насосом на подающей и клапаном на входной магистралях;
- б* – с насосом на подающей и клапаном на обратной магистралях; *в* – с насосом на перемычке и клапаном на входной магистрали; *г* – с насосом на перемычке и клапаном на обратной магистрали; *1* – обратный клапан; *2* – регулирующий двухходовой клапан; *3* – термометр наружного воздуха; *4* – регулирующий блок; *5* – циркуляционный насос; *6* – подмешивающий насос

При автоматическом смешении потоков теплоносителей с помощью трехходового регулирующего органа насос может устанавливаться на перемычке или подающем трубопроводе системы отопления (рис. 1.13, 1.14).

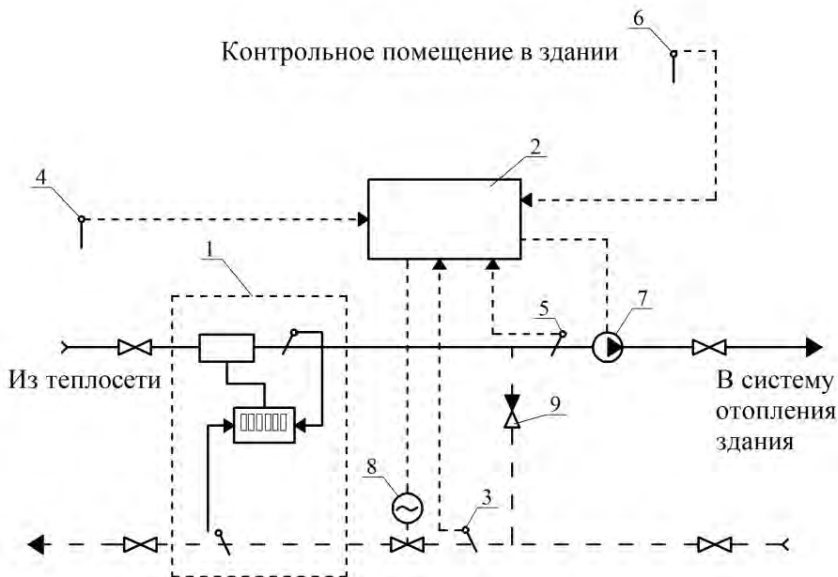


Рис. 1.13. Схема ИТП с двухходовым клапаном и циркуляционным насосом:
 1 – блок теплосчетчика; 2 – вычислительный контроллер;
 3-6 – температурный датчик; 7 – циркуляционный насос;
 8 – клапан на обратном трубопроводе; 9 – обратный клапан

В рассмотренных ниже схемах насос подбирается на расчетный расход теплоносителя в системе отопления и на напор равный потерям давления с запасом в 10%.

В тепловом узле по прямому потоку теплоносителя за узлом учета расхода теплоты устанавливается регулятор разности давлений. Его назначение в поддержании постоянной разности давлений между прямым и обратным сетевым теплоносителем и тем самым стабилизация их потока.

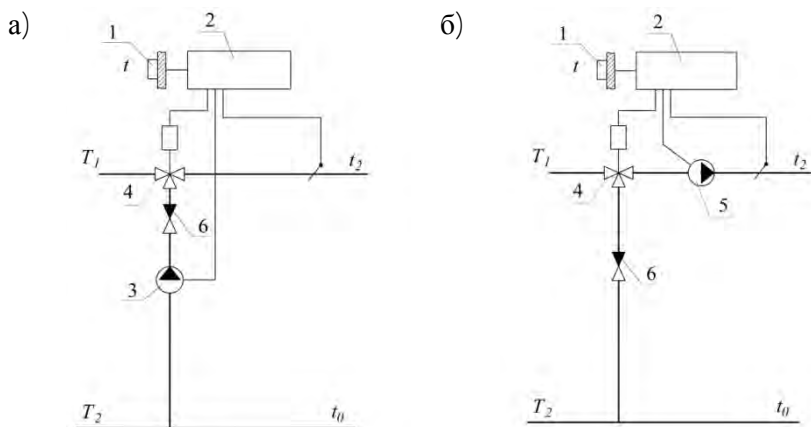


Рис. 1.14. Схемы смешения теплоносителя с трехходовым регулируемым клапаном и насосом при зависимом присоединении абонента:
а – с насосом на перемычке и клапаном в месте врезки на подающей магистрали;
б – с насосом и клапаном на подающей магистрали в месте врезки;
 1 – термометр наружного воздуха; 2 – регулирующий блок; 3 – подмешивающий насос; 4 – трехходовой клапан; 5 – циркуляционный насос; 6 – обратный клапан

Контроль разности давлений обеспечивает независимость систем теплотребления от динамических колебаний в тепловых сетях. Поддержание постоянных перепадов давлений на регулирующих клапанах является условием обеспечения оптимальной работы регулирующих устройств в системах теплотребления зданий. Обычно устанавливается единый регулятор перепада давления перед узлами регулирования систем отопления, ГВС и вентиляции.

При сложных пьезометрах тепловой сети предпочтительна схема независимого присоединения. Она универсальна и применима для зданий любого назначения и этажности вне зависимости от параметров теплоносителя в сети (рис. 1.15).

Независимое подключение абонента гидравлически отсоединяет систему отопления от тепловых сетей и уменьшает вероятность аварийных ситуаций.

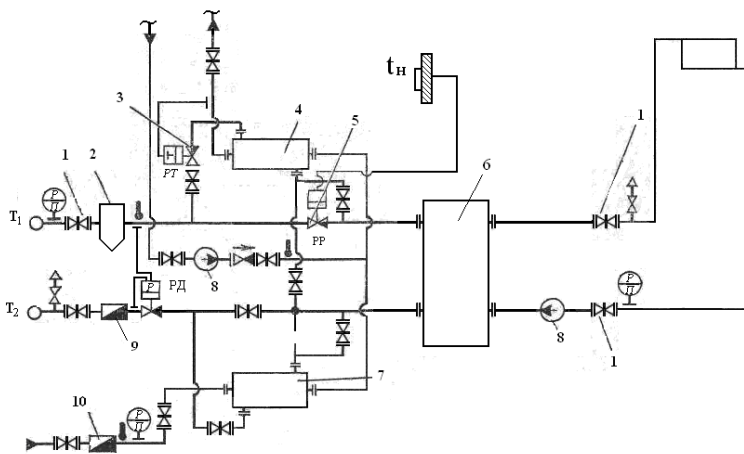


Рис. 1.15. Схема индивидуального теплового пункта с независимым подключением систем отопления и ГВС:

- 1 – задвижки; 2 – грязевик; 3 – регулятор температуры; 4 – теплообменник II ступени; 5 – регулятор расхода; 6 – теплообменник; 7 – теплообменник I ступени; 8 – циркуляционный насос; 9 – регулятор разности давлений; 10 – водомер

Указанное решение является энергоэффективным, обеспечивая соблюдение температурного режима систем отопления соответствующего температуре наружного воздуха и насосную циркуляцию теплоносителя в системе отопления и горячей воды в системе ГВС.

При независимом теплоснабжении потребителей (систем отопления, вентиляционных систем и кондиционеров) с замкнутым контуром циркуляции должно поддерживаться постоянное давление. Каждая система может иметь свой узел подпитки с использованием пневмобака или подпиточных насосов.

В ИТП, подсоединенном по независимой схеме, контроль и регулирование температуры теплоносителя по сетевому температурному графику осуществляется по датчику температуры, на обратном сетевом трубопроводе установленном после теплообменника. Расположение насоса по отношению к теплообменнику не имеет особого значения. Современные насосы эффективно работают при их установке, как на подающем, так и на обратном трубопроводе.

Для упрощения проектирования ИТП могут изготавливаться в заводских условиях и поставляться на объекты строительства в виде

укомплектованных готовых к эксплуатации блоков – блочных тепловых пунктов (БТП).

БТП предназначены для подсоединения к тепловой сети по независимой схеме и представляют собранные в общую конструкцию отдельные теплотехнические узлы в комплекте с приборами автоматического регулирования и управления, а также контроля. Существующая тенденция перехода от зависимых схем теплоснабжения к независимым служит движущей силой распространения БТП в современном строительстве.

Изготовление БТП в заводских условиях позволяет обеспечить высокое качество оборудования, свести монтажно-наладочные работы на объектах к установке блоков и подсоединению их к тепловым сетям и сетям электроснабжения. Использование БТП особенно эффективно при типовом жилищном строительстве.

На данный момент промышленность изготавливает блочные тепловые пункты полной готовности для всевозможных вариантов проектных решений.

Стандартное оборудование БТП включает следующие узлы и модули:

- узел ввода;
- узел учета теплопотребления абонента;
- узел обеспечения гидравлического режима систем теплопотребления абонента;
- узлы присоединения систем отопления, горячего водоснабжения и вентиляции;
- узлы подпитки с расширительным сосудом.

Автоматизация БТП осуществляется с использованием электротехнических, электронных и гидромеханических приборов. Приемы осуществления автоматизации БТП представлены в информационных материалах производителей оборудования [1.20].

Одним из направлений строительства жилья является малоэтажное строительство жилых домов на одну или несколько квартир. Размещаться указанные объекты могут на территориях без готовой или с уже устаревшей инфраструктурой. В этом случае для отдельных квартир и домов эффективным будет использование малых блочных тепловых пунктов (МБТП). На рис. 1.16 представлен один из указанных блочных тепловых пунктов.

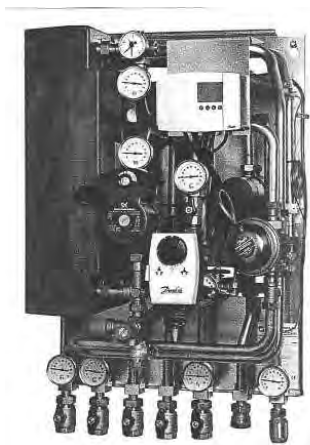


Рис. 1.16. Малый блочный тепловой пункт TermixVVXCompact20

Эти пункты предназначены для подготовки воды на горячее водоснабжение квартиры и независимого присоединения системы отопления к тепловой сети. Нагрев воды осуществляется в пластинчатых теплообменниках. Минимальные размеры теплового пункта 815 × 505 × 400 мм позволяют устанавливать его в любой квартире или доме.

1.6 Методология энергосбережения при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений

Энергосберегающие мероприятия можно разделить на две группы:

– мероприятия, приводящие к уменьшению тепловой мощности размещаемых в здании систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, горячего водоснабжения;

– мероприятия, снижающие затраты тепловой и электрической энергии на эксплуатацию систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, горячего водоснабжения.

К первой группе мероприятий относятся повышение теплозащиты ограждающих конструкций зданий, разработка инженерных решений с целью снижения воздухообменов в помещениях зданий, использование современного энергоэффективного оборудования и технологий и т.д.

Использование второй группы мероприятий связано с автоматизацией и диспетчеризацией работы инженерных систем, совершенствованием и выявлением оптимальных вариантов их проектных решений.

Оптимизация энергопотребления в зданиях выполняется при разработке проектной документации. Основанием для выполнения проекта являются нормативные документы, представляющие законодательные акты строительной отрасли [1.21, 1.22, 1.13]. Нормативные документы построены на задании определенных величин и правил, сформулированных с учетом предыдущего опыта. Они действуют на протяжении длительных промежутков времени. Предыдущий опыт не всегда отвечает требованиям сегодняшнего дня. Например, на предыдущих этапах развития отопительной техники, в силу ситуации сложившейся в топливном комплексе СССР, сдерживалось развитие низкотемпературных систем отопления с использованием водогрейных котлов, возобновляемых источников энергии и теплонасосных установок. На данный момент низкотемпературные системы получили широкое развитие в странах мира и на территории СНГ,

Нормативы по теплоизоляции ограждающих конструкций зданий установлены по фиксированным значениям величин сопротивления теплопередаче, которые приняты без обоснования, но с подтекстом о необходимости снижения уровня энергопотребления. На основании величин сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций осуществляется расчет основных теплопотерь зданий и последующая оценка уровня энергопотребления. Необходимо подчеркнуть, что принятые в нормативных документах требования часто являются завышенными, не подтвержденными экономическими расчетами, что влияет на достоверность оценки энергоэффективности теплоизоляции.

Составление и анализ тепловых балансов зданий жилого и нежилого фондов один из важных элементов в комплексе работ связанных с энергосбережением. На основании тепловых балансов проектируются системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Но при этом не учитывается, что эти системы кроме теплоты потребляют электроэнергию на привод насосов и обеспечение работоспособности другого оборудования.

Вследствие причин изложенных ниже многие нормативные документы неоднозначно воспринимаются инженерным и научным обществом. В то же время их наличие позволяет систематизировать требования к проектированию и эксплуатации инженерных систем зданий.

Используемые в настоящее время нормативные документы не позволяют выявлять резервы и находить оптимальные решения по экономии энергоресурсов при создании, проектировании и эксплуатации инженерных систем зданий.

Выявление резервов энергопотребления может быть выполнено составлением и анализом полных энергетических балансов зданий и сооружений, направленных на решение следующих задач:

- оценки фактического состояния эффективности энергопользования;
- выявления и оценки резервов экономии топлива и энергии;
- улучшения режимов эксплуатации инженерного оборудования;
- определения требований по организации и совершенствованию учета и контроля расхода энергии;
- получения новой информации по разработке оборудования и технологий инженерных систем и ограждающих конструкций зданий.

Энергетический баланс является важной характеристикой энергетического состояния зданий и сооружений и отражает полное количественное соотношение между суммарной подведенной энергией, суммарной полезной энергией и потерями энергии.

Составление энергетического баланса здания основывается на наличии данных по количественным потокам энергоносителей на отопление, вентиляцию, кондиционирование воздуха, освещение, горячее водоснабжение, пищеприготовление и т.д. Получение указанной информации возможно на стадии проектирования объекта, когда выполняется проектная оптимизация, или в ходе его эксплуатации, на основании реального энергетического баланса.

Данные для составления реального энергетического баланса должны быть получены по результатам обследования ограждающих конструкций и инженерных систем здания. Инструментальное обследование является обязательным также в случае поиска причин нарушений микроклимата квартир и помещений зданий в связи с недотопом.

В комплексе энергосберегающих мероприятий большое значение отводится изучению переноса теплоты и массы и измерениям теплотехни-

ческих характеристик ограждающих конструкций зданий в процессе исследований, предшествующих разработке проектной документации на выполнение дополнительной теплоизоляции и инструментального контроля после выполнения теплоизоляционных работ.

В Республике Беларусь с 1 января 2003 было введено требование «проводить при приемке в эксплуатацию законченных строительством, реконструируемых и капитально отремонтированных ограждающих конструкций зданий и сооружений приборный контроль на соответствие их термического сопротивления нормативным значениям» [1.23].

Данное постановление инициировало появление «Временного порядка контроля сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий нормативным требованиям» [1.24]. Проведение указанного контроля осуществлялось с использованием методик приборных исследований температурных полей на поверхностях ограждений и коэффициентов теплопередачи самих ограждений, проверенных практикой и нормативно узаконенных.

1.7 Выводы

1. С наступлением энергетического кризиса в начале 90-х годов экономия теплоты осуществлялась коррекцией графика центрального качественного регулирования в сторону снижения температур теплоносителя подаваемого в системы центрального теплоснабжения.

2. Низкие теплозащитные качества ограждающих конструкций и снижение температур теплоносителя в системах отопления привели к массовому недотопу зданий, следствием которого стало нарушение микроклимата помещений

3. Теплозащитные качества ограждающих конструкций определяются протекающими взаимосвязанными процессами тепло- и массопереноса.

4. Экономия теплоты при обеспечении микроклимата помещений взаимосвязана с повышением энергоэффективности инженерных систем и теплозащитных характеристик ограждающих конструкций, которые следует улучшать, учитывая опыт эксплуатации существующего фонда зданий.

5. Выявление резерва энергопотребления зданий и сооружений осуществляется составлением и анализом их энергетических балансов.

6. Оценку энергоиспользования необходимо проводить на основании методологии термодинамического анализа и контроля параметров микроклимата помещений и систем отопления и вентиляции.

Литература к главе 1

- 1.1. Юргенсон, Л.К. Тепловая экономика здания. / Л.К.Юргенсон. – М. – Л., 1949.
- 1.2. Шаркаускас, И.И. К расчету систем лучистого отопления помещений. / И.И.Шаркаускас. – Научные труды Московского инженерно-строительного института, 1967. – 52 с.
- 1.3. ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. Минск, 1998.
- 1.4. ГОСТ 12.1.005 – 88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. М., 1991.
- 1.5. Богословский, В.Н. Тепловой режим зданий. / В.Н.Богословский. – М.: Стройиздат, 1979. – 247 с.
- 1.6. Казанцев, И.А. Микроклимат жилища на Севере. / И.А.Казанцев, О.Е. Гаврилова, Л.Т.Бошнякович. – Л.: Стройиздат, 1984.
- 1.7. Стефанов, Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. / Е.В.Стефанов. – Л.: ЛВВИСКУ, 1982.
- 1.8. Бахинди, Л. Тепловой микроклимат помещений. / Л.Бахинди. – М.: Стройиздат, 1981. – 247 с.
- 1.9. Ионин, А.А. Теплоснабжение / А.А.Ионин, Б.М.Хлыбов, В.Н.Братенков. – М.: Стройиздат, 1982.
- 1.10. Кононович, Ю.В. Тепловой режим зданий массовой застройки / Ю.В.Кононович. – М.: Стройиздат, 1986.
- 1.11. Роджерс, Т.С. Проектирование теплозащиты зданий. Т.С.Роджерс. – М.: Стройиздат, 1966. – 226 с.
- 1.12. EN 15316 – 1:2007. Системы отопления зданий. Метод расчета энергетических характеристик и показателей, эффективности системы. Часть 1: Общие требования.
- 1.13. Сормумен, П. Энергоэффективность зданий. Ситуация в Финляндии / П.Сормумен // Инженерно-строительный журнал, 2010. – №1. – С.7-8.
- 1.14. СНиП 23-02-2003. «Тепловая защита зданий». М.: Мин-регион России, 2012.

- 1.15. ТКП 45-2.04-43-2006 Строительная теплотехника. Минск, 2007.
- 1.16. Ливчак, В.И. Установка ИТП в зданиях вместо замены изношенного оборудования в ЦТП и перекладки сетей горячего водоснабжения / В.И.Ливчак – Энергосбережение, 2008. – №1. – С. 36-39.
- 1.17. Покотилов, В.В. Регулирующие клапаны автоматизированных систем тепло-холодоснабжения./ В.В.Покотилов. – Вена, фирма «Herz Armaturen», 2010. – 176 с.
- 1.18. Пырков, В.В. Современные тепловые пункты. Автоматика и регулирование / В.В.Пырков – Киев. – «ДД «Такі справи», 2007.
- 1.19. Проект автоматического регулирования теплопотребления. Энергосбережение, 2008. – №1. – С.48-51.
- 1.20. Стандартные автоматизированные блочные тепловые пункты Danfoss. Пособие. ООО «Данфосс», Москва, 2011.
- 1.21. СНБ 4.02.01-03 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Минск, 2004.
- 1.22. ТКП 45-3.02-113-2009 Тепловая изоляция наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений. Минск, 2009.
- 1.23. Постановление Совета Министров РБ от 27.12.2002 г. №1820 «О дополнительных мерах по экономному и эффективному использованию топливно-энергетических ресурсов».
- 1.24. Временный порядок измерительного контроля зданий и сооружений на соответствие сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций нормативным требованиям. Минск, 2003. РИБ «Белорусский строительный рынок», №9, 20.

ГЛАВА 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССАХ И СИСТЕМАХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

2.1 Здание или сооружение – как единая энергетическая система. Задачи анализа и синтеза.

Основная задача функционирования любого здания и сооружения состоит в поддержании в помещениях параметров микроклимата, необходимых для обеспечения проживания или производственной деятельности человека. Для этого здания и сооружения имеют ограждающие конструкции для создания пространства, защищенного от атмосферных воздействий, и инженерные системы, обеспечивающие поддержание микроклимата в помещениях.

Ограждающие конструкции зданий выполняют функции теплозащиты, процессы переноса теплоты и массы в них должны быть ориентированы на обеспечение определенных (заданных) режимов эксплуатации. Инженерное обеспечение включает системы различного назначения.

Системы отопления предназначены для компенсации потерь теплоты зданий путем транспортирования и передачи ее от теплоносителей воздуху помещений. Основное оборудование системы – теплообменники, трубопроводы, струйные насосы, регулирующие органы, запорная арматура и др.

Системы вентиляции и кондиционирования служат для подготовки и транспорта воздуха, замещаемого в помещениях зданий. Воздух очищается от вредных веществ, нагревается или охлаждается, увлажняется или осушается. Для этого используется различное фильтровальное оборудование, теплообменные и массообменные аппараты, холодильники и тепловые насосы, вентиляторы, воздуховоды, регулирующее и воздухоподогревающее оборудование и т.д.

Системы горячего водоснабжения обеспечивают здание нагретой водой питьевого качества. Для этого необходимы теплообменные аппараты, смесители, насосы, трубопроводы и другое оборудование.

Указанные элементы систем инженерного обеспечения зданий представляют сложные системы. Элементы этих систем взаимосвязаны потоками теплоты, массы, электроэнергии, механической работы.

Инженерные системы и процессы в них изучаются на различных уровнях:

- система в целом (например, система отопления);
- элементы системы – оборудование (например, рекуперативный теплообменник);
- элементы оборудования (например, развитая поверхность теплообмена, потоки первичного и вторичного теплоносителей).

Выделение уровня изучения систем имеет условный характер и зависит от требований решаемых задач и особенностей изучаемых систем. В большинстве случаев задачи при проектировании или эксплуатации зданий формируются следующим образом: осуществить необходимые мероприятия при минимальных затратах энергии, материалов, финансовых средств и т.д. В каждом конкретном случае эти задачи реализуются в соответствии с их особенностями.

Общим является то, что любое здание или сооружение следует рассматривать как единую энергетическую систему, все элементы которой – ограждающие конструкции, системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, тепло- и энергоснабжения – взаимосвязаны и режимы их эксплуатации определяются наружным климатом и внутренним микроклиматом. Поэтому анализ состояния здания, как энергетической системы, следует проводить на основании энергетических балансов. Могут быть использованы как тепловые балансы, отражающие равенство прихода теплоты в здании с материальными потоками и энергоресурсами и расхода теплоты на выходе из здания, так и полные энергетические балансы, показывающие равенство прихода и выхода всех видов энергии, претерпевающих преобразования.

Для оценки энергетического состояния зданий недостаточно составления и исследования полных или тепловых балансов. В основу универсальной методологии оценки энергопотребления с целью выявления резервов экономии энергии при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений положены методы системного анализа и синтеза. Системный подход принятия оптимального решения по экономии энергии и поддержанию микроклимата помещений зданий представляет совокупность приемов и принципов выбора технических характеристик и физических параметров систем и оборудования, отвечающих достижению поставленной цели.

Анализ и синтез – фундаментальные понятия науки [2.1]. Анализ – метод исследования, заключающийся в том, что изучаемый объект расчленяется на составные элементы, каждый из которых затем исследуется отдельно как часть объекта. Синтез – метод исследования, заключающийся в соединении элементов объекта, расчлененного в процессе анализа с целью познания, и рассмотрении результатов исследования объекта как единого целого. Конечной целью системного анализа является поиск путей и реализация минимального энергопотребления при эксплуатации инженерных систем зданий и сооружений. Рассмотрение указанной задачи осуществляется одновременно как единой целой, так и отдельных частей ее составляющих.

Каждое здание или сооружение от момента возникновения замысла их создания до и во время строительства и эксплуатации, проходит несколько взаимосвязанных этапов. Содержание этих этапов кратко пояснено на рис. 2.1.

На всех этапах создания зданий и сооружений решаются определенные задачи в конечном счете влияющие на их энергоэффективность. При решении этих задач обязательным является учет взаимодействия объектов с внешней средой.

Внешние климатические воздействия на здания представляют сложный комплекс случайных факторов, числовые характеристики которых непрерывно изменяются во времени вследствие случайности атмосферных явлений. К ним относятся температура и относительная влажность наружного воздуха, направление и скорость ветра, интенсивность прямой и рассеянной радиации.

На 1 – 3 этапах оценку энергоэффективности целесообразно проводить на основании тепловых балансов отдельных инженерных систем зданий или отдельных помещений.

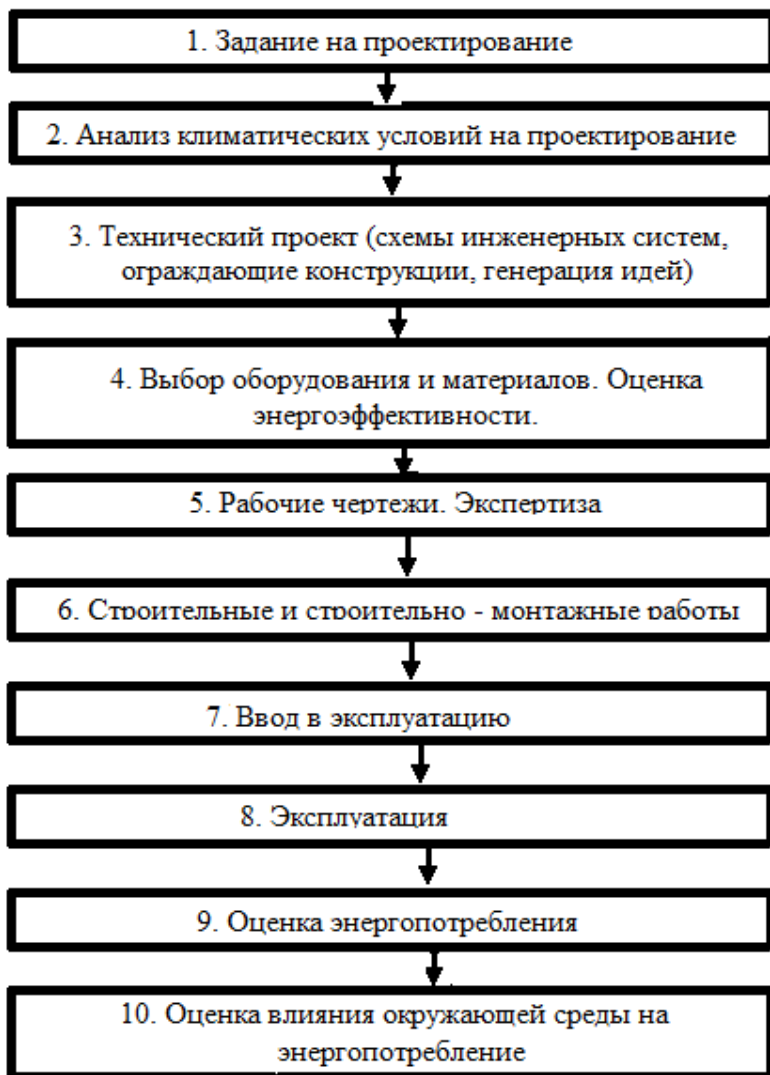


Рис. 2.1. Этапы создания зданий и сооружений

На 4 – 5 этапах общую оценку энергоэффективности зданий следует выполнять на основании полного теплового баланса. Анализ энергопотребления отдельных систем или их оборудования, а также зданий в целом следует проводить с использованием термодинамического анализа.

Системный подход нельзя рассматривать как совокупность строго установленных правил, позволяющих получать решение сложных задач по энергосбережению в зданиях автоматически. Он указывает оптимальные пути и возможности решения задач.

2.2 Термодинамический анализ – основа оценки использования энергии

Энергия служит для количественной оценки различных форм движения материи: механической, тепловой, химической, электрической, ядерной и др. Это именно и подчеркивается принципом сохранения энергии. С другой стороны, основным признаком понятия энергии должна быть. Оценка способности производить работу. А способность производить работу является свойством, выходящим из сферы закона сохранения энергии или из закона термодинамики. Это можно показать на примере.

Рассмотрим изолированную систему, в которой находятся два тела с температурами T_1 и T_2 . При этом $T_1 > T_2$. Пока тела обмениваются друг с другом теплотой, работа совершается. Но, наступает момент, когда $T_1 = T_2$. Работа системой не выполняется, в то же время, с точки зрения физики, количество энергии в системе осталось тем же.

Сущность недостатков использования закона термодинамики к анализу тепловых процессов сводится к тому, что энергобаланс не включает качественных характеристик энергопревращений, выявляемых только с привлечением второго закона термодинамики. Так, при оценке использования теплоты необходимо анализировать условия, при которых происходит ее передача, находить источники и причины возникновения потерь, т.е. определить «качество» энергии, с которым непосредственно связано понятие «энергосбережение».

|| закон термодинамики известен в двух основных формулировках. Первая – теплота сама по себе не может передаваться в

сторону более высокой температуры и вторая – теплота не может полностью превращаться в работу. Из этих формулировок вытекает техническое значение второго закона термодинамики. Его суть – в анализе тех или иных энергопревращений системы, обусловленных тенденцией самопроизвольного перехода ее от неравновесного состояния к равновесному, на качество и экономичность технических процессов,

Из сущности II закона термодинамики вытекает понятие эксергии или как его иногда называют «максимальной работоспособности» энергии термодинамической системы. Термин «эксергия» был введен Я.Шаргутом [2.2] и стал общепринятым, заменив понятие «работоспособность». Эксергией системы называется способность ее производить работу в условиях определенного термического состояния с окружающей средой. Понятие эксергии относится к совокупности «система + среда». При заданном состоянии окружающей среды эксергия термодинамической системы является функцией состояния этой системы.

Математически эксергия записывается в виде

$$e = h_1 - h_0 - T_0 \cdot (S_1 - S_0) , \quad (2.1)$$

где h и S – энтальпия и энтропия вещества, кДж/кг и кДж/(кг · К);
 T_0 – температура окружающей среды, К.
 e – удельная эксергия вещества, кДж/кг.

Индекс «0» означает состояние вещества в равновесии с окружающей средой.

Физический смысл эксергии можно установить исходя из следующего.

Запишем I закон термодинамики при $P = const$

$$dq = dh - v dp$$

и разделим слагаемые его на T_0 .

$$\frac{dq}{T_0} = \frac{dh}{T_0} - \frac{\nu dp}{T_0} \quad (2.2)$$

Отсюда

$$dS = \frac{dh}{T_0} - \frac{\nu dp}{T_0} \quad (2.3)$$

Подставим (2.3) в (2.1) и получим

$$de = \nu dp, \quad e = \int \nu dp \quad (2.4)$$

Эксергия представляет теплоту, эквивалентную работе, получаемой от потока рабочего тела при обратимом изменении его состояния в заданных условиях. Т.е., это мера превратимости энергии в высшие формы (электрическую, механическую), то есть мера качества, технической ценности, работоспособности энергии.

Эксергия термодинамической системы в данном состоянии измеряется количеством механической, электрической энергии, которое может быть получено от системы в результате её обратимого перехода из данного состояния в состояние равновесия с окружающей средой. Эксергия является универсальной характеристикой качества энергии, независимо от их вида, предполагаемого направления использования. Так, эксергия теплоты однозначно связана с ее потенциалом: чем выше температура горячего потока, тем выше его эксергия.

В процессе использования в зданиях и инженерных системах входящие в них потоки энергии более высоких форм (электрическая, механическая, химическая) частично или полностью переходят в низшую форму – тепловую, которая по мере использования приближается к параметрам окружающей среды, теряет работоспособность и выводится из системы.

Высшие формы энергии – электрическая, механическая – не характеризуются энтропией и теоретически полностью превратимы в любые другие формы энергии.

Ограниченная превратимость химической и тепловой энергии в высшие формы (работоспособность) обусловлена вторым законом

термодинамики. Часть энергии этих видов «связана» энтропией и не может быть преобразована в высшие формы.

Эксергия делится на два вида: первый относится к формам энергии, не характеризуемым энтропией (где $q = e$), второй – к характеризуемым энтропией (для которых $e \approx q$). К первым принадлежит механическая, электрическая и другие виды энергии. Здесь эксергия равна энергии системы и специальный расчет эксергии не требуется. Ко вторым принадлежат по существу все те виды эксергии, каждый из которых вычисляется по индивидуальной методике, и нуждается в специальном рассмотрении.

Классификация видов эксергии [2.3] представлена на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Виды эксергии

С помощью термодинамического анализа на основе эксергетического анализа выполняется оптимизация технических систем, как в целом, так и отдельных элементов, определяются режимы внутренних и внешних условий их работы.

2.3 Эксергия теплового потока и эксергия излучения

Эксергия теплового потока e_q при температуре T_n определяется количеством работы, которое может быть получено или должно быть затрачено в обратимом процессе переноса энтропии, характеризующей данный тепловой поток, на уровень температуры T_0 окружающей среды.

Термическая эксергия теплового потока с постоянной температурой T_n определяется по выражению

$$e_q = q \cdot \frac{T_n - T_0}{T_n} = q \cdot \Theta, \quad (2.5)$$

где q – величина теплового потока единицы теплоносителя, КДж/кг;

Θ – эксергетическое число равно доле работоспособной энергии теплового потока между температурами T_n и T_0 .

Превратимость теплоты в высшие формы (доля работоспособной энергии) изменяется от 0 при T_0 до 1 при $T \rightarrow \infty$.

Выражением (2.5) следует пользоваться для расчета термической эксергии тепловых потоков, то есть в тех случаях, когда приходная или расходная статья энергобаланса представлена разностью теплоты, вносимой в систему и выходящей из нее с потоком энергоносителя. Для определения величины термической эксергии в выражение (2.5) необходимо подставить среднюю температуру теплового потока.

Термическая эксергия тепловых потоков, подводимых (отводимых) к системе от энергоносителей, не меняющих фазовое состояние, определяется по среднелогарифмической температуре:

$$T = \frac{T_n^1 - T_n^2}{\ln T_n^1 / T_n^2}, \quad (2.6)$$

$$a) E_q = G \cdot \bar{C}_p \cdot \left[T_n^1 - T_n^2 - T_0 \cdot \ln \frac{T_n^1}{T_n^2} \right] \quad (2.7)$$

где T_n^1, T_n^2 – соответственно большее и меньшее значение температуры энергоносителя на входе (выходе) системы, К;

\bar{C}_p – средняя теплоемкость энергоносителя между температурами T_n^1 и T_n^2 , кДж/(кг·К);

G – массовый расход потока энергоносителя в кг (за расчетный промежуток времени).

По выражению (2.7) следует рассчитывать термическую эксергию теплоты, вносимой в систему с сетевой водой, или выводимой из нее с вентвыбросами, оборотной водой. Энергию и эксергию энергоносителей, изменяющих фазовое состояние в системе (например, на входе – перегретый пар, на выходе – конденсат), в полном энергобалансе в виде теплового потока показывать не следует.

Эксергия излучения e_ε определяется количеством работы, которая может быть получена при температуре окружающей среды T_0 за счет использования в обратимом процессе единицы энергии данного излучения.

Эксергия излучения может рассматриваться с разных точек зрения. Так, эксергия излучения некоторой поверхности, оптические характеристики и температура T_n которой известна, может быть определена по формуле, представленной в [2.2]:

$$e_\varepsilon = \varepsilon \sigma_0 \left[3 \cdot 3T_n^4 + T_0^4 + 4T_0^4 \cdot T_n^3 \right], \quad (2.8.)$$

где ε – степень черноты излучающей поверхности;
 σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

Если необходимо определить эксергию излучения, достигающего определённого тела, от N-го источника, то параметры излучения находятся путём экспериментальных исследований.

В рассмотренных случаях эксергия e_ε излучения определяет максимальную работу, которая может быть выполнена во время обратимого процесса приведения этого излучения в состояние равновесия с окружающей средой.

Для системы двух параллельных тел удельный поток эксергии определяется по уравнению

$$e_{\varepsilon} = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \left\{ \left(\frac{T_H}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \frac{4}{3} T_0 \left[\left(\frac{T_H}{100} \right)^3 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^3 \right] \right\}. \quad (2.9)$$

где ε_{np} – приведенная степень черноты системы, определяемая как

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1};$$

C_0 – излучательная способность абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴).

Из уравнения (2.9) следует, что эксергия излучения e_{ε} равна нулю при $T_H = T_0$. При отклонении температуры от T_0 в сторону как высоких, так и низких величин, эксергия излучения возрастает, сохраняя при этом положительное значение.

2.4 Эксергия вещества в потоке

Эксергию вещества в потоке рассматривают как состоящую из двух величин. Первая из них представляет термомеханическую (или физическую) эксергию и связана с различием термических (ΔT) и механических (Δp) параметров вещества и среды. Она измеряется количеством работы, получаемой в обратимом процессе установления равновесия потока вещества со средой посредством энергетического взаимодействия, но без обмена материей. При этом $p \rightarrow p_0$ и $T \rightarrow T_0$.

Вторая – нулевая (или химическая) эксергия – связана с установлением равенства химических потенциалов между соответствующими компонентами рабочего тела и окружающей среды.

Термомеханическая (сумма термической и механической) эксергия вещества в потоке по данным об удельных значениях энтальпии и энтропии (водяной пар, вода) рассчитывается по выражению:

$$e = h_1 \cdot t, P - h_2 \cdot t_0, P_0 - T_0 \cdot [S_1 \cdot t, P - S_2 \cdot t_0, P_0], \quad (2.10)$$

где $S_1(t, P)$, $S_2(t_0, P_0)$ – удельная энтропия вещества при рабочих условиях и в состоянии равновесия с окружающей средой, кДж/(кг·°С);

$h_1(t, P)$, $h_2(t_0, P_0)$ – удельная энтальпия вещества при рабочих условиях и в состоянии равновесия с окружающей средой, кДж/кг.

Выражение (2.10) является наиболее точным и удобным для расчета термомеханической эксергии.

Термическая эксергия вещества в потоке с температурой T_n , не меняющего фазового состояния при охлаждении (нагреве) от T_n до T_0 , определяется по выражению:

$$E_q = G \cdot \bar{C}_p \cdot (T_n - T_0) \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = G \cdot \bar{C}_p \cdot \left(T_n - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T_n}{T_0}\right), \quad (2.11)$$

где T – среднелогарифмическая температура в интервале от T_0 до T_n определяемая по выражению (2.6).

Если $T_n < 2T_0$, для расчета термической эксергии вещества в потоке используется среднеарифметическая температура между T_0 и T_n :

$$e_q = q \cdot \frac{T_n - T_0}{T_n + T_0} = \bar{C}_p \cdot \frac{T_n - T_0}{T_n + T_0}^2. \quad (2.12)$$

или

$$E_q = Q \cdot \frac{T_n - T_0}{T_n + T_0} = G \cdot \bar{C}_p \cdot \frac{T_n - T_0}{T_n + T_0}^2. \quad (2.13)$$

Выражения (2.11 и 2.12) следует применять для расчета термической эксергии дымовых газов, конденсата, твердых материалов и т.д. Их можно использовать для расчета термической эксергии отдельно прямой и обратной сетевой или оборотной воды.

Термическая эксергия материального потока, изменяющего фазовое состояние в интервале температур от T_0 до T равна:

$$e = \bar{C}' \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0} \right) + r \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) + \bar{C}'' \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0} \right), \quad (2.14)$$

где $T_{\text{фп}}$ – температура фазового перехода, К;
 $r_{\text{фп}}$ – теплота фазового перехода, кДж/кг;
 \bar{C}' и \bar{C}'' – средняя теплоёмкость при постоянном давлении вещества в жидкой и газообразной фазах, кДж/(кг·К).

Если в интервале от T_n до T_0 вещество претерпевает два фазовых перехода, в выражение (2.14) следует добавить соответствующие члены.

2.5 Эксергетическая оценка основных процессов инженерных систем зданий и сооружений

Взаимодействие термодинамической системы здания, инженерной системы или оборудования этой системы с окружающей средой и в самой системе возможно вследствие наличия разности потенциалов. При термическом взаимодействии разностью потенциалов является разность температур, при деформационном – разность давлений, при химическом – разность химических потенциалов. Все процессы взаимодействия подчинены физическим ограничениям, связанным с их необратимостью. Некоторые физические ограничения можно свести к минимуму путем тщательного изучения их в определенных условиях эксплуатации инженерных систем и оборудования. При невозможности уменьшения необратимых потерь в оборудовании или в системах следует избегать их использования.

В инженерных системах зданий встречаются следующие необратимые процессы.

1. Нагрев тел.
2. Смешение капельных или газообразных жидкостей, имеющих различные составы и температуру.
3. Передача теплоты в теплообменных аппаратах.
4. Течение жидкостей через устройства, являющиеся сопротивлениями (дросселирование).

Часть потерь в инженерных системах могут быть «технически-ми», вызываемыми несовершенством оборудования. Примерами технических потерь служат потери от несовершенства тепловой изоляции, от теплообмена при конечной разности температур и др.

Другая часть потерь связана с необратимыми явлениями, свойственными данному процессу, например, потери в дроссельных устройствах и т.д.

2.5.1 Анализ процесса нагрева тел

Общим признаком всех процессов нагрева является подвод теплоты при температуре во много раз превышающей температуру окружающей среды. Эта теплота может быть сообщена путем внешнего обогрева при помощи теплоносителей или ее можно получать в самом теле путем пропускания электрического тока.

Температура источника теплоты и нагреваемого тела может быть как переменной, так и постоянной. Наглядно процесс нагрева можно изобразить в $T - S$ диаграмме.

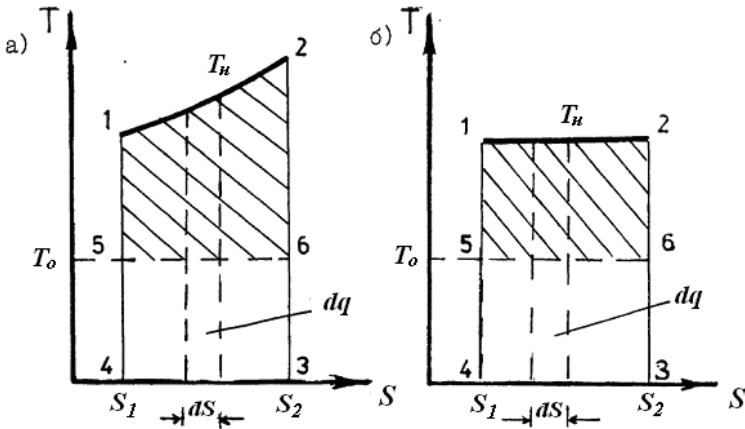


Рис. 2.3. Разделение величины теплоты нагрева на эксергию и анергию
 а - $T = f(\tau)$, б - $T = const$

Количество теплоты нагрева равно площади под линией температуры нагрева (F_{1234}) и определяется величиной равной

$$q = \int_1^2 T_H \cdot S_2 - S_1 \quad (2.15)$$

При подводе теплоты q , можно осуществить круговой процесс между изотермами T_H и T_0 . При этом максимальная работа l составит

$$l = l_H - l_o = q_H - q_o = \int_1^2 T_H - T_o \cdot S_2 - S_1 \quad (2.16)$$

Из (2.16) следует, что подведенная теплота подразделяется на две части. Одна часть энергии совершает работу, эквивалентную теплоте, используемой для нагрева и является эксергией, подведенной теплоте (e_q). Вторая часть энергии в форме теплоты отводится в окружающую среду (W_q).

$$e_q = \int_1^2 T_H - T_0 \cdot \Delta S \quad (2.17)$$

$$W_q = \int_1^2 T_0 \cdot \Delta S \quad (2.18)$$

На рис. 2.3 эксергия нагрева изображена заштрихованной площадкой (F_{1265}). Незаштрихованные площади (F_{5436}) представляют собой часть теплоты нагрева или энергии нагрева, которая не превращается в работу. Ее называют анергией нагрева. Из диаграммы видно, что при нагреве необходимо иметь количество энергии со строго определенной частью эксергии. А также требуются затраты энергии, не способной производить работу.

Количество эксергии, которое содержится в некотором количестве теплоты, подведенном в процессе нагрева, определяется соотношением

$$\Theta = \frac{e}{q} \quad \text{или} \quad \Theta = \frac{T_H - T_o}{T_H} \quad (2.19)$$

если T_n принять постоянной. Это соотношение называется эксергетической величиной или эксергетическим числом энергии.

Процесс нагрева требует затраты энергии, содержащей определенную часть, не способную производить работу. При этом, если в процессах совершения механической работы важна только эксергия, а анергия нежелательный балласт, то процессы нагрева нуждаются в обоих видах энергии, и при этом в точно определенных количествах. Это видно при определении эксергетического числа энергии при условии, что $T_0 = 273\text{K}$.

При нагреве до температуры $T_n = 293\text{K}$ $\Theta = 0,068$. Если нагрев осуществляется до 373K , то $\Theta = 0,268$, а если до 1073K , то $\Theta = 0,745$.

Представленный расчет показывает, что эксергетическая величина тем больше, чем выше температура T_n . При высоких температурах в процессах нагрева требуется больше эксергии и меньше анергии, чем при низких температурах.

Примером служит процесс нагрева с использованием электрического тока. Энергия электрического тока является чистой эксергией и всю анергию необходимо создать из нее путем необратимых превращений. Возникающие при этом потери дорогостоящей эксергии тем больше, чем меньше Θ процесса нагрева. Поэтому процесс нагрева с использованием электрического тока с точки зрения термодинамики целесообразен при высоких температурах.

Следует отметить, что введение понятия анергия не столь эффективно, как введение понятия эксергия. Анергия может успешно использоваться в термодинамическом анализе только для процесса нагрева при $T_n > T_0$. В остальных случаях термодинамического анализа использование его часто приводит к неопределённым выводам.

2.5.2 Смещение с целью регулирования температуры теплоносителя

Смещение широко используется для регулирования температуры теплоносителя перед подачей его в инженерные системы. Для этого используются струйные компрессоры или эжекторы. В системах отопления зданий эжекторы, предназначенные для перемещения и

смешивания двух потоков воды с различными температурами и давлениями, называются «элеваторами». Принцип действия эжектора основан на передаче энергии одной среды, движущейся с высокой скоростью, другой, подсосываемой среде.

Процесс в струйном компрессоре включает как расширение рабочего потока воды от давления P_1 до P_3 , так и производимое за счет этого расширения повышение давления подсосываемого потока до величины P_4 .

Схема потоков и изображение процесса смешения в e, h координатах применительно к однофазной несжимаемой жидкости дана на рис. 2.4.

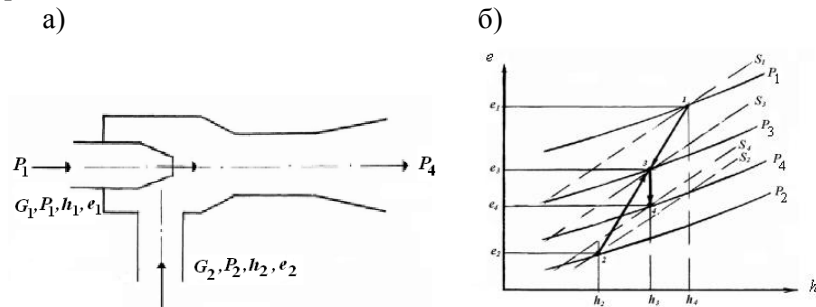


Рис. 2.4. Схема потоков и процесс в e, h -диаграмме в струйном компрессоре

Жидкость с параметрами P_1 и h_1 проходит через сопло, в котором резко возрастает скорость и падает давление до P_3 . Струя первой жидкости в камере смешения захватывает вторую жидкость и направляется в диффузор, где скорость падает, а давление смеси возрастает. Изображение процесса в координатах e, h дает возможность оценить эксергетические характеристики смешения. Состояние рабочей и подсосываемой жидкости обозначено на диаграмме соответственно точками 1 и 2. В идеальном случае состояние смеси определяется точкой 3 на прямой 1 – 2. Потери в реальном эжекторе при дросселировании рабочей жидкости, приращение в диффузоре приводит к уменьшению давления и эксергии и действительное состояние жидкости на выходе из него определяется точкой 4.

Разность $\Delta S = S_4 - S_1$ представляет приращение энтропии от необратимости смешения, а $\Delta e = e_3 - e_4 = T_0 \cdot \Delta S$ – соответственно, потерю эксергии.

Коэффициент полезного действия в эжекторе равен:

$$\eta_e = \frac{G_2 \cdot \Delta e_{2-4}}{G_1 \cdot \Delta e_{1-4}}. \quad (2.20)$$

Увеличение эксергии жидкости G_2 всегда меньше потери эксергии рабочей жидкости G_1 . Реальная величина η_e водоструйного эжектора (элеватора) составляет 10 – 12%.

2.5.3 Передача теплоты в теплообменных аппаратах

В теплообменных аппаратах потери эксергии связаны с теплообменом между теплоносителями при конечной разности температур, с теплообменом с окружающей средой и потерями от гидравлических сопротивлений.

Теплопередача между теплоносителями приводит к увеличению эксергии одного теплоносителя за счет уменьшения эксергии другого. Теплоперенос между теплоносителем и окружающей средой или между теплоносителями, приводит к понижению эксергии.

В рекуперативном теплообменнике распределение температур по поверхности теплообмена при $T > T_0$ может быть представлено в диаграмме $\Theta_e - Q$ (рисунок 2.5). Охлаждаемому теплоносителю I соответствует кривая 1 – 2, нагреваемому II – кривая 3 – 4. Площадь 1234 равна эксергии, потерянной в теплообменнике.

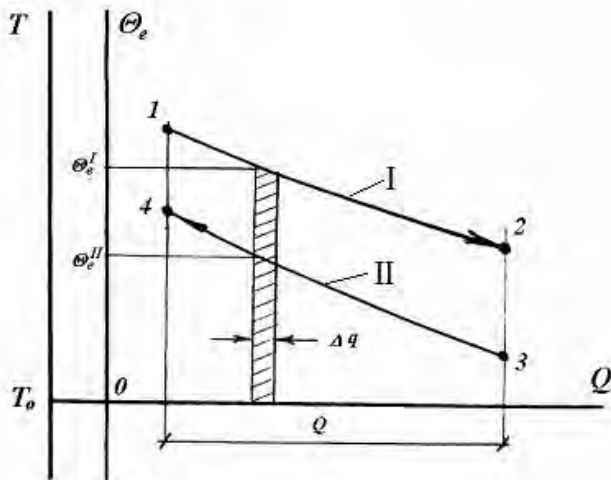


Рис. 2.5. Процесс теплопередачи в координатах $\Theta_e - Q$

Полную информацию о потерях эксергии, связанных с наличием конечной разности температур между теплоносителями I и II можно получить по выражению

$$\Delta e_q' - \Delta e_q'' = \Delta q \Theta_e' - \Delta q \Theta_e'' = \Delta q \Delta \Theta \quad (2.21)$$

Выражение (2.21) записано для участка поверхности ΔF теплообменника, на котором величина удельного потока теплоты равна Δq . Величина Θ_e – эксергетическое число, равна эксергетической температурной функции. Из уравнения следует, что потеря эксергии D_T от конечной разности температур в процессе теплопередачи для теплового потока Δq пропорционально разности эксергетических чисел энергии теплоносителей $\Delta \Theta_e$.

Пропорциональность потерь эксергии разности эксергетических чисел позволяет не только определить потери в теплообменнике в целом или на его участках, но и обосновывать оптимальные разности температур теплоносителей.

Эксергетический КПД процесса теплопередачи в теплообменнике определяется по отношению

$$\eta_e = \frac{E_q^I}{E_q^{II}} = \frac{Q \cdot \bar{\Theta}^I}{Q \cdot \bar{\Theta}^{II}}, \quad (2.22)$$

где E_q^I и E_q^{II} – соответственно потоки эксергии теплоносителей I и II, кДж;

Q – поток теплоты, кДж.

Изменение состояния теплоносителей, проходящих через теплообменник, связано с потерями давления от гидравлических сопротивлений. При отсутствии сопротивлений процесс охлаждения теплоносителя I протекает по изобаре 1 – 2, а нагревание теплоносителя II – по изобаре 3 – 4 (рис. 2.6). В действительности, чтобы получить на выходе из теплообменника параметры, соответствующие точкам 2 и 4, теплоносители на входе должны иметь более высокие давления. Теплоноситель I должен повысить давление от P_1 до P_1' , а теплоноситель II от P_3 до P_3' , затратив на это работу, которая будет потеряна на преодолении гидравлических сопротивлений.

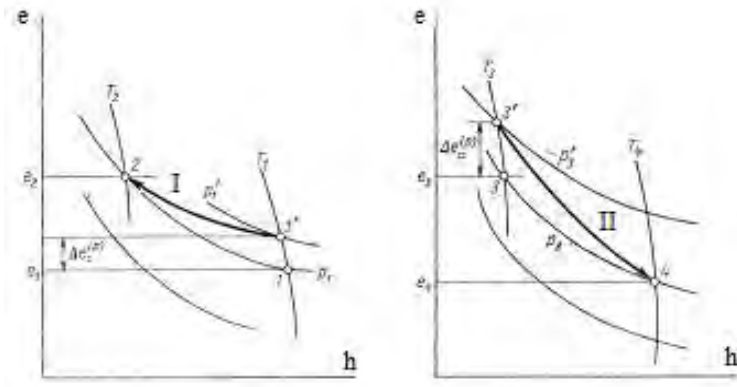


Рис. 2.6. Изменение эксергии теплоносителей в теплообменнике с учетом гидравлических сопротивлений в $e-h$ координатах

Общая величина потерь в теплообменнике эксергии от гидравлических сопротивлений будет равна

$$D_p = G_I \cdot \Delta e_I \cdot \frac{1}{\eta_e'} + G_{II} \cdot \Delta e_{II} \cdot \frac{1}{\eta_e''}, \quad (2.23)$$

где G_I и G_{II} – расходы теплоносителей, кг;
 Δe_I и Δe_{II} – потери эксергии теплоносителей I и II, кДж;
 η_e' и η_e'' – коэффициенты полезного действия нагнетательных устройств, используемых для повышения давления теплоносителей.

Каждое слагаемое давления представляет работу нагнетательного устройства.

Потери от теплообмена с окружающей средой вызваны потоками эксергии от теплообменника через тепловую изоляцию. Весь поток эксергии равный $D_u = Q \cdot \overline{\Theta}_e$ теряется. Величина потери от несовершенства изоляции может быть выражена как

$$D_u = G_I \cdot \Delta e_I + G_{II} \cdot \Delta e_{II}. \quad (2.24)$$

Общая величина потерь из необратимости связанной с переносом теплоты в теплообменнике равна

$$D = D_T + D_p + D_u. \quad (2.25)$$

2.5.4 Дросселирование

Дросселирование это процесс уменьшения давления, не сопровождающийся отводом энергии в виде теплоты или работы. Дросселирование осуществляется с минимальными потерями энергии, но после прохождения дросселя она становится менее полезной. При адиабатическом дросселировании энергия потока не изменяется ($h = const$) и потерь ее не происходит. Возможны потери эксергии жидкости, связанные с уменьшением ее при изменении давления (e_p) и при изменении температуры (e_T).

В зависимости от вида рабочего тела и его параметров дросселирование может протекать с охлаждением и нагреванием. Процесс дросселирования в области, где эффект Джоуля–Томсона

$\bar{\alpha} = \frac{\Delta T}{\Delta P} > 0$, в $e-h$ координатах показан на рисунке 2.7. Начальная точка процесса 1 соответствует давлению P_1 и температуре T_1 , конечная точка 2 – давлению P_2 и температуре T_2 , при этом $T_1 > T_2$.

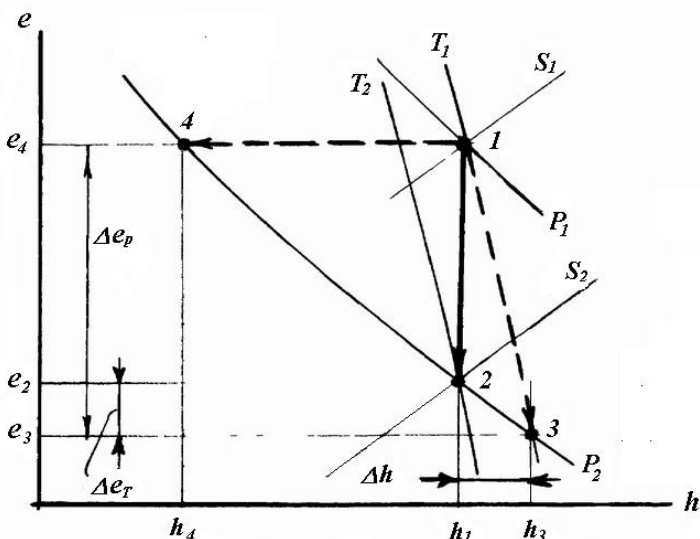


Рис. 2.7. Процесс дросселирования в $e-h$ координатах при $\bar{\alpha} > 0$

Потеря эксергии при адиабатическом дросселировании равна

$$\Delta e_{1-2} = e_1 - e_2. \quad (2.26)$$

Эта величина определяется преобразованием эксергии Δe_p , связанной с наличием перепада давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ в эксергию Δe_T определяемую понижением температуры $\Delta T = T_1 - T_2$. Разность энтальпий $\Delta h = h_1 - h_3$ при T_1 является следствием изотермического дроссель-эффекта, в результате которого точка 3 окончания процесса смещается влево, и процесс заканчивается в точке 2, соответствующей температуре T_2 . Эксергия эффекта охлаждения определяется величиной Δe_{2-3} .

Эксергетический к.п.д. процесса дросселирования может быть определен как

$$\eta_e = \frac{\Delta e_{2-3}}{\Delta e_{1-2}} \quad \text{или} \quad \eta_e = \frac{e_2}{e_1}. \quad (2.27)$$

Чем больше величина Δe_{2-3} , тем выше к.п.д. процесса.

2.6 Энергетические балансы зданий и сооружений

2.6.1 Тепловой баланс зданий и сооружений

Оценка эффективности использования теплоты в зданиях и их инженерных системах, независимо от их сложности, основывается на применении теплового баланса, отражающего количественную сторону тепловых процессов.

$$Q_{\text{ф.т.}} + Q_{\text{от.вен.}} + Q_{\text{г.в.}} + Q_{\text{вн.эн.}} = Q_{\text{ст.в.}} + Q_{\text{вен.выбр.}} + Q_{\text{теп.зд.}} + Q_{\text{об.в.}} + Q_{\text{теп.тр.}}, \quad (2.28)$$

где $Q_{\text{ф.т.}}$ – физическая теплота материалов, поступающих в здание, обусловленное отличием их температур от температуры окружающей среды, кДж;

$Q_{\text{от.вен.}}$ – теплота, подводимая в здание системами отопления и вентиляции, кДж;

$Q_{\text{г.в.}}$ – теплота горячей воды, используемая на коммунально-бытовые нужды, кДж;

$Q_{\text{вн.эн.}}$ – теплота внешних энергоносителей, пара различных параметров, теплофикационная вода и т.д., кДж;

$Q_{\text{ст.в.}}$ – теплота, удаляемая из здания со сточными водами, газообразными выбросами, кДж;

$Q_{\text{вент.выбр.}}$ – теплота, удаляемая из здания с вентвыбросами, кДж;

$Q_{\text{теп.зд.}}$ – теплопотери через ограждающие конструкции здания, кДж;

$Q_{\text{об.в.}}$ – теплота, отводимая от оборудования с оборотной водой, в воздушных охладителях, кДж;

$Q_{\text{теп.тр.}}$ – теплопотери от трубопроводов оборудования, установленных на открытых площадках, кДж.

Потребление теплоты технологическим оборудованием, установленным в здании, относится к приходным статьям баланса. В расходную часть баланса входят потоки теплоты с оборотной водой, дымовыми газами, сточными водами и т.д.

Расчет теплоты, вносимой в здание или выводимой из нее с материальным потоком, основывается на определении разности энтальпий потока при рабочих условиях и в состоянии равновесия с окружающей средой.

$$Q = h_1 - h_2 \cdot G, \quad (2.29)$$

где h_1 – удельная энтальпия потока вещества при давлении P_1 , МПа и температуре t_1 °С, кДж/кг;

h_2 – удельная энтальпия потока вещества при давлении P_2 , МПа и температуре t_2 °С, кДж/кг;

G – массовый расход вещества, кг или м³.

По выражению (2.29) следует рассчитывать теплоту в тех случаях, когда значения удельной энтальпии вещества могут быть найдены из термодинамических таблиц или диаграмм. В частности, выражением следует пользоваться при расчете теплоты водяного пара и теплофикационной воды.

Теплота потока вещества, не меняющего фазового состояния между рабочей температурой t_1 и температурой окружающей среды t_2 , определяется по выражению:

$$Q = G \cdot C_p \cdot t_1 - t_2, \quad (2.30)$$

где C_p – средняя удельная теплоемкость вещества в интервале температур от t_1 до t_2 , кДж/(кг·°С).

Теплота материального потока, изменяющего фазовое состояние между t_1 и t_2 (например, при t_1 – жидкость, при t_2 – перегретый пар), вычисляется по формуле:

$$Q = G \cdot \left[C_p \cdot t_{ф.п.} - t_0 + r + C_p \cdot t - t_{ф.п.} \right], \quad (2.31)$$

где $t_{ф.п.}$ – температура фазового перехода, °С;

r – теплота фазового перехода, кДж/кг;

C_p – средние удельные теплоемкости вещества при $P = \text{const}$, кДж/(кг·°C).

Энергетический баланс базируется на первом законе термодинамики и отражает только количественную сторону энергетических превращений. Он не отдаёт полной термодинамической оценки преобразования энергии, а, следовательно, не указывает пути энерго-технологического совершенствования потребления энергии в зданиях и их инженерных системах.

2.6.2 Эксергетический баланс зданий и сооружений

Анализ энергоиспользования на основании эксергетического баланса состоит в рассмотрении зданий и сооружений как некоторой замкнутой системы, отделенной контрольной поверхностью от остальных объектов.

Эксергии вещества в потоке и потока энергии, проходящие через эту контрольную поверхность, включаются в баланс

$$\sum E_{\text{вх}} = \sum E_{\text{вых}} + \sum D, \quad (2.32)$$

где $\sum E_{\text{вх}}$ и $\sum E_{\text{вых}}$ – суммы входящих и выходящих потоков эксергии, кДж;

$\sum D$ – потери эксергии, кДж.

С помощью эксергетического баланса можно решать различные задачи. Анализ тепловых процессов на основе эксергетического подхода дает результаты, позволяющие оценить истинную термодинамическую эффективность тепловых процессов. Можно выделить потери эксергии, связанные с необратимостью процессов, протекающих внутри систем, например, с дросселированием и гидравлическими потерями энергоносителей, тепломассообменом при конечных температурных напорах и др.

Анализ энергоэффективности процессов переноса энергии, связанных с работой систем теплоснабжения, отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, протекающих при температурах и давлениях близких к температуре и давлению окружающей среды так же проводится на основании эксергетического баланса.

2.6.3 Полный энергетический баланс зданий и сооружений

Полный энергетический баланс включает все виды энергии, поступающие и претерпевающие преобразования в рассматриваемом здании или сооружении. При составлении баланса учитывается:

- тепловая энергия, вносимая с потоками энергоносителей, топлива, материалов и отводимая в окружающую среду с теплопотерями зданий и оборудования, вентиляционными и газовыми выбросами, со сточными водами, с потоками продукции, обратной воды, отходов и т.д.

- электрическая энергия, необходимая для освещения, функционирования вентиляции и отопления, выполнения технологических процессов и т.д.;

- механическая энергия, например, энергия давления сжатых газов и т.д.;

- химическая энергия топлива, сырья для проведения технологических процессов, органической части сточных вод и т.д.

Уравнение полного энергетического баланса имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sum E_{\text{э}}^{\text{ВХ}} + \sum E_{\text{м}}^{\text{ВХ}} + \sum Q_{\text{х}}^{\text{ВХ}} + \sum Q^{\text{ВХ}} = \\ = \sum E_{\text{э}}^{\text{ВЫХ}} + \sum E_{\text{м}}^{\text{ВЫХ}} + \sum Q_{\text{х}}^{\text{ВЫХ}} + \sum Q^{\text{ВЫХ}} \end{aligned} \quad (2.33)$$

где $\sum E_{\text{э}}^{\text{ВХ}}$, $\sum E_{\text{э}}^{\text{ВЫХ}}$, $\sum E_{\text{м}}^{\text{ВХ}}$, $\sum E_{\text{м}}^{\text{ВЫХ}}$ – суммарные величины соответственно электрической и механической эксергии на входе и выходе рассматриваемого здания или сооружения, кДж;

$\sum Q_{\text{х}}^{\text{ВХ}}$, $\sum Q_{\text{х}}^{\text{ВЫХ}}$, $\sum Q^{\text{ВХ}}$, $\sum Q^{\text{ВЫХ}}$ – суммарные величины химической энергии и теплоты на входе и выходе рассматриваемого здания или сооружения, кДж.

В выражении (2.33) высшие формы энергии, электрическая и механическая, представлены в виде потоков эксергии, а низших форм, химической и тепловой, – в виде потоков теплоты.

Приходная часть полного энергобаланса включает, поступающую в здание извне тепловую, химическую и механическую энергии, которые вносятся материальными потоками. Структура по-

требления отдельных видов энергоресурсов входит в приходную часть полного энергобаланса в виде частных распределительных балансов по направлениям использования энергии.

Расходная часть, кроме энергии, выходящей из здания с материальными потоками (химическая энергия и теплота основных и побочных продуктов и отходов, механическая энергия сжатых газов и жидкостей, теплота с оборотной водой, конденсатом, дымовыми газами, вентвыбросами и т.п.), включает и теплопотери в окружающую среду от зданий, оборудования, установленного на открытых площадках, воздушных холодильников и т.п.

При составлении балансов зданий и сооружений, не имеющих производств, связанных с химическими превращениями веществ и переработкой горючих материалов, химическую энергию сырья, продуктов и отходов учитывать не следует. Для зданий и сооружений, перерабатывающих горючие материалы, независимо от наличия в них химических процессов, необходимо учесть химическую энергию сырья, продуктов и отходов производства – это позволит составить полное представление о наличии горючих вторичных энергетических ресурсов, возможностях их утилизации.

Для большинства зданий и сооружений приходная часть баланса включает электроэнергию, теплоту, химическую энергию топлив, а расходная – только теплоту, в основном, низкопотенциальную.

Теплота переносится каждым материальным потоком, химическая же энергия многих потоков равна нулю. Так, химическая энергия пара, теплофикационной, горячей, оборотной воды, конденсата равна нулю. Химическая энергия компонентов воздуха и самого воздуха также нулевая. Таким образом, все наиболее распространенные энергоносители имеют нулевую химическую энергию.

Аналогично энергии эксергия также подразделяется по видам: химическая, механическая, термическая. Теплоте соответствует термическая эксергия, сумме теплоты и механической энергии – термомеханическая эксергия.

При составлении полных энергетических балансов зданий, не связанных с химическими превращениями веществ и переработкой горючих материалов, химическую энергию сырья, продуктов и отходов учитывать не следует.

Совместный анализ приходной и расходной части полного энергобаланса позволяет наметить пути полного использования энергии

внутри зданий и сооружений. Для этого изучаются возможности замены первичных энергоресурсов возобновляемой энергией, полного использования её на базе современного оборудования и технологий.

В качестве примера рассмотрим энергетический баланс жилого дома, построенного в период между 1950...1978 гг. Теплотехнические характеристики зданий представлены в табл. 2.1.

2.7 Термодинамический анализ потоков теплоты в зданиях

Процессы нагрева и охлаждения, подачи и удаления воздуха и горячей воды осуществляются почти одновременно в одном и том же здании или помещении здания. При этом часто существует практика удаления лишней теплоты из помещений с одновременной подачей её от внешних источников.

Если рассмотреть тепловой баланс здания, то основными статьями прихода и расхода теплоты будут

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (2.33)$$

где Q_1 – теплотери через ограждающие конструкции, Вт;

Q_2 – теплотери за счет удаления нагретого воздуха при работе вентиляции, Вт;

Q_3 – теплотери с удаляемыми сточными водами, Вт;

Q_4 – тепlopоступления от технологического оборудования (в том числе освещения), Вт;

Q_5 – тепlopоступления от системы отопления, Вт;

Q_6 – тепlopоступления от системы горячего водоснабжения, Вт.

Перечисленные статьи баланса неравнозначны. Об этом можно судить по данным составляющих тепловых поступлений и потерь 72-квартирного жилого дома, представленным в табл. 2.1 [2.5].

Не считая теплотерь в окружающую среду, наиболее значительные потери теплоты с удаляемым воздухом и сточными водами.

Оценка эффективности использования теплоты в зданиях может быть дана на основании эксергетического анализа.

Приведенная к зданию тепловая энергия состоит из полезно используемой части энергии, эксергии и части энергии, удаляемой из

помещений с различными теплоносителями, энергии. Сам процесс поддержания микроклимата нуждается в обоих видах энергии и при этом в точно определенных количествах. Воспользовавшись выражением (2.18) определим соотношение потока эксергии и энергии для помещений с постоянной внутренней температурой воздуха.

Таблица 2.1

Тепловой баланс жилого дома

№№ пп	Наименование статей тепловых поступлений и потерь	Мощность теплового потока, кВт	
		поступающего	удаляемого
1	От системы отопления	407,5	
2	Через наружные ограж- дения		308,55
3	От системы горячего водоснабжения:		
	а) полотенцесушителей	10,2	
	б) ванн, умывальников, раковин	40	71
4	С удаляемым воздухом		144
5	От газовых плит	2,1	
6	От электрического освещения	44,5	
7	От людей	19,25	

Величина эксергетического числа « Θ » зависит от значений абсолютных температур воздуха внутри и вне помещения. В табл. 2.2 представлены значения эксергетического числа в зависимости от температуры окружающей среды T_0 при $T_B = 293$ К.

Таблица 2.2

Эксергетические числа в зависимости от температуры среды

$T_0,$ К	243	248	253	258	263	268	273	278	283
Θ	0,170	0,153	0,136	0,119	0,102	0,085	0,068	0,051	0,034

Небольшие значения Θ означают, что для поддержания микроклимата в помещениях требуется очень мало эксергии.

На рис. 2.8 представлены мощности потоков теплоты, эксергии и анергии, подводимых к жилому зданию в зависимости от температуры наружного воздуха. Графики построены по данным табл. 2.1 с использованием формулы (2.5). С уменьшением температуры окружающей среды увеличивается поток эксергии, необходимый для создания микроклимата в помещениях здания. Но все же около 70% подводимой теплоты составляет анергия. Следовательно, в процессе создания микроклимата помещений необходим подвод «смеси» эксергии и анергии. Как эта «смесь» образована, для процесса не имеет значения. Эксергию обычно получают от генераторов энергии. Типичным примером анергии является внутренняя энергия среды в помещениях или вне их. Отсюда ее можно взять.

Превращение эксергии в анергию один из старейших технических процессов, а экономия эксергии, уменьшение части анергии или превращение анергии в эксергию – новое направление в системах создания микроклимата зданий. Связано это направление с использованием регенерации теплоты, вторичных энергетических ресурсов и возобновляемых источников энергии.

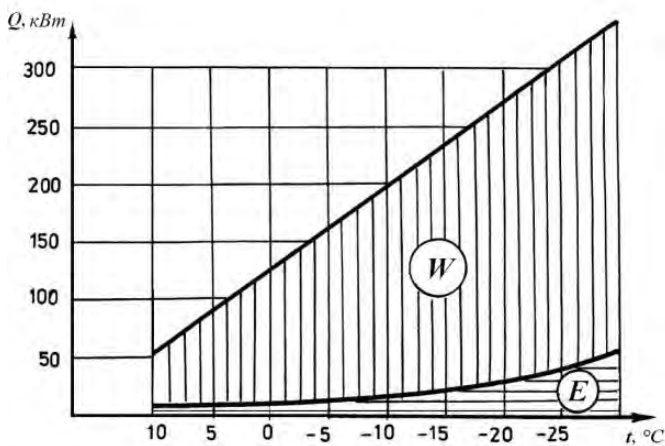


Рис. 2.8. Мощность потоков тепловой энергии, эксергии и анергии в зависимости от температуры наружного воздуха
 E – эксергия, кВт; W – анергия, кВт

Решение конкретных задач экономии эксергии в системах инженерного обеспечения зданий может осуществляться по замкнутой (рис. 2.9) или разомкнутой (рис. 2.10) схемам. По замкнутой, регенеративной схеме повышение использования эксергии потока теплоты происходит за счет анергии этого же потока. Выполнение указанного процесса осуществимо с использованием теплоутилизационного оборудования, установленного непосредственно в здании. По разомкнутой схеме тепловая энергия полностью или частично поступает от источника вторичных энергоресурсов, в качестве которых могут быть теплоиспользующие установки промышленных предприятий, крупные компрессорные станции и т.д.

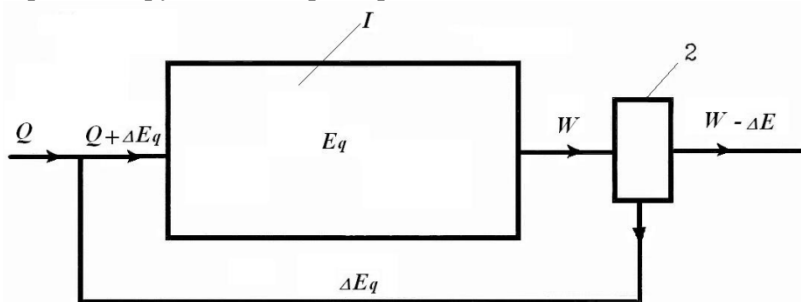


Рис. 2.9. Схема замкнутого или регенеративного использования теплоты ВЭР в системах ОВК:

1 – обогреваемое помещение; 2 – утилизатор теплоты

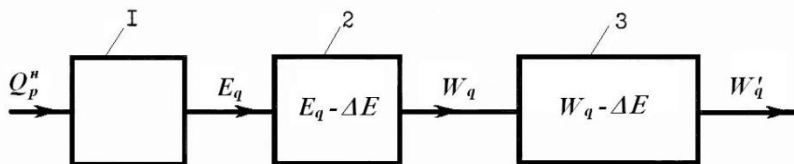


Рис. 2.10. Схема внешнего или разомкнутого использования ВЭР:

1 – генератор теплоты; 2 – потребитель теплоты – источник ВЭР;
3 – потребитель ВЭР

Возвратимся к тепловому балансу здания (табл. 2.1) и оценим постатейно возможности снижения расхода энергии на поддержание условий микроклимата помещений при получении смеси эксергии и анергии.

Экономия теплоты можно получить при организации надежной тепловой защиты зданий. Для этого используется «статическая» теплоизоляция с применением высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Но того же эффекта можно добиться, если направленный внутрь или наружу через ограждающие конструкции тепловой поток уменьшить путем отбора части теплоты и возврата его в здание. Осуществить это можно при создании так называемой «динамической» теплоизоляции, связанной с восстановлением энергии теплоты в эксергию. В основу «динамической» теплоизоляции положен принцип организации движения наружного или удаляемого воздуха по каналам, расположенным внутри ограждающих конструкций. Циркулирующий по каналам воздух специально подготовлен, имеет заданные параметры, что позволяет снизить передачу теплоты через ограждающие конструкции и частично ее утилизировать по регенеративной схеме.

Подготовка воздуха перед подачей его в вентилируемую прослойку осуществляется по схеме, представленной на рис. 2.11. Циркулирующий по замкнутому контуру воздух нагревается до температуры 10°C за счет теплоты удаляемых дымовых газов от генератора теплоты. В качестве утилизатора теплоты используется рекуперативный теплообменник. Потери теплоты зданием с ограждающими конструкциями и динамической теплоизоляцией по сравнению с потерями этого же здания с типовыми ограждающими конструкциями из красного кирпича меньше на 40%.

Возможны и другие технические решения получения «смеси» эксергии и энергии для поддержания температуры в помещениях отапливаемых зданий жилого, гражданского и промышленного назначения.

Теплота вентиляционных выбросов, сточных и отработанных вод является энергией процессов происходящих в зданиях. Утилизация ее, проводимая по регенеративной схеме, также является примером восстановления энергии в эксергию.

Нетрадиционные источники теплоты и ряд теплоносителей вторичных энергоресурсов имеют потенциал не позволяющий использовать их непосредственно в системах инженерного оборудования зданий, т.к. их теплота является практически энергией.

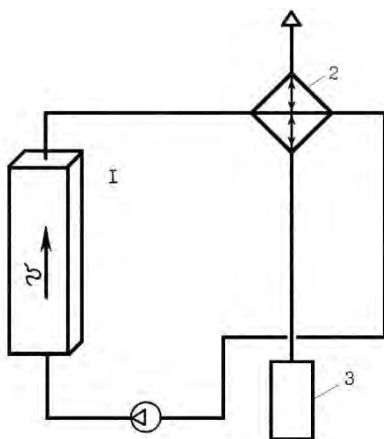


Рис. 2.11. Схема подготовки воздуха, циркулирующего в воздушных прослойках ограждающих конструкций зданий:

1 – каналы внутри ограждений; 2 – теплообменник-утилизатор;
3 – генератор теплоты

Повышение ценности потоков такой теплоты возможно с повышением ее потенциала, т.е. перевода анергии теплоты в эксергию с применением тепловых насосов. В тепловом насосе происходит объединение потоков эксергии и анергии. Эксергия подводится как высокоорганизованная энергия привода теплового насоса, а анергия извлекается из окружающей среды или от источников вторичных ресурсов.

2.8 Эксергетическая диаграмма Грассмана

Одним из приемов эксергетического анализа термодинамических систем служит диаграмма потоков эксергии, предложенная П.Грассманом. Эксергетическая диаграмма потоков строится по аналогии с энергетической диаграммой Сэнки. В обеих диаграммах потоки энергии и эксергии изображаются полосами, ширина которых в масштабе пропорциональна их величине, а направление указывается стрелками. Отличие диаграммы потоков энергии от диаграммы потоков эксергии в том, что потоки энергии постоянны и их ширина не может измениться без внешнего ее подвода или отвода.

В диаграмме П.Грассмана потоки эксергии могут уменьшаться или исчезнуть в результате внутренних или внешних потерь. Потери эксергии изображаются в виде треугольников потерь, один из катетов которого в масштабе определяет их величину в структурном элементе системы. Часть катета «потерь», соответствующая их внешней величине, имеет продолжение в виде полосы, пересекающей границы технической системы. Треугольники и полосы потерь выделяются на диаграммах.

Особенности диаграмм Сэнки и П.Грассмана рассмотрены на примере технической системы, включающей подсистемы обеспечения микроклимата помещений жилого дома. Принципиальная схема его энергоснабжения для отопительного периода года представлена на рис. 2.12.

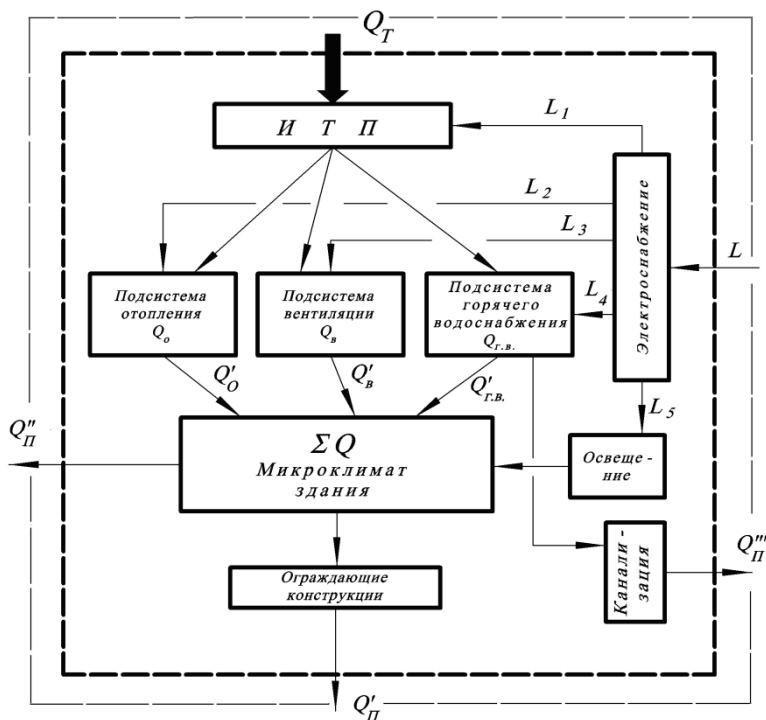


Рис. 2.12. Принципиальная схема энергообеспечения микроклимата здания:
 Q_T – тепловые потоки; L_i – электроснабжение; Q – теплотери

В границы технической системы, очерченной контрольной поверхностью, входят индивидуальный тепловой пункт, системы отопления, вентиляции, горячего водоснабжения, канализации, электроснабжения, а также ограждающие конструкции здания.

Потоки энергии в технической системе связаны как с внешним энергетическим, так и с внутренним обменом. Извне в систему поступают поток теплоты от системы теплоснабжения Q_T и поток подводимой электрической мощности L .

Из системы в окружающую среду уходят тепловые потоки через ограждающие конструкции $Q_{\text{п}}$, с удаляемым вентиляционным воздухом $Q_{\text{п}}'$ и канализационными стоками $Q_{\text{п}}''$. Внешний обмен энергией технической системы можно характеризовать равенством:

$$Q_T + L = Q_{\text{п}}. \quad (2.35)$$

Тепловой поток, поступающий в техническую систему через ИТП, распределяется на подсистемы отопления, вентиляции и горячего водоснабжения с последующим переходом части энергии в воздушный объем здания.

Поток подводимой электрической мощности распределяется на двигатели и привода насосов подсистем и на освещение здания.

Потери энергии системой связаны с теплотерями через ограждающие конструкции, с удаляемыми из здания вентиляционными выбросами и канализационными стоками.

Схема потоков энергии Сэнки, построенная на основании схемы, представленной на рис. 2.12, показана на рис. 2.13.

Из ее анализа видно, что происходящие в технической системе потери энергии и качественные ее изменения в диаграмме не находят отражения. Ширина полос изменяется только в случае подвода или отвода энергии к отдельным подсистемам. Но баланс поступающих и удаляемых потоков энергии сохраняется. В каждой подсистеме и всей технической системе суммарная ширина полос на входе равна ширине полос на выходе.

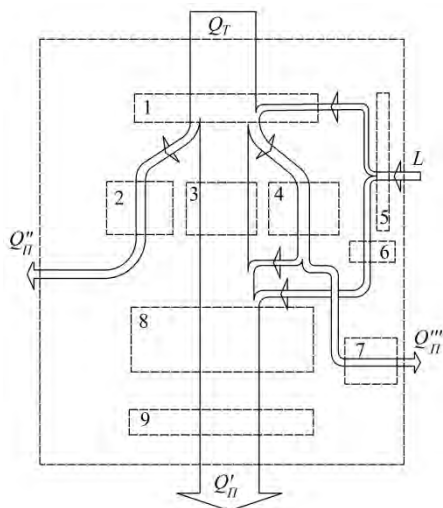


Рис. 2.13. Схема потоков энергии при обеспечении микроклимата здания:
 1 – индивидуальный тепловой пункт; 2 – система отопления; 3 – система вентиляции; 4 – система горячего водоснабжения; 5 – система электроснабжения;
 6 – система освещения; 7 – система канализации;
 8 – воздушный объем; 9 – ограждающие конструкции

Иначе выглядит эксергетическая схема потоков (рис. 2.14), иллюстрирующая трансформацию эксергии в технической системе и в подсистемах. На схеме П.Грассмана видны все потери, возникающие в результате необратимых процессов в каждой подсистеме. Ширина полос уменьшается при прохождении потоков через подсистемы. Также уменьшается и общая, суммарная, ширина полос, указывающая на потери эксергии в реальной технической системе по мере осуществления в ней технических процессов. Величина каждой потери в подсистеме характеризуется уменьшением ширины полосы эксергии и изображается зачерненным треугольником.

В техническую систему вводятся два потока эксергии. Один в виде потока теплоносителя поступает в индивидуальный тепловой пункт 1 от тепловых сетей, а второй в виде электрической энергии. Потери эксергии возникают в элеваторном узле или теплообменнике, а также в электродвигателях и приводах.

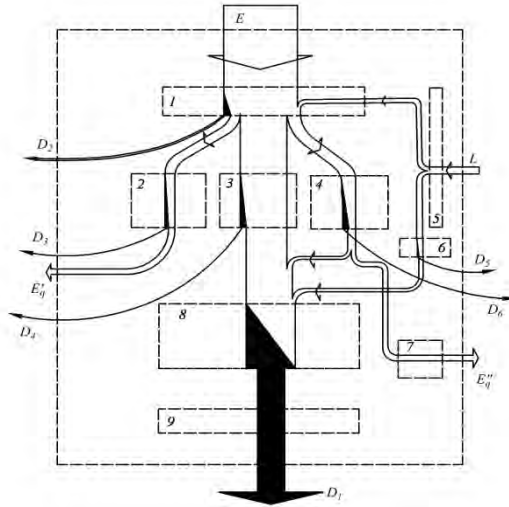


Рис. 2.14. Схема потоков эксергии обеспечения микроклимата здания:
 E_q – потоки эксергии, входящих и уходящих;
 D_i – потери эксергии; L – поток эксергии в форме электроэнергии

Оставшийся поток эксергии делится на три. Один поступает в подсистему вентиляции 3, второй в подсистему отопления 2, а третий – в подсистему горячего водоснабжения 4. В каждой из перечисленных подсистем происходят как внешние, так и внутренние потери эксергии. Внешние потери обусловлены потоками эксергии, удаляемыми с вентиляционными и канализационными стоками. Внутренние потери эксергии вызваны гидравлическими и аэродинамическими сопротивлениями потоков теплоносителей, тепло-массообменом при конечных температурах и сопровождаются рассеиванием ее в воздушный объем здания и формированием микроклимата помещений. Внешние потери эксергии связаны с обменом термодинамической системы с окружающей средой вследствие разности температур и неидеальной тепловой изоляции ограждений.

Поток эксергии в виде электрической энергии частично используется для освещения здания и в последующем рассеивается в воздушный объем здания.

Схема потоков эксергии наглядно показывает качественную картину распределения эксергии между подсистемами и указывает на наличие ее потерь в технической системе.

Пример оценки эффективности обеспечения микроклимата в отопительный период года выполнен для отдельно стоящего здания – кафе на 170 посадочных мест. Расчётная температура наружного воздуха $t_n = -24$ °С. Теплоснабжение здания осуществляется от тепловых сетей с присоединением системы отопления по независимой схеме с температурным графиком 90 –70 °С. Теплоноситель приточных установок вентиляции поступает к калориферам по графику температур 105 – 70 °С. Тепловая мощность системы отопления $Q_{от} = 83255$ Вт, системы вентиляции $Q_{вент} = 159340$ Вт, горячего водоснабжения $Q_{г.в.} = 131210$ Вт. Общая тепловая мощность инженерных систем $Q_{общ} = 375805$ Вт. Установленная мощность электродвигателей перечисленных инженерных систем равна 16632 Вт. Суммарная мощность источников освещения 635 Вт.

Результаты расчёта потоков эксергии, участвующих в обеспечении микроклимата здания, для каждой инженерной системы, сведены в табл. 2.3. Теплопроизводительность систем представлена в кДж отнесённых к часовому промежутку времени.

Таблица 2.3

Результаты расчёта потоков эксергии

Система		Расчённые данные	Эксергетическое число	Эксергия		Анергия	
Наименование	Q , кДж			Е, кДж	%	Д, кДж	%
Отопление	299710	$t_n = 90$ °С $t_o = 70$ °С	0,055	16483	5,5	283216,5	94,5
Вентиляция	573624	$t_n = 105$ °С $t_o = 70$ °С	0,093	53347	9,3	520277	90,7
Горячее водоснабжение	472356	$t_o = 0$ °С	–	–	–	472356	100
Электроосвещение	2286		–	2286	100	–	–
Электродвигатели	59875		–	–	–	59875	100
Итого:				72116	5,35		

Анализ данных таблицы показывает, что из поступающей в здание энергии только 53,5 % составляет эксергию. Остальная энергия используется как анергия и участвует в поддержании микроклимата здания в равновесии с окружающей средой. Электродвигатели вентиляционных установок установлены вне помещений здания.

Схема потоков эксергии, обеспечивающих микроклимат здания показана на рис. 2.15.

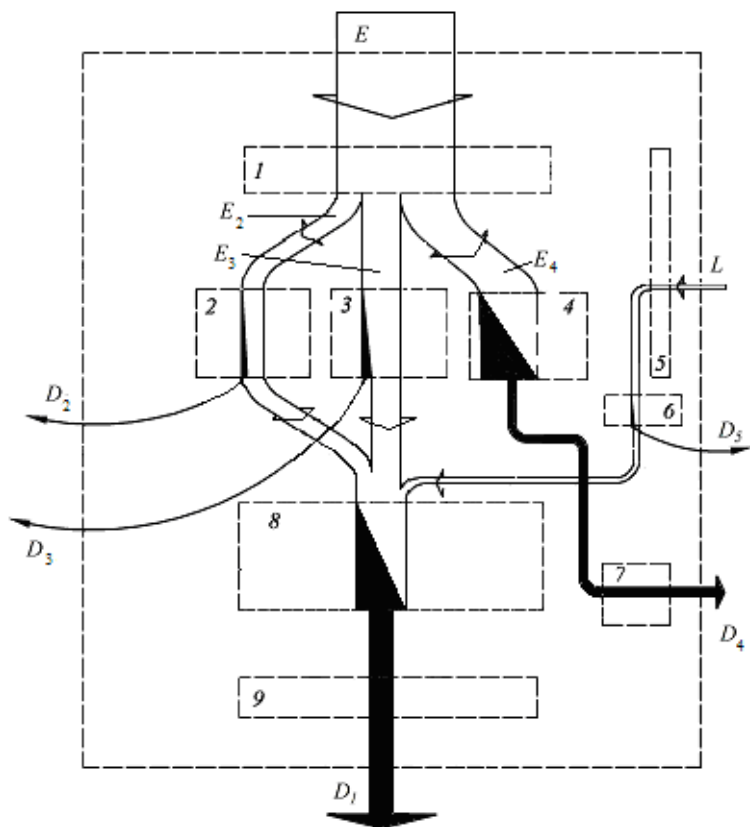


Рис. 2.1. Схема потоков эксергии:

- E – потоки эксергии; D_i – потери эксергии; L – поток электроэнергии
 1– ИТП; 2–система отопления; 3– система вентиляции;
 4– система горячего водоснабжения; 5– система электроснабжения;
 6– система освещения; 7– система канализации; 8– воздушный объем;
 9– ограждающие конструкции

Потоки эксергии определены в пределах температур теплоносителей, указанных в табл. 2.3.

2.9 Энергоэкономичные и энергоактивные здания

Термодинамический анализ потоков теплоты совместно с системным анализом эффективных направлений использования энергии является основанием для разработки проектных решений энергоактивных и энергоэкономичных зданий.

Энергоактивными являются здания, в теплоснабжении которых широко используются нетрадиционные источники энергии.

Энергоэкономичными называют здания, для которых в процессе проектирования, строительства и эксплуатации предусмотрены комплекс мероприятий по эффективному использованию первичных и вторичных источников энергии.

Расходование тепловой энергии в системах инженерного обеспечения зданий различного назначения связано с потреблением первичных энергетических ресурсов, т.е. органических топлив и нетрадиционных возобновляемых источников энергии, а также с потреблением конечной высокоорганизованной, например, электрической энергии, подведенной непосредственно к установкам систем. К сожалению, между научно-обоснованными основами использования энергии и практикой проектирования и строительства зданий и их инженерных систем существует большой разрыв.

Зачастую под энергоэкономичные здания подводят объекты, на которых осуществлено одно или несколько независимых решений по экономии теплоты. Современные здания обладают большими возможностями по повышению тепловой эффективности. Для этого необходимо знание особенностей формирования их теплового и воздушного режимов, умение оптимизировать потоки теплоты и массы, как в помещениях, так и ограждающих конструкциях зданий.

Снижение расхода энергии в системах инженерного обеспечения теплотой зданий базируется на комплексном рассмотрении факторов, определяющих возможности экономии. К этим факторам относятся.

1. Оптимизация в тепловом отношении архитектурно-строительных, светотехнических и технологических решений зданий.
2. Создание и использование более экономичных и совершенных оборудования и систем теплоснабжения и вентиляции.

3. Совершенствование процессов производств, осуществляемых в зданиях и влияющих на энергетические затраты систем обеспечения микроклимата помещений.

4. Утилизация теплоты вентиляционных выбросов и сточных вод в зданиях различного назначения.

5. Более полное использование вторичных тепловых ресурсов промышленных предприятий для удовлетворения потребностей в энергии на нужды отопления, вентиляции и горячего водоснабжения.

6. Широкое использование возобновляемых источников энергии.

При выборе энергосберегающих мероприятий следует применять технологические решения, способствующие улучшению микроклимата помещений и зданий. Качество микроклимата должно выходить на первый план, даже по сравнению с энергосбережением.

Создание энергоэкономичных зданий предполагает как единое целое выполнение следующих задач:

- обеспечение микроклимата помещений;
- тепловую оптимизацию здания как термодинамической системы;
- оптимальное использование возобновляемых источников энергии.

Следует отметить, что в теории и практике строительства разрабатываются различные концепции энергетически эффективных и экологически чистых зданий. Проектируют здания с нулевым использованием энергии, «умные» здания, здания высоких технологий, пассивные здания и т.д. Профессор Ю.А.Табунщиков [2.7] предлагает следующее определение концептуального подхода к созданию зданий XXI века.

Энергоэффективное здание – здание, в котором эффективное использование энергоресурсов достигается за счет применения инновационных решений, которые осуществимы технически, обоснованы экономически, а также приемлемы с экологической и социальной точек зрения и не изменяют привычного образа жизни. К энергоэффективным зданиям могут быть отнесены здания с низким энергопотреблением и здания с нулевым энергопотреблением.

Пассивное здание – здание, в котором предусмотрены специальные мероприятия по применению нетрадиционных (возобновляемых) источников энергии, оказывающих существенное влияние на снижение потребления энергии от традиционных источников.

Принципы пассивного дома: использование нетрадиционных источников энергии (солнца, грунта и т.д.); суперизоляция ограж-

дающих конструкций, утилизация тепла вытяжного воздуха и канализационных стоков; энергопотребление не более 15 Вт/м^2 общей площади.

Предлагаемые принципы более широко трактуют задачи проектирования зданий с учетом архитектурных решений обеспечения микроклимата помещений и экономических требований.

Осуществление указанных принципов возможно на основании положений системного анализа.

Методология системного анализа наиболее часто используется для построения и реализации математических моделей сложных объектов. Данный подход использован в [2.8] для построения математической модели теплового режима здания, состоящей из описания совокупности всех факторов и процессов, определяющих тепловую обстановку в его помещениях. Математические модели позволяют выполнить общий анализ взаимодействия отдельных факторов на макроуровне, уровне систем. Например, анализ математической модели здания позволяет установить влияние наружного климата на ограждающие конструкции, влияние теплового состояния ограждающих конструкций на микроклимат помещений, влияние инженерных систем отопления и вентиляции на ограждающие конструкции и т.д.

Но здания и сооружения состоят не из «единой оболочки». Ограждающие конструкции – это наружные стены, покрытия, чердаки из различных материалов и разной конструкции, оконные заполнения из дерева, пластмасс, металла или композиционных материалов со стеклопакетами и без них, угловые сопряжения стен, стыковые сопряжения панелей, теплопроводные включения и т.д. Каждая из инженерных систем обеспечения микроклимата зданий – это совокупность оборудования, приборов и магистралей, выполняющих разные задачи и имеющих разные функции. Воздушная среда зданий представляет собой смесь неконденсирующихся и конденсирующихся газов, неадекватно ведущих себя при изменении теплового и влажностного режимов помещений. Возможная конденсация водяного пара на поверхности или внутри ограждающих конструкций серьезно ухудшает микроклимат помещений и теплозащитные качества конструкций.

Существует необходимость рассмотрения особенностей проектирования зданий и сооружений не только на макроуровне, но и на

уровне отдельных элементов инженерных систем, ограждающих конструкций, т.е. на микроуровне. Сопряжение оконных блоков с наружными стенами, выполнение стыковых соединений панельных зданий, организация притока и удаления воздуха в помещениях, выбор и установка нагревательных приборов, подготовка воздуха имеют не меньшее значение, чем выбор варианта ограждающей конструкции или инженерных систем. Перечисленные задачи являются как конструктивными, так и теплотехническими. Их рассмотрению посвящены последующие главы работы.

2.10 Выводы

1. Здание или сооружение рассматриваются как единая энергетическая система, элементы которой взаимосвязаны, а режимы эксплуатации определяются наружным климатом и внутренним микроклиматом.

2. Оценка эффективности использования теплоты в зданиях и их инженерных системах основывается на применении полного энергетического баланса, включающего тепловые и эксергетические составляющие материальных потоков. Анализ тепловых поступлений и потерь 72-х квартирного жилого дома показал, что до 70 % подводимой теплоты составляет анергия, удаляемая из помещений, и только до 30 % полезно используемая эксергия.

3. При выполнении анализа работоспособности инженерных систем здания также используется эксергетическая диаграмма Грассмана. На её основании рассмотрено энергообеспечение микроклимата кафе на 170 посадочных мест. результаты анализа показали, что только 53,5 % поступающей в здание энергии используется как эксергия, остальные 46,5 % составляют анергию.

4. Термодинамический анализ является основанием для разработки проектных решений энергоэкономичных, энергоактивных и пассивных зданий.

Литература к главе 2

2.1 Таубман. Е.И. Анализ и синтез теплотехнических систем / Е.И.Таубман. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 173 с.

2.2 Шаргут Я. Эксергия / Я.Шаргут, Р.Петела М.: Энергия, 1968. – 280 с.

2.3 Бродянский В.М., Эксергетический метод термодинамического анализа. / В.М.Бродянский, М.: Энергия, 1973. – 295 с.

2.4 Степанов В.С. Анализ энергетического совершенства технологических процессов / В.С.Степанов, Новосибирск: Наука, 1984. – 140 с.

2.5 Протасевич А.М. Термодинамический анализ эффективности использования теплоты в системах инженерного обеспечения микроклимата зданий. / А.М. Протасевич В сб. «Энергосберегающие установки отопления, вентиляции и кондиционирования», Ростов-на-Дону: РИСИ, 1989. – С. 80-85.

2.6 Протасевич А.М. Энергосбережение в системах теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха / А.М.Протасевич // Учебное пособие. Минск: Новое знание, 2012. – 285 с.

2.7 Табунщиков Ю.А. Строительные концепции зданий XXI века в области теплоснабжения и климатизации/ Ю.А.Табунщиков // АВОК. №4, 2005, С. 4-8.

2.8 Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач //М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – С.194.

2.9. Кулик М.Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях/ М.Н.Кулик – Киев: Наукова думка. 1987. – 200 с.

ГЛАВА 3. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЙ, ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ЗДАНИЙ

3.1 Общие положения

Планирование и разработка мероприятий по энергосбережению основывается на наличии исходной информации о техническом состоянии зданий и их инженерных систем. В процессе эксплуатации проектные решения объектов претерпевают изменения, и получить достоверные сведения об их состоянии можно только путем проведения целенаправленных экспериментальных исследований или наблюдений по приборам контроля.

При выполнении обследований инженерных систем в изучении микроклимата помещений, принято ориентироваться на методические разработки и рекомендации нормативных документов, действующих на момент их проведения. Такой подход не всегда позволяет получить исчерпывающую информацию, необходимую для принятия решений по разработке и проектированию энергосберегающих мероприятий, оценке ограждающих конструкции или систем ОВК. Поэтому для решения сложных задач, требующих глубокой и систематизированной информации, используются специально разработанные методики проведения аналитических или экспериментальных исследований.

Необходимо отметить, что в странах СНГ сохранены научные традиции, созданные в СССР по экспериментальному исследованию теплового режима, микроклимата и показателей экологической безопасности жилых зданий. Экспериментальные школы МИСИ (В.Н. Богословский), ЦНИИЭП жилища (Б.Ф. Васильев, И.С. Шаповалов), НИИМосстрой (Р.Е. Бриллинг, К.Ф. Фокин), МНИИТЭП (М.М. Грудинский), НИИСФ (П.Н. Умняков, С.И. Пермяков), БПИ Минск (Э.Х. Одельский, М.Т. Солдаткин) и др. создали базу которая и на современном уровне позволяет выполнять работы по разработке мероприятий по энергосбережению в зданиях и сооружениях.

Эксплуатация зданий, как вновь построенных, так и ранней постройки, сопровождается появлением дефектов, связанных с нарушениями микроклимата помещений, с изменением параметров од-

ной из инженерных систем, либо изъянами ограждающих конструкций. Но чаще всего дефекты вызваны комплексом проблем. Поэтому выяснение причин их появления следует проводить путем одновременного обследования – ограждающих конструкций, систем вентиляции и отопления и измерением параметров воздушной среды. При этом, натурные исследования практически всегда сопровождаются анализом данных снимаемых непрерывно в процессе эксплуатации инженерных систем зданий с использованием приборов учета расходов и параметров теплоносителей, а также теплоты, установленных в ИТП.

Для выполнения экспериментальных исследований и измерений в первую очередь следует использовать оборудование и приборы, внесенные в «Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь», раздел «Средства измерений допущенные к применению на территории Республики Беларусь» или реестр средств измерений каждой из стран СНГ.

Экспериментальные исследования позволяют получить объективные показатели состояния микроклимата помещений и экологической безопасности жилых и общественных зданий.

Введение в действие новой нормативной базы, включающей стандарты, технические кодексы установившейся практики (ТКП), составление энергетических паспортов зданий, инициировало проведение комплексного энергетического обследования зданий – энергоаудита.

3.2 Энергетическое обследование зданий

Энергоаудит здания представляет систему мероприятий, направленных на определение эффективности использования энергии. Его цель в конкретных условиях эксплуатации дать оценку использования энергии, учитывая затраты на теплоту, электроэнергию и разнообразные энергоносители. Энергоаудит можно также рассматривать как часть экспертизы здания по выявлению технического состояния и связанной с ним эффективности потребления энергии.

Завершается энергоаудит составлением отчета и энергетического паспорта дома, который становится обязательным документом. В паспорте приводятся сведения о классе энергоэффективности объекта и даются рекомендации по его эксплуатации. Отчет по энерго-

аудиту служит основой для реализации энергосберегающих мероприятий.

Развитие энергоаудита в странах СНГ основывается на использовании европейского опыта. Согласно Европейских Директив (Законов) повышение энергоэффективности в зданиях – это повышение эффективности использования энергии у конечного потребителя в результате технологических, организационных и экономических изменений.

Основными документами при проведении энергетических аудитов в зданиях в странах Европы являются Директива ЕС 2002/91/ЕС «Энергетические характеристики зданий» и Директива ЕС 2006/32/ЕС «Эффективность и энергоуслуги у конечных потребителей». [Выполнение норм, прописанных в Директивах, является обязательным во всех странах союза].

В перечисленных законах установлены общие принципы методологии расчета энергетической эффективности зданий, применимость требований к энергетической эффективности для новых зданий и зданий при реконструкции, энергетической сертификации зданий, регулярной инспекции генераторов теплоты и установок кондиционирования воздуха.

Большое внимание в документах ЕС уделяется улучшению микроклимата помещений и разработке новых более совершенных технологий и оборудования для его обеспечения на базе сертифицированной высококачественной продукции.

Следует подчеркнуть, что энергоаудит не является самоцелью, а выполняет определенные функции в проекте по энергосбережению в здании. Процесс осуществляется пошагово и имеет ряд основных этапов:

- сбор информации;
- определение рентабельности энергоэффективных мероприятий, оценка необходимых инвестиций и ожидаемого срока окупаемости;
- проведение энергоаудита;
- разработка бизнес-плана;
- реализация мероприятий;
- эксплуатация здания.

Большое внимание должно уделяться контролю качества выполнения работ по реализации энергосберегающих мероприятий и обучению персонала обслуживанию оборудования и последующей экс-

плутации систем и здания. Все работы по проекту выполняются в соответствии с требованиями по качеству, законодательными требованиями и нормативами.

Непосредственно сам энергоаудит включает оценку и анализ всех энергетических затрат и энергопотребления оборудования в здании, в том числе систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, горячего водоснабжения, ограждающих конструкций, освещения, а также состояние технического обслуживания и обученности персонала. В перечень работ по энергоаудиту жилых и общественных зданий входит измерение производительности установок систем ОВК, отопительных котлов, распределительных трубопроводов и воздуховодов, оценка уровня автоматизации систем управления и др. систем. Каждое здание уникально, поэтому каждый объект должен рассматриваться индивидуально, чтобы определить специфические возможности повышения энергоэффективности. Даже построенные по одинаковым проектам дома всегда отличаются своими инженерными системами и, особенно, – условиями эксплуатации.

Энергоаудит зданий следует начинать с изучения проекта систем ОВК, горячего водоснабжения, режима эксплуатации здания и его инженерных систем, обмера наружных ограждающих конструкций здания, установления их теплотехнических характеристик (из проекта, путем расчета или натурных измерений). Далее на основании этих данных выполняется расчет теплопотерь наружными ограждениями здания; по фактически измеренной производительности вентиляторов и теплоотдачи калориферов определяется расход теплоты на вентиляцию и отопление, по водосчетчикам на горячей воде – на горячее водоснабжение, и затем – суммарный расчетный расход тепловой энергии на здание (при расчетной температуре наружного воздуха на отопление).

Зная режим эксплуатации здания, следует расчетным путем установить требуемое, для фактической средней за отопительный период наружной температуре, количество тепловой энергии на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение и сравнить его с измеренным по теплосчетчику. И только на основании этого сравнения следует делать выводы о возможном снижении теплопотребления и сформулировать мероприятия по реализации такого снижения.

Оборудование и приборы, используемые для проведения энергоаудита, представляют собой комплекс измерительных средств, которые должны соответствовать следующим требованиям:

- портативностью и защищенностью (вес – в пределах 15 кг, обязательное наличие защитного чехла или защищенного прочного корпуса);

- возможностью автономной работы, что предполагает использование встроенного источника питания, позволяющего использовать устройство для нужд энергоаудита в течение нескольких часов или дней;

- возможностью осуществлять регистрацию данных: для этого необходимо наличие установленного запоминающего устройства, либо же унифицированного выхода, позволяющего подключать внешние запоминающие устройства;

- возможностью связи с компьютером, т.е. наличие соответствующего порта и программного обеспечения, дающего возможность передавать данные на ПК.

При проведении энергетического обследования с использованием измерительных устройств необходимо располагать оборудованием, позволяющим выполнить оценку:

- расходов жидкости и газа;
- мощности тепловых потоков;
- температуры при контактном способе измерения;
- температуры при визуальном бесконтактном ИК-измерении;
- наличия возможных течей.

Одним из инструментов энергоаудита служит съемка в ИК-лучах. С помощью её выполняется качественная оценка интенсивности переноса теплоты через участки ограждающих конструкций зданий.

3.3 Измерение параметров микроклимата и воздухообменов помещений

Показатели микроклимата помещений жилых и общественных зданий определяются в соответствии с требованиями ГОСТ 30484-96 [3.1]. Санитарно-гигиенические характеристики воздушной среды закрытых помещений, включающие метеорологические параметры воздуха - температуру, относительную влажность и подвижность,

газовый состав и чистоту воздуха, определяются в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005-88 [3.2].

Для измерения основных параметров микроклимата и санитарно-гигиенических характеристик воздушной среды при ручной регистрации используются метеорологические термометры, психрометры, термощупы, анемометры. Относительную влажность и температуру воздуха измеряют с помощью психрометра.

При проведении обследований наиболее часто используется аспирационный психрометр Ассмана. Он состоит из двух одинаковых метеорологических ртутных термометров, закрепленных в специальной оправе. Резервуар правого термометра обернут батистом в один слой и перед работой смачивается дистиллированной водой при помощи пипетки.

Аспирационный психрометр Ассмана дает точные и устойчивые показания, так как оба термометра (сухой и влажный) обдуваются воздухом с постоянной скоростью, защищены от лучистого потока теплоты и влияния внешних потоков воздуха.

Результирующую температуру в помещении измеряют шаровым термометром.

Исследования вентиляционных систем зданий и сооружений следует выполнять в соответствии с требованиями ГОСТ 12.3.018-79 [3.3]. Данный стандарт устанавливает методы измерений и обработки результатов при проведении испытаний вентиляционных систем и их элементов для определения расходов воздуха и потерь давления.

Измерение скорости воздушного потока необходимо для оценки его подвижности в помещениях и определения объемов воздуха, подаваемых приточными системами и удаляемых вытяжными. Наиболее распространёнными измерительными приборами являются крыльчатые анемометры, позволяющие выполнять измерения в диапазоне скоростей от 0,1...5 м/с. В экспериментальных исследованиях находят применение и термоанемометры, использующие эффект охлаждения чувствительного датчика при обдуве его воздухом.

В воздуховодах, а также на аэродинамических стендах, при проведении исследований на моделях, скорость воздуха может быть определена с использованием пневмометрических трубок, измеряющих величину динамического давления, и микроманометра.

Эффективность работы систем вентиляции проверяется и при помощи современных диагностических инструментов, к которым

относятся многофункциональные тестеры качества воздуха помещений, в том числе и на наличие CO₂, измерители потоков воздуха, инструменты для обнаружения неисправностей вентиляционного оборудования и др. Современные приборы позволяют постоянно регистрировать и обрабатывать большие объемы данных на базе использования цифровых технологий.

Поставляемое с измерительными приборами программное обеспечение значительно упрощает процесс обработки и управления данными. Иерархические данные можно перенести из портативного прибора на компьютер для дальнейшей обработки. Затем на компьютере можно создавать протоколы, таблицы, графики, в которые могут быть включены сведения о проведении измерений, даты, временные характеристики, зарегистрированные величины и другая информация.

Определение в натуральных условиях воздухообменов в квартирах жилых домов проводится при разности температур воздуха $t_v - t_n \geq 13$ °С. В программу работ могут быть включены исследования по:

- оценке воздухопроницаемости оконных заполнений;
- оценке воздухопроницаемости внутренних ограждающих конструкций;
- оценке эффективности приточно-вытяжной или вытяжной вентиляции.

При проведении испытаний естественной вытяжной вентиляции жилых зданий основное внимание обращают на следующие показатели:

- на герметичность каналов и воздуховодов по вертикали;
- на соответствие характеристики сопротивления сети или отдельных её участков расчетным значениям;
- на соответствие удаляемых объемов воздуха из квартир нормативным требованиям;
- на состояние приёмных жалюзийных решёток.

При испытаниях вентиляционных систем с механическим побуждением перемещения воздуха программы работ составляются индивидуально для каждого объекта в зависимости от их технического состояния и задач исследований.

3.4 Оценка теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий

3.4.1 Общие сведения

Основной характеристикой наружных ограждающих конструкций, определяющей их теплозащитные качества, является приведенное сопротивление теплопередаче.

Оценка теплозащитных качеств ограждений или определение их действительных приведенных характеристик выполняется с использованием методов бесконтактного теплового контроля и контактных методов измерений.

В основе бесконтактного метода диагностики теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций лежит тепловизионный метод, позволяющий регистрировать температурные поля наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции.

Посредством тепловизионной аппаратуры производится регистрация температурного поля поверхности контролируемого объекта и запись соответствующего видеоизображения в ЭВМ. Далее видеоизображение обрабатывается по специальным программам с целью получения ИК- снимков (термограмм) поверхностей ограждений. Анализ температурных полей лучше выполнять при использовании цветных термограмм. Цветное изображение более наглядно при документировании результатов исследований и при оценке тепловых аномалий.

ИК- снимки могут быть использованы для:

- качественной оценки температурных полей ограждений с анализом тепловых аномалий;
- выбора участков поверхностей для проведения контактных измерений сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций;
- качественного обнаружения дефектов ограждающих конструкций зданий.

В странах Европы и США приняты стандарты по использованию тепловизионной съемки в строительстве, а её применение во многих случаях при обследовании зданий обязательно.

Примером использования ИК-снимков для нахождения дефектов ограждений может служить методика представленная в ISO 6781.

Для привязки тепловой обстановки на внешней и внутренней поверхностях контролируемой ограждающей конструкции в процессе измерения температурного поля вводятся N реперных точек.

В реперных точках осуществляется мгновенное (в момент времени τ_1 проведения тепловизионного обследования) измерение температуры на внутренней и наружной поверхностях. Измерение температур проводится как тепловизионным способом, так и контактным (термопарами, термосопротивлениями и т.п.). При соблюдении методики исследований, измеренные контактным способом температуры не должны существенно отличаться от значений, полученных тепловизионным методом.

3.4.2 Поверхностные температурные поля ограждающих конструкций зданий в ИК-лучах спектра излучения

Инфракрасная (ИК) термография или тепловидение представляет собой метод регистрирующего обследования температурных полей поверхности ограждений зданий. Электромагнитное тепловое (инфракрасное) излучение возникает в твердых телах, жидкостях и газах вследствие колебаний атомов в кристаллической решетке или вращательно-колебательного движения молекул. ИК-излучение занимает диапазон электромагнитного спектра с длинами волн 0,8 – 1000 мкм. Возникновение теплового излучения определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела. Природа тепловых лучей та же, что и световых. Поэтому законы распространения, отражения и преломления, установленные для световых лучей, справедливы и могут быть использованы и для тепловых.

Диапазон ИК- излучения принято дополнительно разбивать на отдельные участки. ИК-спектр разделяют на коротковолновой участок с длиной волны 0,8 до 1,4 мкм, средневолновой – 1,4 до 3 мкм и длинноволновой – от 3 до 1000 мкм. В инженерном тепловидении терминами «коротковолновой» и «длинноволновой» участки спектра обычно обозначают диапазоны 3,5 – 6,5 мкм и 7 – 14 мкм, что связано с особенностью используемой аппаратуры.

Типовая схема контроля ограждающих конструкций здания в ИК- лучах показана на рис. 3.1.

Поскольку здания всегда находятся в окружении других зданий или физических тел, то поток излучения, регистрируемый тепловизио-

ром, складывается из потока излучения собственно участка конструкции здания, части потока излучения окружающей среды и сторонних объектов, отраженных от объекта контроля. Помимо этого в объектив тепловизора попадает также прямое излучение внутренних элементов его, в том числе и приемника излучения. Собственное излучение тепловизора учитывается при его калибровке по эталонным источникам, представляющим модели черного тела.

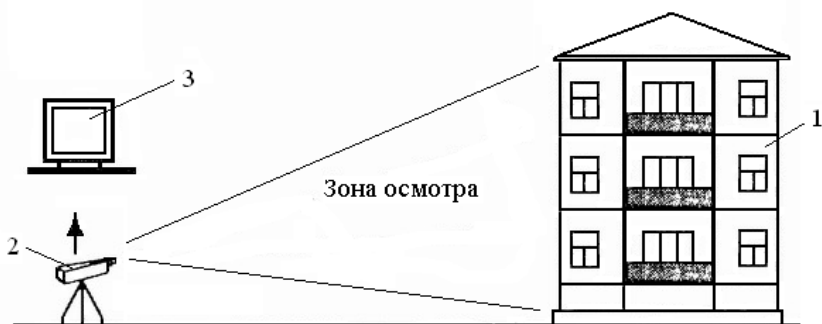


Рис. 3.1. Схема контроля строительных конструкций здания в ИК-лучах:
1 – объект обследования; 2 – тепловизор; 3 – компьютер

Поэтому градуировка тепловизора полностью справедлива при визировании со степенью черноты $\varepsilon = 1$. При обследовании реальных объектов показания тепловизора зависят не только от температуры на поверхности ограждений, но и от ее излучательных свойств. В табл. 3.1 приведены величины степени черноты некоторых строительных материалов, которые следует учитывать при проведении тепловизионной съемки.

Степень черноты строительных материалов, рекомендуемые фирмой FLIR Systems (США), для использования при выполнении ИК-съемки зданий и сооружений для различных спектральных диапазонов, представлены в табл. 3.2 [3.5].

Таблица 3.1

Степень черноты полного нормального излучения
для различных материалов

Материал	t, °C	Степень черноты, ε
1	2	3
Бетон	20	0,84...0,95
Гипс	20	0,8...0,9
Глина обожженная	20	0,91
Дерево:		
строганное	20	0,8...0,9
белое сырое	20	0,7...0,8
шлифованное (полированное)	20	0,5...0,7
Кирпич красный шероховатый	20	0,86...0,93
Кирпичная кладка оштукатуренная	20	0,94
Кирпич шамотный	20...1100	0,75...0,95
Краска масляная (любого цвета)	20...100	0,92...0,96
Лак:		
черный матовый	20...95	0,96...0,98
белый	20...95	0,8...0,96
Мрамор сероватый полированный	22	0,93
Рубероид	20	0,93
Стекло матовое	20	0,96
Стекло	22	0,937
Штукатурка	10...88	0,91
Асбестоцементная плита	24	0,92...0,96
Асбестовая бумага	40...370	0,93...0,94
Алюминиевые краски различной давности и с переменным содержанием <i>A</i> /	20...100	0,27...0,67
Алюминиевый лак по шероховатой пластине	20	0,39
Обои	20	0,90

Окончание табл. 3.1

1	2	3
Оцинкованное листовое железо блестящее	28	0,228
Оцинкованное листовое железо серое, окисленное	24	0,276
Толь	21	0,910
Фарфор глазурованный	22	0,924

Таблица 3.2

Степень черноты строительных материалов, рекомендуемые фирмой FLIR Systems (AGEMA Infrared Systems) для различных спектральных диапазонов

Материал	t, °C	Степень черноты, ε
1	2	3
Алюминий	КВ*	0,83...0,94
Асбест	КВ	0,96
Кирпич:		
обычный	КВ	0,81...0,86
красный	КВ	0,90
Бетон сухой	5	0,95
Замерзшая почва	ДВ*	0,93
Стекло	5	0,97
Гранит, естественная поверхность	5	0,96
Гравий	ДА	0,8
Железо	КВ	0,91...0,96
Известняк	5	0,96
Известь	КВ	0,87
Пластик:		
черный	КВ	0,95
белый	КВ	0,84
Картон	5	0,81
Штукатурка	КВ	0,86...0,90

Окончание табл. 3.2

1	2	3
Фанера	КВ	0,83...0,98
Полипропилен	КВ	0,97
Резина	5	0,97
Обои (легкий рисунок)	КВ	0,90

*КВ = 2,0...2,5 мкм; ДВ = 6,5...20,0 мкм

Влияние степени черноты на результаты термографирования объектов двояко. Во-первых, отсутствие информации о его истинном значении делает невозможным точное измерение температуры, причем погрешность определения температуры Δt тем выше, чем больше неопределенность значения ε . При качественном обследовании зданий точное значение степени черноты как правило, необязательно, но изменения ее по поверхности контроля могут привести к появлению ложных сигналов, которые могут быть приняты за дефекты.

Во-вторых, температура объекта обследований и степень черноты сложным образом воздействуют на вид термограмм (ИК- снимков), что затрудняет их интерпретацию в шкале температур. Связь приращений температур и степени черноты следует из законов теплового излучения. По закону Стефана-Больцмана, в его интерпретации для серых тел, справедливо отношение

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}, \quad (3.1)$$

где T – абсолютная температура тела, К.

Из данного соотношения следует, что если на участке поверхности стены здания из кирпича укрытого минеральной штукатуркой со средней степенью черноты $\varepsilon = 0,94$ имеют место изменения степени черноты на $\Delta \varepsilon = \pm 0,02$, то термографирование ее при $T = 293$ К даст изменения температуры $\Delta T = \pm 1,56$ К. Эта величина превышает паспортную чувствительность современных тепловизоров 0,01...0,05 °С [3.5, 3.6].

Для увеличения точности измерений современная тепловизионная аппаратура, используемая для обследования зданий и сооруже-

ний, выполняется двухволновой, имеющей каналы коротковолнового 3,5...5 мкм и длинноволнового 8...14 мкм излучения. Отношение сигнала в двух каналах используется для снижения влияния излучательной способности тел на температурные измерения, но полностью исключить его не могут.

В инженерной практике находят применение более сотни моделей тепловизоров российских, украинских, европейских, американских, китайских и японских фирм различного класса. Для выполнения ИК- съемки ограждающих конструкций зданий наиболее подходит тепловизор ИРТИС-2000 российского производства. Он характеризуется высокой чувствительностью 0,05 °С и хорошим пространственным разрешением вследствие малой скорости сканирования объекта и применения фотоприемника охлаждаемого жидким азотом. ИРТИС-2000 – двухволновой прибор со спектральными диапазонами 3...15 и 8...12 мкм.

Для диагностики и научных исследований применимы модели ThermalCam E2 или ThermalCam SC 3000 (США), ряд приборов фирмы CEDIP (Франция) и других производителей.

В качестве переносных электронных средств диагностики в промышленности и строительстве можно использовать тепловизоры и пирометры корпорации Fluke Corporation или аналогичные приборы других фирм.

3.4.3 Методические особенности термографирования ограждающих конструкций зданий

Исследование температурных полей как прозрачных, так и не прозрачных конструкций в период эксплуатации зданий при низких температурах наружного воздуха основывается на подтверждении или отрицании соответствия их теплозащитных характеристик требованиям нормативных документов. Требования по выполнению измерений температурных полей изложены в ГОСТ 26629-85 [3.7].

Исследование ограждающих конструкций в ИК- лучах позволяет контролировать тепловой режим всей конструкции, а не отдельных ее точек. Это помогает уменьшить количество контактных измерений, корректно выбирать места установки датчиков тепловых потоков и температуры и, в конечном счете, выполнить расчет сопро-

тивления теплопередаче локального участка или приведенного сопротивления теплопередаче конструкции.

При обследовании откосов оконных заполнений или угловых сопряжений ограждений искомой величиной является температура на их поверхности. А критерием оценки – сопоставление измеренных температур с температурой точки росы при условиях микроклимата, установившегося в помещениях в период проведения обследования, или при расчетных условиях.

Формирование температурного поля внешней поверхности ограждающей конструкции происходит под влиянием процессов нестационарной теплопроводности. Нестационарная теплопроводность обусловлена постоянно меняющейся тепловой обстановкой вокруг ограждающей конструкции: изменением температуры внешней среды, коэффициента теплоотдачи, значение которого сильно зависит от скорости и направления ветра, и т.п.

Результаты определения температурных полей в ИК-лучах во многом зависят от условий обследования, к которым относятся: перепад температур воздуха внутри помещений и наружного воздуха, степень черноты и увлажнения поверхностей ограждений, облученность ограждений солнцем и т.д. Поэтому при исследовании температурных полей поверхностей ограждений необходимо стремиться к сведению негативных воздействий внешних факторов к минимуму. Например, проводить ИК-съемку в ночное время, обследовать объекты, не подвергающиеся в течение 8...10 часов солнечному облучению.

Снимки, выполненные в ИК-лучах, являются результатом обследования поверхностей ограждений за короткий промежуток времени. Они фиксируют картину температурного поля поверхности на момент проведения съемки без учета характера развития теплового режима ограждений. Поэтому они не могут быть использованы для выполнения расчетов с применением методики стационарного теплового режима, так как не подтверждают стационарность температурного поля всего ограждения на период измерений.

Тепловизионное обследование объекта должно сопровождаться его фотосъемкой, что позволяет, оценить состояние поверхности ограждений на момент проведения ИК-съемки при анализе её результатов. Существуют технологии выполнения съёмки ограждающих конструкций и инженерного оборудования зданий, в основу которых положено наложение инфракрасного изображения на видимое. Совмещение двух

изображений в одно позволяет получить на экране тепловизора или на снимке картину, по которой легко выполнить анализ состояния объекта исследования. К указанному приёму выполнения съёмки относится, например, технология IR-Fusion.

Обработка результатов обследований основана на качественном и количественном анализе температурных полей поверхностей ограждающих конструкций и других вспомогательных параметров, описывающих окружающую среду и особенности проведения контроля.

Качественный анализ применяют для оперативного визуального контроля и анализа состояния ограждающих конструкций по их температурным полям. По тепловым изображениям устанавливают зоны тепловых аномалий, а по дополнительным сведениям о конструкциях и узлах ограждений, делают выводы о строительных или архитектурных дефектах.

Количественный анализ может быть абсолютным и относительным. При абсолютном количественном анализе определяют значения температур. При относительном количественном анализе определяют отношение теплотехнических характеристик, например, температур в исследуемых зонах к соответствующим значениям в эталонных зонах (реперных точках).

В инженерной практике в последние годы наметилась тенденция использования результатов тепловизионной съёмки в количественной оценке теплотехнических характеристик ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий. В работе [3.8] представлена методика обследования и интерпретации результатов наружной тепловизионной съёмки и измерений, выполненных в реперных точках, для оценки величин тепловых потерь и теплотехнических характеристик ограждающих конструкций. Особое внимание в методике обращено на отсутствие необходимости выполнения ИК-съёмки и контактных измерений со стороны помещений.

Разработка предложенного метода обследования основывается на решении обратной задачи теплопроводности для ограждающих конструкций по регистрируемым температурам на их наружной поверхности в нестационарных условиях. Но при этом, кроме ИК-съёмки, обязательно выполнение контактных измерений тепловых потоков и температур в реперных точках на поверхности ограждений.

Отличительной особенностью методики тепловизионной диагностики наружных ограждающих конструкций, изложенной в [3.9],

является включение в алгоритм тепловизионного обследования сравнительного анализа результатов полученных при ИК-съёмке и результатов расчета температурных полей этих же конструкций по программе «TEMPER-3D».

Данная методика применяется при проведении тепловизионной диагностики зданий и сооружений в Красноярском крае РФ для оценки теплотехнических особенностей узлов сопряжения ограждающих конструкций в панельных и монолитных зданиях.

Следует отметить, что по методикам [3.8, 3.9] выполняется относительная количественная оценка теплозащитных качеств ограждающих конструкций и они достаточно трудоемки.

3.5 Определение сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий

3.5.1 Исследования в натуральных условиях

Одной из задач обеспечения энергоэффективности жилых зданий является связь между проектными решениями и их реализацией в процессе строительства. Сопротивление теплопередаче наружных ограждений здания определяется расчетом на основании сертификационных величин коэффициентов теплопроводности материалов, в том числе и теплоизоляционных, величины коэффициента теплотехнической однородности стен с учетом крепления утеплителя, теплоизоляции оконных проемов и т.д. В условиях эксплуатации расчетные величины сопротивления теплопередаче ограждений могут не соответствовать реальным. А это вызывает изменение фактического удельного показателя энергоэффективности здания и других его теплоэнергетических показателей.

Определение сопротивления теплопередаче представляет обратную задачу технической диагностики, которая решается измерением теплового потока через ограждающие конструкции контактным методом при наличии перепада температур между внутренним и наружным воздухом.

Используемая для этих исследований нормативная база [3.10] требует продолжительного, не менее 1...3 суток, определения экспериментальных величин, и является наиболее достоверной.

Следует отметить, что по данной проблеме во всех развитых странах ведется работа по оптимизации нормативной базы, разработке современных методик исследований по определению коэффициентов теплопередачи или сопротивления теплопередаче в натурных условиях. Например, в странах СНГ предложен метод калориметрического определения коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций зданий и сооружений [3.11].

По данному методу искусственно моделируется стационарное состояние участка наружной стены с использованием электрического калориметра – нагревателя. Это значительно усложняет методику исследований и вносит искажение в формирование теплового режима наружных ограждений зданий. Предлагаемый метод больше подходит для стендовых исследований в климатических камерах.

Проведение контактных измерений по [3.10] связано с установкой на поверхностях ограждений датчиков тепловых потоков и температур воздуха, объединенных в единую схему измерений. Именно контактные измерения позволяют определить искомую величину контроля – сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций « R_T » по уравнению стационарной теплопередачи

$$R_T = \frac{\bar{t}_в - \bar{t}_н}{\bar{q}}, \quad (3.2)$$

где \bar{q} – средняя удельная мощность теплового потока за период измерения, Вт/м²;

$\bar{t}_в, \bar{t}_н$ – соответственно средние температуры внутреннего и наружного воздуха за период измерения, °С;

$R_T = 1/K$ – сопротивление теплопередаче, м²°С/Вт;

K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²°С).

Контактные измерения проводятся на участках термически однородных зон ограждений, вне стыков и примыканий конструктивных элементов.

Одним из факторов, влияющим на точность определения сопротивления теплопередаче является стационарность распределения температур по сечению ограждения в период проведения измерений. Обеспечение стационарного режима определяется инерцион-

ностью конструкции – способностью сохранять температуру на поверхности ограждений, связанную с начальными условиями и изменениями параметров окружающей среды. А способность реагировать на колебания температур характеризуется теплоустойчивостью наружного ограждения. Чем меньше изменение температуры внутренней поверхности ограждения при одной и той же амплитуде колебания температур воздуха, тем оно более теплоустойчиво.

Стационарность температурного поля в процессе измерений следует оценивать по изменению температур по сечению ограждений или на их поверхностях. Выполнение указанной задачи осуществляется на основании аналитического изучения теплового режима ограждений или экспериментальным путем.

3.5.2 Аналитический подход к оценке теплового режима ограждающих конструкций

Аналитическая оценка стационарности теплового режима основывается на теории теплоустойчивости ограждающих конструкций [3.12...3.14]. Здания подвергаются тепловым воздействиям, которые можно разделить на периодически повторяющиеся и разовые. Теория теплоустойчивости рассматривает повторяющиеся тепловые воздействия гармонического вида на поверхностях ограждений (граничные условия). При наличии их в ограждении устанавливается тепловой режим, который в строительной теплофизике определяют как «квазистационарный».

Аналитическое решение, для случая нестационарной теплопередачи через ограждение, когда температура наружного воздуха изменяется, а температура воздуха внутри помещений постоянна, основанно на теории Власова - Муромова – Шкловера и представлено в [3.14, 3.15]. Графическая интерпретация затухания температурных колебаний в ограждении показанна на рис. 3.2.

На основании решения задачи о передаче температурных колебаний через многослойную стену при граничных условиях 3 рода на поверхностях её и 4 рода на стыках между слоями получено уравнение для определения температуры на внутренней поверхности ограждения, $t_{вп}$, °С.

$$t_{en} = t_{eo} + \frac{A_{in}}{\nu} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot \tau - \varepsilon, \quad (3.3)$$

где t_{eo} – среднее за период значение температуры на внутренней поверхности ограждений, °С;

A_{in} – амплитуда колебания температуры наружного воздуха, °С;

τ – время, ч;

ν – показатель сквозного затухания многослойного ограждения;

ε – запаздывание сквозного проникновения колебаний во времени, ч.

Величины, входящие в уравнение (3.3) рассчитываются по зависимостям, полученным из анализа развития теплового режима ограждающей конструкции. Неизвестными являются t_{eo} , ν и ε . Средние значения t_n и t_e находятся по результатам измерений за определенный промежуток времени или принимаются по [3.16...3.18].

Колебания температуры наружного воздуха вызывают изменения тепловых потоков и температуры на поверхности и в толще ограждения. Эти изменения можно определить как правильные гармонические колебания с периодом T (рис. 3.2).

Амплитуды колебаний температуры в толще ограждения уменьшаются по мере удаления от наружной поверхности. На некотором расстоянии в произвольном сечении n ограждения величина амплитуды A_{in} изменения температуры t_n будет в ν_n раз меньше A_{in} :

$$\nu_n = \frac{A_{in}}{A_{in}} \quad (3.4)$$

где ν_n – коэффициент затухания в сечении « n ».

Показатель сквозного затухания многослойного ограждения можно определить в виде произведения:

$$\nu = \nu_1 \dots \nu_1 \nu_2 \dots \nu_n \dots \nu_k, \quad (3.5)$$

где ν_n – показатель затухания при переходе от наружного воздуха к наружной поверхности ограждения;

$\nu_1, \nu_2 \dots \nu_n$ – то же, в отдельных слоях ограждения;

ν_k – то же, в последнем слое ограждения, граничащем с внутренним воздухом.

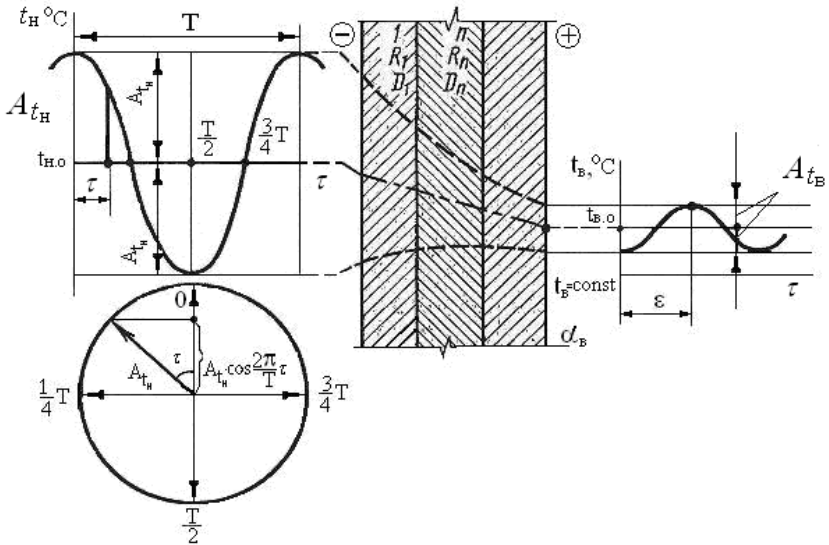


Рис. 3.2. Затухание температурных колебаний в ограждении

Показатель затухания ν_n рассчитывают по формуле:

$$\nu_n = 1 + Y_1 R_B, \quad (3.6)$$

где R_B – сопротивление теплообмену на наружной поверхности, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$;

Y_1 – коэффициент теплоусвоения наружной поверхности ограждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$.

Для произвольного сечения n в толще ограждения ν_n равно

$$\nu_n = e^{\frac{R_n S_n}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{S_n + Y_{n+1}}{S_n + Y_n}, \quad (3.7)$$

где R_n и S_n – сопротивление теплопроводности слоя n и удельный коэффициент теплоусвоения материала этого слоя, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$ и $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$;

Y_n, Y_{n+1} – коэффициенты теплоусвоения поверхностей слоев n и $n + 1$ (со стороны движения волны), Вт/(м²°С).

Когда слой n «толстый», т.е. $R_n S_n > 1$, то $Y_n = S_n$ и формула принимает вид

$$v_n = e^{\frac{R_n S_n}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{Y_{n+1}}{S_n} \right). \quad (3.8)$$

Для прикидочных расчетов формула (3.8) может быть записана

$$v_n \approx 2^{D_n} \quad (3.9)$$

Для последнего по ходу волны слоя граничащего с внутренним воздухом, v_k равен

$$v_k = e^{\frac{R_k S_k}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{S_k + \alpha_e}{S_k + Y_k} \quad (3.10)$$

Коэффициенты теплоусвоения поверхностей слоёв конструкции рассчитывают по зависимостям, определяющим теплоустойчивость ограждающих конструкций для стационарного теплового режима. Она характеризуется коэффициентом, представляющим отношение разности температур внутреннего и наружного воздуха к максимальной разности температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности ограждения $t_{в.н.}^{min}$.

$$\psi = \frac{t_e - t_n}{t_e - t_{в.н.}^{min}} \quad (3.11)$$

Определение коэффициента ψ выполняется по формуле, предложенной О.Е. Власовым [3.12].

$$\psi = \frac{R_T}{R_e + m / Y_e} \quad (3.12)$$

где R_T – сопротивление теплопередаче ограждения, м²°С/Вт;

R_g – сопротивление тепловосприятию, $\text{м}^2\text{°C}/\text{Вт}$;

Y_g – коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$;

m – коэффициент неравномерности подвода теплоты в здание, принимаемый равным 0,1.

Из формулы (3.12) вытекает, что теплоустойчивость ограждений зависит от коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности ограждения. С увеличением коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности увеличивается теплоустойчивость ограждения.

Коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности определяется периодом колебания теплового потока, но, главным образом, теплотехническими свойствами самого ограждения. Эта величина представляет собой максимальное изменение амплитуды колебания теплового потока, воспринимаемого внутренней поверхностью ограждения, при амплитуде колебания температуры ее, равной 1°C , и имеет размерность $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$.

Теплоусвоение внутренней поверхности зависит от порядка расположения слоев в ограждении. При расположении у внутренней поверхности ограждения материалов с большими коэффициентами теплоусвоения «S», повышается теплоусвоение внутренней поверхности ограждения « Y_g », и, наоборот, при расположении у внутренней поверхности ограждения материалов с малыми коэффициентами, понижается и величина « Y_g ».

Если ограждение однородно и имеет очень большую толщину, то теплоусвоение его внутренней поверхности при заданном периоде колебания температуры будет зависеть только от свойств материала. В этом случае коэффициент теплоусвоения поверхности ограждения представляет физическую характеристику материала ограждения. Большие коэффициенты теплоусвоения имеют плотные теплопроводные материалы (мрамор, гранит $S_{24} = 22,86\dots 25,04 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$), небольшие – легкие малотеплопроводные материалы (минвата $S_{24} = 0,36\dots 1,08 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$).

При определении величины коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности ограждения Y_g сначала следует установить, где будет находиться граница слоя резких колебаний. В зависимости от расположения этого слоя в ограждении при определении Y_g могут встретиться следующие случаи [3.14].

1. Слой резких колебаний полностью расположен в первом слое ограждения. Это будет в том случае, когда показатель тепловой инерции первого слоя $D_1 = R_1 s_1 \geq 1$. Тогда теплоусвоение внутренней поверхности ограждения будет равно коэффициенту теплоусвоения материала первого слоя, т.е. $Y_6 = S_1$.

2. Слой резких колебаний расположен в двух первых слоях ограждения, т.е. граница его находится во втором слое ограждения. Это будет в том случае, если первый слой имеет $D_1 < 1$, но сумма величин D первого и второго слоев $D_1 + D_2 \geq 1$.

При этом на величину Y_6 оказывает влияние также и теплоусвоение материала второго слоя ограждения и значение Y_6 определяется по формуле

$$Y_6 = \frac{R_1 s_1^2 + s_2}{1 + R_1 s_2} \quad (3.13)$$

где R_1 – термическое сопротивление первого слоя, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$;
 s_1 – коэффициент теплоусвоения материала первого слоя, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$;
 s_2 – коэффициент теплоусвоения материала второго слоя, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$.

3. Слой резких колебаний расположен в нескольких слоях ограждения, т.е. граница его находится в некотором n -м слое ограждения. Это будет в том случае, если сумма величин D_{n-1} первых слоев ограждения будет меньше единицы, т.е. $D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_{n-1} < 1$, но $D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n \geq 1$, т.е. n слоев дают показатель тепловой инерции, равный или больший единицы.

В этом случае определение величины теплоусвоения начинается с внутренней поверхности $n-1$ слоя по формуле

$$Y_{n-1} = \frac{R_{n-1} s_{n-1}^2 + s_n}{1 + R_{n-1} s_n} \quad (3.14)$$

Затем переходят к определению теплоусвоения внутренней поверхности $n-2$ слоя по формуле

$$Y_{n-2} = \frac{R_{n-2} S_{n-2}^2 + Y_{n-1}}{1 + R_{n-2} Y_{n-1}}, \quad (3.15)$$

где Y_{n-1} – теплоусвоение внутренней поверхности $n-1$ слоя, определенное по формуле (3.14).

В таком же порядке переходят к определению величины коэффициента теплоусвоения $n-3$ слоя Y_{n-3} и т.д. до тех пор, пока не доходят до первого слоя ограждения, теплоусвоение которого и будет равно теплоусвоению внутренней поверхности ограждения, рассчитываемого по формуле (3.16), т.е.

$$Y_0 = Y_1 = \frac{R_1 S_1^2 + Y_2}{1 + R_1 Y_2}, \quad (3.16)$$

где Y_2 – теплоусвоение внутренней поверхности второго слоя, определенное предварительно по формуле (3.15).

4. Слой резких колебаний выходит за пределы ограждения, т.е. граница его находится вне ограждения. Это будет в том случае, если сумма величин D всех слоев ограждений получится меньше единицы.

В этом случае сначала определяют теплоусвоение внутренней поверхности последнего слоя ограждения (наружного слоя) по формуле

$$Y_n = \frac{R_n S_n^2 + \alpha_n}{1 + R_n \alpha_n}, \quad (3.17)$$

где R_n – термическое сопротивление последнего слоя ограждения, $\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

S_n – коэффициент теплоусвоения материала этого слоя, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$;

α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$.

Дальнейший порядок расчета такой же, как в третьем случае по выражению (3.16).

Средние значения величин в периодическом тепловом процессе в базовой точке определяют по формулам стационарной теплопередачи, поэтому в формуле 3.3 $t_{\text{вo}}$ равно

$$t_{\text{вo}} = t_{\text{в}} - \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{о}}} \cdot t_{\text{в}} - t_{\text{но}} \quad (3.18)$$

Запаздывание сквозного проникания колебаний во времени для многослойного ограждения может быть определено по приближенной формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{нов}} + \sum \varepsilon_n \quad (3.19)$$

где слагаемое $\sum \varepsilon_n$ соответствует запаздыванию колебаний при прохождении n материальных слоев толщи ограждения. Зависимость для определения $\sum \varepsilon_n$ в часах, имеет вид

$$\sum \varepsilon_n = \frac{T}{2\pi\sqrt{2}} \sum R \cdot s = 0,113 T \sum R \cdot s \quad (3.20)$$

Величина $\varepsilon_{\text{нов}}$ для реальных конструкций изменяется в небольших пределах: от $-0,01 T$ до $0,06 T$. Для инженерных расчетов эту величину можно принять постоянной, равной

$$\varepsilon_{\text{нов}} \approx -0,017 T \quad (3.21)$$

Показатель запаздывания сквозного проникания колебаний ε в часах приближенно определяется по формуле

$$\varepsilon \approx 0,113 T D - 0,017 T \quad (3.22)$$

При $T = 24$ ч формула (3.22) приобретает вид

$$\varepsilon \approx 2,7 D - 0,4 \quad (3.23)$$

Пример. Выполнить оценку изменения температуры на внутренней поверхности наружной стены толщиной $\delta = 550$ мм кирпичного здания в г. Минске через сутки после начала измерений при проведении их в январе месяце.

Исходные данные. 1. Стена состоит из трех слоёв, считая от внутренней поверхности: штукатурного слоя из сложного раствора плотностью $\rho_1 = 1700$ кг/м³, толщиной $\delta_1 = 20$ мм, кладки из глиняного обыкновенного кирпича $\rho_2 = 1800$ кг/м³, толщиной $\delta_2 = 510$ мм, наружного штукатурного слоя $\rho_3 = 1800$ кг/м³ $\delta_3 = 20$ мм.

2. Среднемесячная расчетная температура в январе месяце $t_n = -24$ °С (наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92) [3.16].

3. Теплотехнические характеристики материалов стены жилого дома выбираются в условиях эксплуатации Б [3.16].

$$\begin{array}{ll} \lambda_1 = 0,87 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)} & S_1 = 10,42 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}; \\ \lambda_2 = 0,81 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)} & S_2 = 12,13 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}; \\ \lambda_3 = 0,93 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)} & S_3 = 11,09 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}. \end{array}$$

Порядок расчета.

1. Сопротивление теплопередаче отдельных слоёв наружной стены равно

$$R_1 = \frac{0,02}{0,87} = 0,023 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт};$$

$$R_2 = \frac{0,51}{0,81} = 0,629 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт};$$

$$R_3 = \frac{0,02}{0,93} = 0,022 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}.$$

$$R_T = 0,115 + 0,023 + 0,629 + 0,022 + 0,043 = 0,832 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}.$$

2. Тепловая инерция отдельных слоев и стены

$$D_1 = R_1 \cdot S_1 = 0,023 \cdot 10,42 = 0,24,$$

$$D_2 = R_2 \cdot S_2 = 0,629 \cdot 12,13 = 7,63,$$

$$D_3 = R_3 \cdot S_3 = 0,022 \cdot 11,09 = 0,244,$$

$$\Sigma D = 0,24 + 7,63 + 0,244 = 8,114.$$

3. Так как $D_1 + D_2 = 7,87 > 1$, то Y_v определяется по формуле (3.13)

$$Y_v = \frac{R_1 s_1^2 + s_2}{1 + R_1 s_2} = \frac{0,023 \cdot 10,42^2 + 12,13}{1 + 0,023 \cdot 12,13} =$$

$$= \frac{2,497 + 12,13}{1 + 0,278} = \frac{14,627}{1,278} = 11,44 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

4. Коэффициенты теплоусвоения поверхности слоёв,

$$\text{1 слой, } Y_1 = \frac{R_1 \cdot s_1^2 + \alpha_e}{1 + R_1 \cdot \alpha_e} = \frac{0,023 \cdot 10,42^2 + 8,7}{1 + 0,023 \cdot 8,7} = 9,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

$$\text{2 слой, } Y_2 = s_2 = 12,13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

$$\text{3 слой, } Y_3 = \frac{R_3 \cdot s_3^2 + \alpha_e}{1 + R_3 \cdot \alpha_e} = \frac{0,022 \cdot 1,09^2 + 12,13}{1 + 0,022 \cdot 12,13} = 11,71 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

5. Коэффициент сквозного затухания температурной волны рассчитывается по выражению (3.5)

$$v = v_n \dots v_l v_2 \dots v_l \dots v_k,$$

$$\text{где } v_n = 1 + Y_1 \cdot R_n = 1 + 9,3 \cdot \frac{1}{23} = 1,4;$$

$$\underline{D < 1}, \quad v_1 = e^{\frac{R_1 s_1}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{s_1 + Y_2}{s_1 + Y_1} = e^{\frac{0,023 \cdot 10,42}{1,415}} \cdot \frac{10,42 + 12,13}{10,42 + 9,3} =$$

$$= e^{0,17} \cdot \frac{22,55}{19,72} = 1,186 \cdot 1,143 = 1,36;$$

$$\underline{D > 1}, \quad \nu_2 = e^{\frac{R_2 S_2}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{Y_3}{S_2}\right) = e^{\frac{0,629 \cdot 12,13}{1,415}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{11,71}{12,13}\right) = \\ = e^{5,41} \cdot 0,5 \cdot 1,96 = 1,65$$

$$\underline{D < 1}, \quad \nu_k = e^{\frac{R_3 S_3}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{S_3 + \alpha_6}{S_3 + Y_k} = e^{\frac{0,022 \cdot 11,09}{1,415}} \cdot \frac{11,09 + 8,7}{11,09 + 11,71} = \\ = e^{0,21} \cdot \frac{19,79}{2,8} = 1,23 \cdot 0,87 = 1,07 ;$$

$$\nu = 1,4 \cdot 1,136 \cdot 1,65 \cdot 1,07 = 3,36.$$

6. Запаздывание сквозного проникновения колебаний температурной волны во времени.

При периоде колебания $T = 24$ ч., равно

$$\varepsilon \approx 2,7D - 0,4 = 2,7 \cdot 8,1 - 0,4 = 21,5 \text{ ч.}$$

7. Средняя за период измерений температура внутренней поверхности $t_{\text{во}}$ определена по формуле (3.18)

$$t_{\text{во}} = t_{\text{в}} - \frac{R_{\text{в}}}{R_0} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{но}}) = 18 - \frac{0,115}{0,832} \cdot (18 + 24) = 12,2 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

8. Средняя за месяц суточная амплитуда температуры наружного воздуха, принята по [3.17] и равна $A_{\text{н}} = 6,2 \text{ } ^\circ\text{C.}$

9. Температура на внутренней поверхности стены при периоде колебания $T = 24$ ч. и $\tau = 24$ ч. будет равна

$$10. \quad t_{\text{вн}} = t_{\text{во}} + \frac{A_{\text{н}}}{\nu} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot (\tau - \varepsilon) = \\ = 12,2 + \frac{6,2}{3,36} \cos \frac{2\pi}{24} \cdot (24 - 21,5) = 13,36 \text{ } ^\circ\text{C,}$$

а при $\tau = 12$ ч.

$$t_{\text{вп}} = 12,2 + \frac{6,2}{3,36} \cos \frac{2\pi}{24} \cdot 12 - 21,5 = 10,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3.5.3 Экспериментальная оценка теплового и влажностного режимов ограждающих конструкций

Основным нормативным документом, регламентирующим определение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций в натуральных условиях или на стендах, является ГОСТ 26254-84 [3.10]. По данному документу при проведении исследований необходимо экспериментальное определение температурного режима на поверхности и по сечению ограждающей конструкции, а также температур наружного воздуха и воздуха внутри помещений. Для выполнения указанных измерений используются обычно термомпары или другие датчики температуры, устанавливаемые по сечению, на поверхности и на расстоянии 100 мм от ограждений. При установке датчиков внутри ограждений приходится нарушать целостность конструкции, что является недостатком данной методики.

Вывод о стационарности или нестационарности температурного поля ограждения делается по постоянству измеряемых температур за определенный промежуток времени.

Наиболее распространенной и достоверной методикой определения массовой влажности материалов ограждающих конструкций является метод извлечения проб с последующим высушиванием их до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре, регламентируемой ГОСТ для каждого вида материала [3.19...3.21]. Образцы, извлекаемые из ограждений, помещаются в закрываемые бюксы, с последующим взвешиванием до и после сушки. Масса образцов определяется взвешиванием на аналитических весах.

Обработка результатов измерений проводится в соответствии с требованиями указанных нормативных документов. По результатам эксперимента строятся кривые распределения массовой влажности материалов по сечению ограждений.

3.5.4 Контактные методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

В теории теплоустойчивости анализ формирования температурного поля ограждающих конструкций основывается на законе периодического гармонического колебания температуры по косинусоидальной зависимости. В действительности внешние воздействия, например, колебания наружной температуры воздуха, являются аperiodическими, отличающимися от гармонических. Тепловая инерция ограждений, аperiodичность нестационарных процессов в них, определяет длительность перестройки теплового режима по сечению всей конструкции, и особенно на её внутренней поверхности. Время перестройки (релаксации) в нестационарном режиме зависит от температуропроводности материалов $\alpha_n = \lambda_n / C_n \cdot \rho_n$, м²/с и толщины конструкции.

Для типовых конструкций наружных стен длительность релаксации температурного поля оценивается в двое – трое суток. За этот временной период начальные условия нестационарного процесса, определенные в момент времени τ_1 , уже не должны влиять на температурное поле, установившееся в момент времени τ_2 , и только после этого тепловой поток q_2 (τ_2) будет соответствовать t_n (τ_1). А так как $t_n = f(\tau)$, то на точность натуральных измерений всегда оказывает влияние предшествующая история развития теплового режима ограждающей конструкции.

Уменьшение влияния релаксации температурного поля на точность определения сопротивления теплопередаче ограждений в натуральных условиях выполняется путём использования методики «средних значений» или применением экспресс метода измерений.

В методике «средних значений» в результате обработки данных измерений, выполненных за определенный промежуток времени, отклонения величин Δt и Δq от средних (истинных) значений взаимно нивелируются, и должны обеспечивать ошибку определения R_T не превышающую 15 %.

Использование экспресс методов базируется на особенностях формирования температурного поля ограждающих конструкций. Как отмечено выше, нормативная литература основывается на рассмотрении тепловлажностного режима ограждающих конструкций

в стационарных условиях. Нестационарность процессов учитывается дополнительным вводом характеристик, полученных при рассмотрении теплового режима ограждений при гармонических колебаниях температуры воздуха. Например, для наружной стены здания, при гармонических колебаниях температуры наружного воздуха и постоянной температуре воздуха в помещениях, на внутренней поверхности её температура рассчитывается по формуле (3.3). Из данной зависимости следует, что перестройка температурного поля по сечению и на поверхности ограждения зависит от величины показателя сквозного затухания температурной волны, определяемого по формуле (3.5), и величины запаздывания сквозного проникновения колебания во времени, рассчитываемого по выражению (3.19). В инженерных расчетах оба показателя определяются путем учёта условий их влияния на температурную волну по двум факторам. Первый фактор – влияние граничных условий на наружной поверхности стены, и второй – затухание волны при прохождении «n» материальных слоев ограждения.

При учёте только граничных условий, величина $\epsilon_{\text{пов}}$ для реальных конструкций ограждений изменяется в пределах от 0,24 до 1,4 ч. при $T = 24$ ч.

Показатель затухания при переходе температурной волны от наружного воздуха к наружной поверхности ограждения, определяемой по формуле (3.6), равен $\nu_n = 1,4 \dots 1,6$ ч.

Таким образом, внутренние слои ограждений начинают реагировать на перестройку температурного поля через 0,24...1,60 ч. с момента изменения наружной температуры воздуха. Выполнение измерений в этот промежуток времени позволяет фиксировать характеристики теплового режима ограждения присущие временному интервалу продолжительности измерения, т.е. практически стационарные, но с учётом развития температурного поля, которая вносит в результаты систематическую ошибку.

Для определения действительных теплозащитных характеристик ограждающих конструкций и, в частности, величин сопротивления теплопередаче, применяются методы натуральных исследований, с определением удельного теплового потока. Мощность теплового потока, проходящего через ограждающую конструкцию через единицу площади пропорциональна разности температур воздуха по обе стороны его и обратно пропорциональна сопротивлению теплопередаче.

Измерив удельный тепловой поток и распределение температур по сечению ограждения и в воздушных потоках омывающих его, определяется сопротивление теплопередаче и, при необходимости, термическое сопротивление каждого слоя.

Для определения поверхностной плотности теплового потока через ограждающую конструкцию используются преобразователи теплового потока (ПП). В дальнейшем преобразователи теплового потока будем именовать – тепломерами.

В основу работы типового тепломера (рис. 3.3) положен принцип дополнительной стенки с незначительным по сравнению с исследуемой конструкцией термическим сопротивлением. Зная термическое сопротивление дополнительной стенки R_d (тепломера) и температуру на ее поверхностях t_1 и t_2 , можно определить удельный тепловой поток, проходящий, через прибор, по формуле

$$q = (t_2 - t_1) / R_d, \quad (3.24)$$

где R_d – термическое сопротивление, $m^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

При стационарных условиях теплопередачи этот тепловой поток будет равен тепловому потоку, проходящему через исследуемую конструкцию.

Постоянное значение коэффициента теплопроводности тепломера и, следовательно, его термического сопротивления в различных влажностных условиях обеспечивается применением плотных неувлажняемых материалов рабочего и защитных слоев. Общая толщина тепломера от 3 до 10 мм в совокупности с высоким коэффициентом теплопроводности используемых материалов обеспечивает его незначительное термическое сопротивление.

Для определения удельного теплового потока целесообразно измерять непосредственно разность температур t_2 и t_1 дифференциальной термопарой. Поскольку эта разность достаточно мала, для повышения точности измерения в прибор заложена батарея, состоящая из нескольких тысяч последовательно соединенных термопар. Проводники термобатареи выведены на наружные клеммы. Тепломер желательно выполнять круглой формы, что исключает влияние углов на результаты измерений. Устанавливается он стационарно на внутренней поверхности исследуемого ограждения.

Для этого выбирается гладкий участок, обеспечивающий плотное примыкание поверхности тепломера к исследуемой конструкции. Обеспечение плотного прилегания прибора к конструкции достигается креплением его на слое жидкого алебастра, вазелина толщиной 0,5 – 1,5 мм или клея.

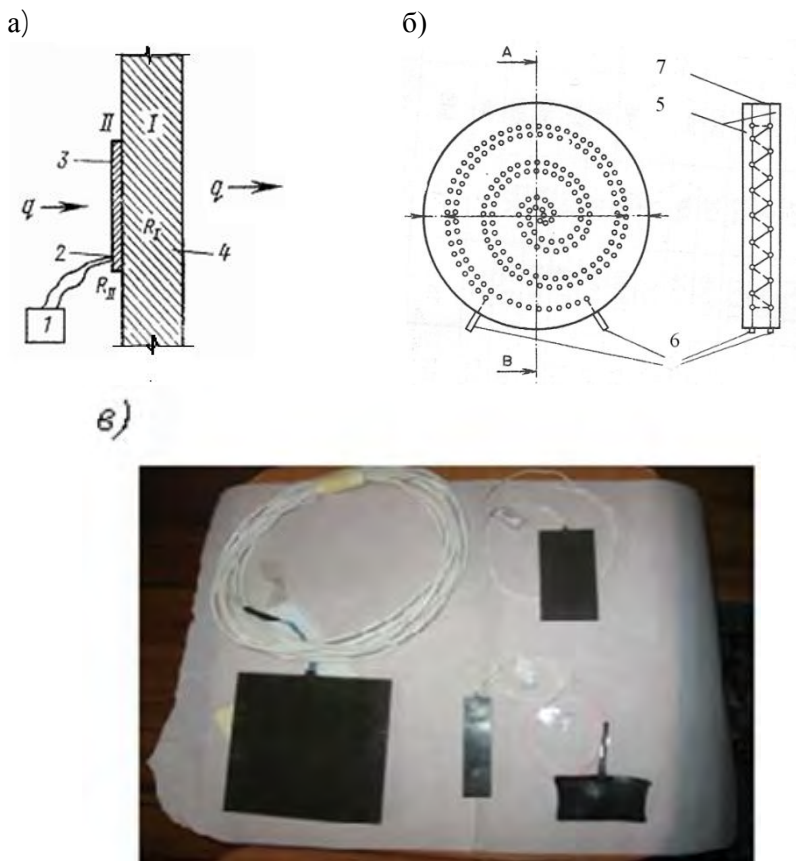


Рис. 3.3. Тепломеры:
 а – схема измерения; б – устройство; в – общий вид;
 1 – измерительный прибор; 2 – клеммы; 3 – дисковый тепломер (дополнительная стенка); 4 – исследуемая конструкция; 5 – защитные слои; 6 – батарея дифференциальных термопар; 7 – рабочий слой

Участок ограждения, выбранный для установки тепломера, должен быть характерным для всей конструкции и удален от элементов, изменяющих направление теплового потока (стыки внутренних и наружных стен, наружных стен с междуэтажными перекрытиями, граней оконных проемов и т.п.), на 1,5 – 2 м.

Желательно, чтобы в период наблюдения колебания температуры воздуха в помещении не превышали $\pm 0,2^\circ\text{C}$. При больших колебаниях точность измерений резко снижается.

Длительность испытаний, обеспечивающая достаточную точность результатов измерений, зависит от массивности исследуемой конструкции.

При непрерывной записи показаний тепломеров и термодатчиков в течение нескольких дней строится график изменения э.д.с. тепломера, температуры внутреннего и наружного воздуха по данным приборов, делающих отсчет каждый час или половину часа.

В качестве расчетного участка для ограждений с тепловой инерцией $D = 1,5 \dots 4,0$ используют суточный участок трех–четырёхдневного графика с минимальными температурными колебаниями.

Удельный тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$, проходящий через исследуемую конструкцию, определяют по формуле

$$q = k \cdot e \quad , \quad (3.25)$$

где e – э.д.с. тепломера, мВ;

k – постоянная тепломера, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{мВ})$.

Постоянная k является паспортной величиной для каждого тепломера.

Для измерения температур на поверхности, по сечению ограждений, а также в воздухе, необходим комплект датчиков.

Минимальное количество датчиков температуры – 4 шт., они располагаются: в помещении на расстоянии 10 см от внутренней поверхности ограждения; на внутренней и наружной поверхностях ограждения; снаружи на расстоянии 10 см от наружной поверхности ограждения.

Для непрерывной регистрации значений температуры и удельного теплового потока в исследуемом ограждении могут быть исполь-

зованы автоматические самопишущие приборы. В качестве датчиков температуры могут быть использованы термометры сопротивления или термопары.

Сопротивление теплопередаче ограждения и термические сопротивления отдельных конструктивных « n » слоев определяют соответственно по формуле (3.2) и (3.26).

$$R_n = t_n - t_{n-1} / q. \quad (3.26)$$

Определение основных теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий и сооружений в натуральных условиях их эксплуатации реализуется на основе комплексного использования контактных датчиков температур и тепловых потоков (тепломеров), объединенных в единую систему измерения и регистрации на основании автономных измерительных комплексов. Они позволяют вести сбор данных с датчиков и сохраняют результаты измерений в памяти приборов. Измерения проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 26254-84 и ГОСТ 25380-82.

Для определения тепловых потоков через ограждающие конструкции зданий экспресс методом, в институте технической теплофизики НАН Украины, разработали серию приборов названных измерителями тепловых потоков (ИТП) и методику проведения измерений с их использованием [3.24]. Правильность определения удельной мощности тепловых потоков через ограждающие конструкции по указанной методике, по мнению авторов, обеспечивается за счет правильного выбора ИТП и выполнения измерений согласно стандарту ГОСТ 25380-2002 [3.25].

Продолжительность измерений определяется снятием показаний с шагом по времени не менее 2 минут и проведением их до тех пор, пока не будут получены подряд 5...10 одинаковых значений по одному ИТП или групп показаний при наличии двух и более ИТП. Показания считаются одинаковыми, если различие между ними не превышает ± 5 единиц третьей (или четвертой) значащей цифры.

В процессе выполнения исследований, результаты которых приведены в данной монографии, были использованы, как методики измерений, регламентируемые ГОСТ 26254-84, так и экспресс методы.

Для проведения многодневных измерений с автоматической записью показаний использовался многоканальный контроллер КТП-04.016 в комплекте с датчиками плотности теплового потока и температуры (рис. 3.4).

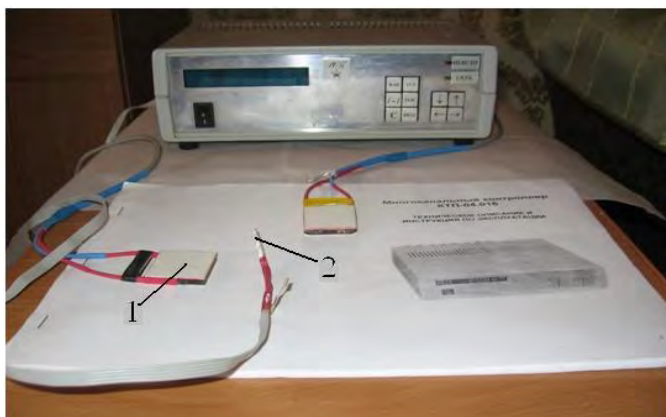


Рис. 3.4. Многоканальный контроллер КТП – 0,4 – 0,16:
1 – тепломер ТВ-127-1.0; 2 – датчик температуры ЭЧП-21

Датчики температуры и их характеристики приведены в табл. 3.3.

Плотность теплового потока измеряется датчиком ТВ-127-1.0-2.5. Диапазон измерения 0...10 мВ. Максимальный измеряемый уровень удельной плотности теплового потока 24 Вт/м².

Коэффициент пропорциональности пересчета показаний прибора КТП-04.016 в плотность теплового потока для датчиков-тепломеров приведены в табл. 3.4.

При выполнении исследований в натуральных условиях были использованы приборы фирмы ТЕХНО-АС: пирометр инфракрасный С-110, измеритель самопишущий ИС-201, термометры контактные цифровые ТК-5.01 и др. оборудование. В качестве тепломеров, используемых при экспресс методах оценки тепловых потоков через ограждения, были применены измерители плотности тепловых потоков ИПП-2М, ИТП-23, ИТП-МГ4.03 «Поток», ТВ-127 и др.

Таблица 3.3

**Основные метрологические характеристики
температурных измерений**

Первичный преобразователь		Диапазон измерений температур, °С	Предел допускаемой основной приведенной погрешности от диапазона измерения $\xi_t, \%$
Датчик температуры поверхности ТСП 9703-02	Внутренней	0 ...+50	0,5
	Наружной	-25 ...+50	0,5
Датчик температуры воздуха ЭЧП-21	Внутреннего	0...+100	0,5
	Наружного	-70 ...+180	0,5

Таблица 3.4

Данные показателей тепломеров

№ тепломера	Коэффициент пересчета, k , Вт/(м ² ·мВ)
1	2
17	3,3
18	3,2
19	3,6
20	3,1

3.5.5 Погрешности измерений сопротивления теплопередаче

При выполнении натурных экспериментальных исследований по определению сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий используются рекомендации ГОСТ 26254-84 [3.10]. Представленная в нём методика определения погрешности вычисления сопротивления теплопередаче ограждений ориентирована на приборную базу, доступную в период создания указанного документа. Но за прошедшее время разработаны новые датчики, измерительная аппаратура, программы обработки данных измерений, и

поэтому возникла необходимость расчета погрешности определения сопротивления теплопередаче применительно к новым конкретным измерительным приборам.

Ниже представлена методика определения погрешности при использовании в качестве приборной базы комплекса КТП – 04.016. Продолжительность выполнения измерений в зависимости от инерционности ограждающих конструкций до 10...12 суток. Обработка результатов измерений выполняется по методике средних значений.

Предельные абсолютные погрешности определения температуры внутреннего, $\Delta t_{\text{в}}$, и наружного, $\Delta t_{\text{н}}$, °С, воздуха рассчитываются по формулам:

$$\Delta t_{\text{в}} = \frac{D_{t_{\text{в}}} \cdot \xi_t}{100}, \quad (3.27)$$

$$\Delta t_{\text{н}} = \frac{D_{t_{\text{н}}} \cdot \xi_t}{100}, \quad (3.28)$$

где $\Delta t_{\text{в}}, \Delta t_{\text{н}}$ – соответственно предельные абсолютные погрешности измерения $t_{\text{в}}, t_{\text{н}}$, °С;

$D_{t_{\text{в}}}, D_{t_{\text{н}}}$ – соответственно диапазоны измерения $t_{\text{в}}, t_{\text{н}}$, °С;

ξ_t – предел допускаемой основной приведенной погрешности от диапазона измерения, %.

Предельная относительная погрешность показаний тепломера находится по формуле

$$\xi_{qv} = \frac{\xi_v \cdot D_v}{\frac{100}{V_{\text{изм}}}}, \quad (3.29)$$

где ξ_v – предельная относительная погрешность показаний прибора для данного диапазона (для КТП она равна 0,5 %);

D_v – диапазон определения V при измерении q , мВ;

$\bar{V}_{изм}$ – усредненные показания прибора за время τ , (сут.) по датчику тепломера, мВ.

Предельная абсолютная погрешность определения разности температур $t_g - t_n$ находится по формуле

$$\Delta(\Delta t) = \sqrt{\Delta t_B^2 + \Delta t_H^2}. \quad (3.30)$$

Предельная относительная погрешность определения плотности теплового потока рассчитывается по формуле

$$\xi_q = \sqrt{\xi_V^2 + \xi_{qv}^2}. \quad (3.31)$$

Средние значения $\bar{t}_g, \bar{t}_n, ^\circ\text{C}$ находятся по формулам

$$\bar{t}_B = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Bi}}{n}, \quad (3.32)$$

$$\bar{t}_H = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Hi}}{n}, \quad (3.33)$$

где t_{gi}, t_{ni} – конкретные результаты измерений температур, приведенные в таблице 3.5 для исследуемого периода, $^\circ\text{C}$;

n – количество измерений.

Разность температур наружного и внутреннего воздуха $\bar{\Delta t}_{изм}, ^\circ\text{C}$, рассчитывается по формуле

$$\bar{\Delta t}_{изм} = \bar{t}_B - \bar{t}_H. \quad (3.34)$$

Средние значения измеренной плотности теплового потока $\bar{q}_{изм}$, Вт/м², определяются как

$$\bar{q}_{\text{ИЗМ}} = k \cdot \bar{V}_{\text{ИЗМ}}, \quad (3.35)$$

где k – показатель тепломера (см. табл. 3.4), Вт/(м²·мВ);
 $\bar{V}_{\text{ИЗМ}}$ – среднее показание тепломера за исследуемый период, мВ, определенное по формуле

$$\bar{V}_{\text{ИЗМ}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{\text{ИЗМ}i}}{n}, \quad (3.36)$$

где $V_{\text{ИЗМ}i}$ – результаты показаний по тепломеру в i -том измерении, мВ.

Сопротивление теплопередаче в данной точке наружной стены $R_{TЭ}$, (м²·°C)/Вт, определяется по формуле

$$R_{TЭ} = \frac{\bar{\Delta t}_{\text{ИЗМ}}}{q_{\text{ИЗМ}}}. \quad (3.37)$$

Предельная абсолютная погрешность определения, R_T , то есть ΔR_{Σ} , (м²·°C)/Вт, выполняется по формуле

$$\Delta R_{\Sigma} = R_{\text{оз}} \cdot \sqrt{\xi q^2 + \frac{\Delta(\Delta t)^2}{\Delta t^2}}. \quad (3.38)$$

Искомое сопротивление теплопередаче R_T , (м²·°C)/Вт, с учетом доверительных интервалов записывается в виде

$$R_T = R_{TЭ} \pm \Delta R_{\Sigma}. \quad (3.39)$$

При выполнении измерений экспресс методами определение погрешностей измерений следует рассчитывать по методикам, изложенным в [3.10, 3.24, 3.25].

Пример. Выполнить расчет сопротивления теплопередаче наружной стены жилого дома, имеющей тепловую инерцию $D \approx 6$, и погрешность её определения. Измерения проведены с помощью прибора КТП-04.016 и тепломера №20 (табл. 3.4), установленных в реперной точке, и датчиков температуры воздуха.

Натурные измерения выполнялись в течение шести суток в апреле месяце. Запись датчиков осуществлялась с интервалом в один час.

В табл. 3.5 представлена выборка величин измерений за период в одни сутки, характеризующаяся колебаниями температуры наружного воздуха $\pm 0,9$ °С, что говорит о практически стационарном тепловом режиме стены. ГОСТ 26254-84 требует, чтобы в расчет принимались промежутки времени с колебаниями температуры $\pm 1,5$ °С.

Точка измерения плотности теплового потока расположена на внутренней поверхности наружной стены вне теплопроводных включений и на расстоянии 0,55 м от пола, а также 0,6 м от угла и оконного проёма, что обеспечивает одномерность теплового потока.

Точка измерения температуры внутреннего воздуха – на расстоянии 100 мм от поверхности стены.

Температура наружного воздуха замерялась на расстоянии более 100 мм от наружной поверхности стены.

1. Мощность удельного теплового потока через стену определяется по формуле (3.35), где $\bar{v}_{из}$ принята из табл. 3.5, величина k – из табл. 3.4

$$\bar{q}_{изм} = 3,1 \cdot 3,976 = 12,33 \text{ Вт/м}^2.$$

2. Разность температур внутреннего и наружного воздуха находится по формуле (3.34)

$$\bar{\Delta t}_{изм} = 23,66 - 0,392 = 23,268 \text{ }^\circ\text{С}.$$

3. Экспериментально определенная величина сопротивления теплопередаче $R_{оэ}$ рассчитывается по формуле (3.37)

$$R_{оэ} = \frac{23,268}{12,33} = 1,888 = 1,89 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{С/Вт}.$$

Таблица 3.5

Выборка результатов замеров за исследуемый период

Дата	Время ч: мин	Температура наружного воздуха, °С	Температура внутреннего воздуха, °С	Показания КТП от датчика №20 изме- ряющего плотность теплового потока, мВ
1	2	3	4	5
06-04	12:59	-0,2	24,2	4,23
	13:58	0,6	24,1	4,23
	14:58	0,6	24,0	4,15
	15:58	1,1	24,0	4,20
	16:58	1,3	23,9	4,09
	17:58	1,3	23,9	4,09
	18:58	1,1	23,8	4,07
	19:58	1,0	23,8	3,98
	20:58	1,2	23,7	3,93
	21:58	1,1	23,6	3,92
	22:58	1,1	23,6	3,84
	23:58	1,0	23,5	3,73
07-04	00:58	0,9	23,5	3,79
	01:58	0,1	23,4	3,70
	02:58	-0,5	23,4	3,73
	03:58	-0,6	23,5	3,77
	04:58	-0,5	23,4	3,82
	05:58	-0,5	23,4	3,79
	06:58	-0,3	23,4	3,89
	07:58	-0,3	23,5	3,90
	08:58	0,0	23,5	3,90
	09:58	0,1	23,5	4,01
	10:58	0,1	23,6	4,06
	11:58	0,0	23,6	4,13
12:58	0,1	23,7	4,26	

4. Предельные абсолютные погрешности нахождения температуры внутреннего воздуха Δt_g и наружного Δt_n определяются по формулам (3.27) и (3.28)

$$\Delta t_g = \frac{100 \cdot 0,5}{100} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_n = \frac{(180 - (-70)) \cdot 0,5}{100} = 1,25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5. Предельная абсолютная погрешность определения разности температур $t_g - t_n$ рассчитывается по формуле (3.30)

$$\Delta(\Delta t) = \sqrt{0,5^2 + 1,25^2} = 1,35 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

6. Предельная относительная погрешность определения показаний тепломера находится по формуле (3.29)

$$\xi_{qv} = \frac{0,5 \cdot 10}{3,976} = 0,0126.$$

7. Предельная относительная погрешность нахождения плотности теплового потока определяется по формуле (3.31)

$$\xi_q = \sqrt{0,05^2 + 0,0126^2} = 0,052.$$

8. Предельная абсолютная погрешность определения R_{03} , ΔR_{Σ} , рассчитывается по формуле (3.38)

$$\Delta R_{\Sigma} = 1,89 \cdot \sqrt{0,052^2 + \left(\frac{1,35}{23,66}\right)^2} = 0,15 \text{ м}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

9. С учетом доверительных интервалов величина искомого сопротивления теплопередаче стены, определённая в реперной точке, равна

$$R_0 = 1,89 \pm 0,15 \text{ м}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}.$$

Предельная относительная погрешность при доверительной вероятности 95 % равна $\xi \approx 8 \%$, что значительно меньше 15 %, допускаемой ГОСТ 26245-84.

3.5.6 Развитие контактных методов теплотехнических исследований ограждающих конструкций зданий

Методическая и экспериментальная база проведения теплотехнических исследований ограждений зданий и микроклимата помещений постоянно совершенствуется. Наиболее сложным и принципиальным вопросом при проведении натуральных исследований является сбор информации с датчиков тепловых потоков, температуры, относительной влажности и подвижности воздуха и других. Используемая для измерений аппаратура связана с датчиками коммуникационными проводами. Это требует оборудования в местах проведения исследований измерительных станций с установкой фиксирующих или записывающих приборов (рис. 3.4).

Совершенствование методики и приемов проведения исследований на эксплуатируемых объектах осуществляется путем создания измерительных комплексов без коммуникационных связей. Записывающие приборы и датчики, фиксирующие показания, не должны быть связаны друг с другом проводами. Передача информации должна выполняться по радиосвязи, т.е. датчики могут находиться на расстоянии от фиксирующих приборов. Конструкция указанных датчиков, кроме измерительных элементов, включает блок памяти и передачи информации.

Фиксирующие приборы могут получать информацию непосредственно по беспроводной связи при проведении измерений или путем перекачивания ее с датчиков после завершения исследований. Особенностью фиксирующего оборудования является возможность непосредственной обработки данных исследований с построением графических зависимостей и их анализа. Для этого фиксирующее оборудование имеет программное обеспечение, в котором заложен алгоритм обработки результатов эксперимента.

Примером разработки указанного оборудования служит программно-аппаратный комплекс совместной разработки Шаньдунского Компьютерного Центра (г.Цзинань, КНР) и Научно-исследовательской и испытательной лаборатории строительной теплофизики и инженерных систем зданий (НИИЛ СТИСЗ) БНТУ

(РБ). Принципиальная схема проведения измерений программно-аппаратным комплексом представлена на рис. 3.5.

Комплекс предназначен для экспериментального определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с последующей оценкой энергетических характеристик здания.

Аппаратный комплекс состоит из датчиков тепловых потоков (тип SKJ-RW1), включающих в себя также датчики температур поверхности (с диапазоном измерения $-40...+150\text{ }^{\circ}\text{C}$), узловых точек передачи радиосигнала в помещении и вне помещения, центрального блока радиоприема и радиопередачи сигналов от узловых точек, их визуализации на экране прибора и передачи этих сигналов посредством встроенного устройства связи стандарта GSM с последующим получением через Интернет на компьютер, расположенный в лаборатории.

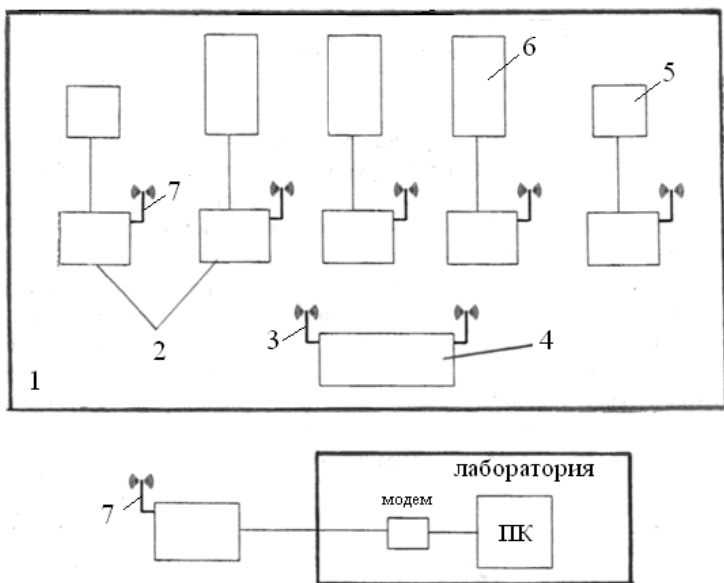


Рис. 3.5. Принципиальная схема проведения измерений программно-аппаратным комплексом:

- 1 – исследуемый объект; 2 – узловые точки передачи информации;
- 3 – радиосигнал GSM; 4 – центральный блок радиоприема и радиопередачи;
- 5 – датчик температуры воздуха; 6 – датчик теплового потока;
- 7 – радиосигнал Wi-Fi

На рис. 3.6 показано оборудование измерительного комплекса, установленное на исследуемом объекте.

Результаты от каждого датчика (датчик теплового потока выполнен воедино с датчиком температуры) поступают на индивидуальный радиопередатчик (узловые точки в помещении или узловые точки вне помещения) и посредством радиосигнала Wi-Fi передаются на центральный блок радиоприема и радиопередачи сигналов, где осуществляется как их визуализация на экране прибора (для анализа результатов непосредственно в условиях объекта), так и передача этих сигналов посредством встроенного устройства связи стандарта GSM с последующим получением через Интернет на компьютер, расположенный в лаборатории. Такая схема организации получения и передачи результатов измерений позволяет располагать датчики не только в любой комнате исследуемого объекта, но и на любом этаже и в любой секции здания или зданий (в пределах достижения радиосигнала от радиопередатчиков). Помимо этого результаты исследований можно получить и проанализировать не только в условиях объекта, но и, что самое важное, в любой точке земли, доступной для приема сигнала GSM или проводной линии интернета. Это является весьма важным обстоятельством при проведении измерений на объектах ограниченного (по времени) доступа или при неустойчивых погодных условиях, а, кроме того, в любой момент можно проверить работоспособность, как всего прибора, так и каждого датчика в отдельности.

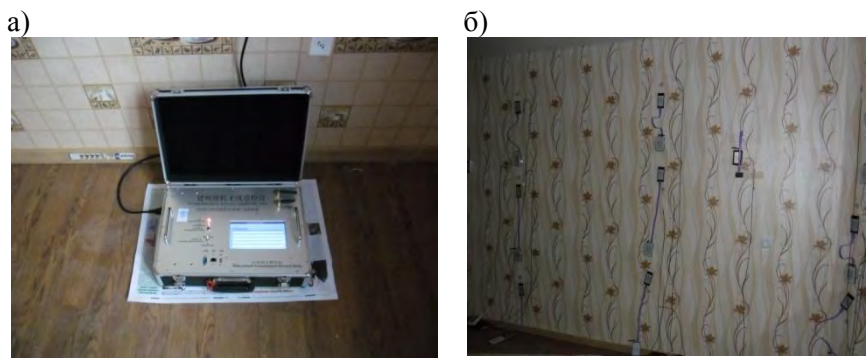


Рис. 3.6. Размещение центрального блока радиоприема и радиопередачи (а) и датчиков теплового потока и температуры на исследуемом объекте (б)

3.6 Выводы

1. Рассмотрены методические особенности проведения натурных и лабораторных исследований по определению теплофизических характеристик ограждающих конструкций и параметров микроклимата помещений с использованием современного экспериментального оборудования.

2. При выполнении измерений использовались приборы и оборудование, внесенные в «Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь». Применение новой аппаратуры проводилось на основании разработанных методик исследований и определения их погрешности

3. По разработанным методикам представлены результаты натурных экспериментальных исследований с определением погрешности измерений.

Литература к главе 3

3.1 ГОСТ 30494-96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.

3.2 ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

3.3 ГОСТ 12.3.018-79. Системы вентиляции. Методы аэродинамических испытаний.

3.4. International Standard. ISO 6781 Thermal insulation – Qualitative detection of thermal irreoularities in building envelopes – Infrared method.

3.5. Неразрушающий контроль. /Под общей редакцией В.В. Клюева. Справочник. Том 5. Тепловой контроль. Кн.1. – М.: Машиностроение. – 2004. -680 с.

3.6. Бударин О.Н. Тепловой неразрушающий контроль изделий. / О.Н. Бударин и др. Научно-методическое пособие. – М.: Наука. – 2002. – 470 с.

3.7. ГОСТ 26629-85. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.

3.8. Шишкин А.В. Разработка методики определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций при наружном

обследовании методом тепловизионной съёмки. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. //А.В. Шишкин. Санкт – Петербург. – 2001.

3.9. Михеев Д.А. Повышение тепловой эффективности наружных стеновых ограждений на основе анализа тепловизионных исследований. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. //Д.А.Михеев. Красноярск. – 2010.

3.10. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

3.11. ГОСТ 31166-2003. Ограждающие конструкции зданий и сооружений. Метод calorиметрического определения коэффициента теплопередачи.

3.12. Власов О.Е. Основы строительной теплотехники. /О.Е. Власов ВИА РККА, 1938.-235 с.

3.13. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. /К.Ф. Фокин. - М.: Стройиздат. 1973. – 286 с.

3.14. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. /В.Н. Богословский. - М.: Высшая школа. - 1982.- 286 с.

3.15. Шкловер А.М. Теплопередача при периодических воздействиях. /А.М. Шкловер. – М.-Л.: Госэнергоиздат. – 1961. -213 с.

3.16. ТКП 45-2.04-43-2006. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования. – Мн. – 2007.

3.17. СНБ 2.04.02-2000. Строительная климатология. – Мн. – 2001.

3.18. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика. – М. – 1983.

3.19. ГОСТ 12730.2-78. Бетоны. Метод определения влажности.

3.20. СТБ 1437-2004. Плиты пенополистирольные теплоизоляционные. Технические условия.

3.21. ГОСТ 17177-94. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний.

3.22. ASTM C1155-95(2001) «Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data»/

3.23. ГОСТ 25380-82. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции.

3.24. Определение тепловых потоков через ограждающие конструкции. Методика М000131.5.023-01/Т.Г.Грищенко и др. – К.: ЛОГОС. – 2002.-133 с.

3.25. ГОСТ 25380-2001. Энергосбережение. Здания и сооружения. Методы измерения поверхностной плотности тепловых потоков и определения коэффициентов теплообмена между ограждающими конструкциями и окружающей средой.

ГЛАВА 4. ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ЗДАНИЙ

4.1 Приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен

Ограждающие конструкции являются барьером на пути теплового потока теряемого при эксплуатации зданий, обеспечивая требуемый уровень их теплозащиты. В теплотехническом отношении они достаточно неоднородны и представляют собой многослойные сложные системы, выполненные из различных материалов, в том числе теплоэффективных. Особенность наружных ограждающих конструкций современных зданий – наличие большого количества элементов крепления, каркасов, узлов из металла, межпанельных стыков, выступающих элементов, угловых сопряжений, оконных и балконных проёмов. При обеспечении нормативной величины сопротивления теплопередаче по глади наружной стены, на остальных её участках, таких как откосы проёмов, сопряжения с межэтажными перекрытиями, балконными плитами, сопротивление теплопередаче будет значительно ниже. Тепловая неоднородность хорошо прослеживается по температурным полям наружной поверхности стен, получаемых при ИК-съёмке фасадов зданий.

Наличие элементов из металла и тяжелого бетона предопределяет формирование в ограждающих конструкциях мостиков холода, через которые происходит интенсивный сток теплоты, превышающий теплопотери через гладь ограждений. Чтобы учесть указанные факторы необходимо на стадии проектирования выполнять расчёты температурных и влажностных полей ограждений и на их основе прогнозировать тепловые и влажностные режимы конструкций в процессе эксплуатации зданий, а также определять величины их приведенного сопротивления теплопередаче.

Структуру переноса теплоты через наружные стены из трёхслойных стеновых панелей с эффективной теплоизоляцией 17-ти этажного каркасного жилого дома характеризует пример, приведенный в работе [4.1].

Диаграмма на рис. 4.1 показывает, что только 53 % теплового потока покидает здание через участки стен без теплопроводных включений («по глади»). Остальные 47 % уходят через откосы про-

ёмов, угловые сопряжения стен, сопряжения наружных стен с дисками перекрытий и другие теплопроводные включения.

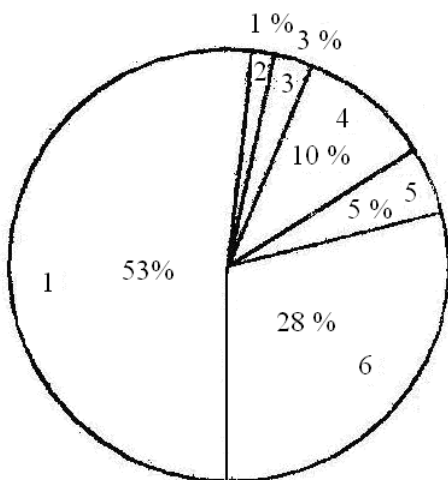


Рисунок 4.1. Структура переноса теплоты через наружную стену:
 1 – основные («по глади»); 2 – через углы; 3 – через сопряжения наружной стены с внутренними стенами; 4 – через сопряжения наружной стены с междуэтажными перекрытиями; 5 – через откосы проёмов; 6 – через прочие теплопроводные включения

Под приведенным сопротивлением теплопередаче, R_{T}^{np} , $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, понимают величину равную отношению разности температур воздушных сред, омывающих многослойную ограждающую конструкцию к усредненной по её площади удельной мощности теплового потока в стационарном тепловом режиме. Для геометрически сложного ограждения приведенное сопротивление теплопередаче – величина, равная сопротивлению теплопередаче однородного ограждения, мощность теплового потока через которое равна мощности теплового потока через рассматриваемое сложное.

Цель расчёта приведенного сопротивления теплопередаче заключается в повышении достоверности определения потери теплоты через i -ое ограждение помещения Q_i , Вт по выражению

$$Q = \frac{F}{R} (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot n \cdot (1 + \beta) \quad (4.1)$$

где F_i – площадь ограждения, м²;

R_T^{np} – приведенное сопротивление теплопередаче наружной ограждающей конструкции, м²·°C/Вт;

$t_{\text{в}}, t_{\text{н}}$ – расчётные температуры внутреннего и наружного воздуха, °C;

n – коэффициент, учитывающий положение наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху;

β_i – коэффициент, учитывающий добавочные теплотери через ограждение.

Площадь отдельных ограждений вычисляется с соблюдением определённых правил обмера и, как правило, по внешнему периметру здания [4.2]. Соответственно и величины приведенного сопротивления теплопередаче должны учитывать особенности формирования теплового режима ограждений в пределах их расчётных поверхностей с учётом угловых участков стен, участков междуэтажных перекрытий, откосов проёмов, выступающих участков и теплопроводных включений.

Перечисленные задачи должны решаться с учётом необходимости предоставления проектировщикам удобных в пользовании результатов, необходимых для составления тепловых балансов отдельных помещений зданий. Одновременно они должны учитывать все особенности ограждающих конструкций определяющих уровень энергосбережения в зданиях.

Необходимость перехода от определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий на основании рассмотрения различных вариантов одномерной стационарной задачи, путём определения коэффициента теплопередачи или обратной ему величины, сопротивления теплопередаче, рассматриваются во многих странах мира. Методика его определения для участка сложной ограждающей конструкции основывается на расчёте коэффициента теплопередачи K , Вт/(м²·°C) или сопротивления теплопередаче R_T , м²·°C/Вт по глади конструкции и последующим уточнением их величин добавлением разностных значений ΔK или ΔR_T , учиты-

вающих наличие теплопроводных включений, откосов проёмов, стыковых соединений и т.д.

В методиках, разработанных в странах ЕС [4.3], определение значений ΔK или ΔR_T , выполняется индивидуально для каждого теплового включения по упрощенной схеме или путём расчёта 2 или 3-х мерных температурных полей. Влияние развития температурного поля каждого включения на температурное поле ограждающей конструкции в целом не учитывается. Основанием для разработки методик учёта влияния теплопроводных включений и теплотехнических неоднородностей в практике проектирования ограждающих конструкций служит европейский стандарт [4.4].

Подобный подход расчёта R_T^{np} использован в России при разработке новой редакции СНиП 23-2 «Тепловая защита зданий» [4.5]. Методика расчёта приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций разработана в НИИСФ [4.6].

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента или выделенной ограждающей конструкции рассчитывается по формуле

$$R_T^{np} = \frac{1}{K + \sum l_j \Psi_j + \sum n_k \chi_k} = \frac{1}{K + \sum \Delta K}; \quad (4.2)$$

где K – коэффициент теплопередачи по глади конструкции, Вт/(м²·°С); рассчитывается по известной формуле

$$K = \frac{1}{R_T^{усл}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_B} + \sum \left(\frac{\delta}{\lambda} \right)_S + \frac{1}{\alpha_H}}, \quad (4.3)$$

$R_T^{усл}$ – условное сопротивление теплопередаче по глади конструкции, м²·°С/Вт;

Ψ_j – удельные потери теплоты через линейную неоднородность j -го вида, Вт/(м²·°С);

l_j – протяженность линейной неоднородности фрагмента j -го вида, приходящаяся на 1 м² фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции, м/м²;

χ_k – удельные потери теплоты через точечную неоднородность k -го вида, Вт/°С;

n_k – количество точечных неоднородностей k -го вида, приходящаяся на 1 м² фрагмента теплозащитной оболочки здания или выделенной ограждающей конструкции, шт./м².

Дополнительные потери теплоты через теплотехнические неоднородности ограждающей конструкции выражаются формулой

$$\sum \Delta K = \sum l_j \Psi_j + \sum n_k \chi_k. \quad (4.4)$$

Определение величин Ψ_j и χ_k рекомендуется выполнять путём расчёта на ЭВМ или воспользоваться ранее определенными их значениями для типовых узлов ограждающих конструкций.

Данная методика позволяет на стадии проектирования оценить влияние теплотехнических неоднородностей на приведенное сопротивление теплопередаче расчётного участка ограждения.

4.2 Расчёт приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

При постановке задачи проектирования теплозащиты здания следует планировать получение результатов необходимых для последующей работы над проектом. К ним в первую очередь, относятся величины приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций каждого отапливаемого помещения здания, используемые для проектирования системы отопления. Второй задачей является оценка и получение данных для проектирования энергосберегающих мероприятий.

На современном уровне, основной особенностью развития отопительной и вентиляционной техники является возможность автоматического регулирования температуры внутреннего воздуха и остальных параметров микроклимата, как в конкретных помещениях, так и в целом в здании. Автоматизация инженерных систем зданий, также как и повышение теплозащиты ограждающих конструкций преследует одну цель – обеспечение требований внутреннего климата помещений.

В силу уникальности оборудования и программного обеспечения, затраты на системы автоматизации и их эксплуатацию могут быть весьма значительными. В тоже время, с весенними и осенними перетопами зданий, имеющими центральное теплоснабжение, справиться может только автоматика.

Повышение сопротивления теплопередаче ограждений так же затратно. Оно, вследствие массового использования теплоизоляционных материалов, ведёт к удорожанию строительства и снижению долговечности зданий.

При решении задач экономии теплоты в зданиях целесообразно повышение приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен до $R \approx 3,0 \dots 3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$. Это связано с тем, что увеличение толщины утеплителя вызовет конструктивные изменения всех узлов стены, в результате чего интенсифицируется перенос теплоты через теплопроводные включения. Данный вывод подтверждают результаты исследований теплопотерь через 1 м^2 ограждающей конструкции в зависимости от приведенного сопротивления теплопередаче, для климатических условий Москвы [4.7].

Различие в теплопотерях через ограждающую конструкцию при значениях приведенного сопротивления теплопередаче $R > 3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ небольшое (рис. 4.2), поэтому на удельный расход тепловой энергии для отопления здания изменение приведенного сопротивления теплопередаче стен в указанных пределах сказывается незначительно.

Характер зависимости, приведенной на рисунке 4.2, показывает, что чем выше достигнутый уровень теплозащиты, тем меньший эффект даёт дальнейшее его повышение.

Из выше изложенного вытекает, что повышение теплозащиты и автоматизацию инженерных систем зданий следует проектировать комплексно, на основании грамотного инженерного и экономического расчётов, иначе их результаты могут быть противоположны ожидаемым.

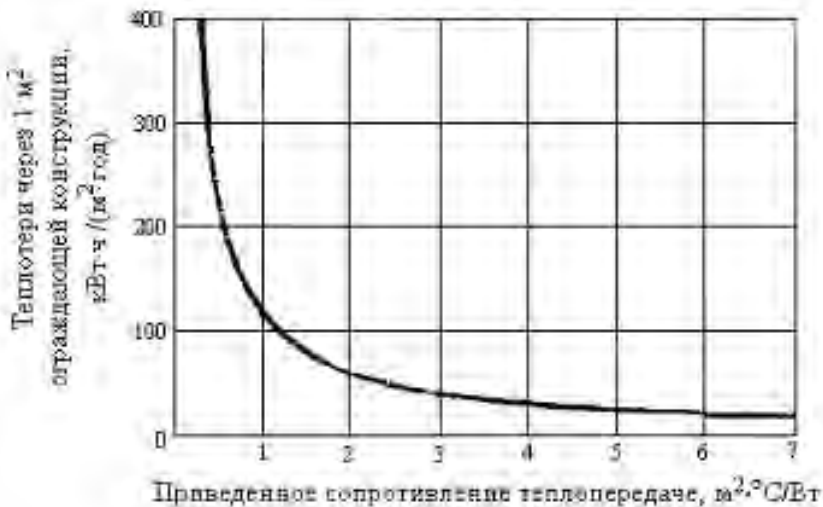


Рис. 4.2. График зависимости теплотерь через $1 m^2$ ограждающей конструкции от приведенного сопротивления теплопередаче для климатических условий Москвы

При использовании формулы (4.1) в расчётах теплотерь, величина приведенного сопротивления теплопередаче должна быть не менее нормативного значения $R_T^{np} \geq R_T^н$, принимаемого для данного вида ограждающей конструкции по действующим нормативным документам. Расчёт R_T^{np} может быть выполнен для ограждающей конструкции в целом или для характерного «расчётного участка», имеющего максимальное количество теплопроводных включений. В качестве «расчётного участка» может быть выбран участок наружной стены с проёмами и внутренними стенами, участок совмещенного покрытия с узлами сопряжения с наружными стенами, участок перекрытия отапливаемых подвалов и т.д. Полученные величины R_T^{np} «расчётного участка» принимаются за расчётные значения для каждого вида конструкции.

Подобный подход, несмотря на расширяющиеся возможности программного обеспечения, является наиболее реальным и малоаза-

тратным. Отсутствует необходимость напрямую расчётом определять приведенное сопротивление в целом каждой ограждающей конструкции здания. Этим обеспечивается поддержание требуемых нормативных теплозащитных характеристик и параметров микроклимата в основной части помещений здания. Для помещений с наружными ограждающими конструкциями, имеющими более высокие теплозащитные характеристики, обеспечение нормативных параметров микроклимата (недопущение перетопов) будет выполняться с помощью автоматического регулирования, как расхода, так и температуры теплоносителя системы отопления.

Определение приведенного сопротивления теплопередаче «расчётного участка» ограждающей конструкции со сложными теплопроводными включениями возможно по результатам расчётов температурных полей отдельных выделенных фрагментов с последующим усреднением полученных результатов по его поверхности. При выборе границ фрагментов следует учитывать взаимное влияние отдельных теплопроводных включений на температурное поле «расчётного участка».

Для принятого «расчётного участка» ограждающей конструкции с площадью внутренней поверхности F_{py} , можно записать

$$Q_{py} = Q_{фр_1} + Q_{фр_2} + \dots + Q_{фр_n}, \quad (4.5)$$

где Q_{py} – мощность теплового потока через расчётный участок, Вт;

$Q_{фр_1}, Q_{фр_2}, \dots, Q_{фр_n}$ – мощности теплового потока через выделенные фрагменты расчётного участка с теплопроводными включениями, Вт.

Т.е. при разбиении выбранного расчётного участка ограждающей конструкции на « n » характерных фрагментов и последующим определении сопротивления теплопередаче для каждого фрагмента, сопротивление теплопередаче расчётного участка конструкции в целом рассчитывается по формуле:

$$R_{T.IIP}^{py} = \frac{F_{\text{фр-1}} + F_{\text{фр-2}} + \dots + F_{\text{фр-n}}}{\frac{R_{\text{фр-1}}}{F_{\text{фр-1}}} + \frac{R_{\text{фр-2}}}{F_{\text{фр-2}}} + \dots + \frac{R_{\text{фр-n}}}{F_{\text{фр-n}}}}, \quad (4.6)$$

где $F_{\text{фр}}$ и $R_{\text{фр}}$ – площадь (м^2) и сопротивление теплопередаче ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$) n -го фрагмента расчётного участка ограждающей конструкции.

Определение сопротивления теплопередаче отдельных выделенных « n » фрагментов конструкций выполняется решением двумерной или трёхмерной задачи переноса теплоты. Для этого численно решаются дифференциальные уравнения стационарной теплопроводности вида 4.4 с граничными условиями III-рода:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_t \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_t \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_t \frac{\partial t}{\partial z} \right) = 0, \quad (4.7)$$

$$a_0 t_{\text{нов}} - t_{\text{ср}} = -\lambda_t \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (4.8)$$

где $t_{\text{нов}}$ – температура соответствующей поверхности ограждения, °C ;

$t_{\text{ср}}$ – температура среды, омывающей соответствующую поверхность, °C ;

λ_t – теплопроводность материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$;

a_0 – коэффициент теплоотдачи соответствующей поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Основы методов расчёта температурного (и влажностного) полей в строительной теплофизике заложены трудами: Богословского В.Н., Власова О.Е., Гагарина В.Г., Лыкова А.В., Мачинского В.Д., Одельского Э.Х., Перехоженцева А.Г., Ушкова Ф.В., Фокина К.Ф., Франчука А.У., Шкловера А.М. и других учёных. Наиболее распространённой методикой служит их численное решение в конечных разностях. Обусловлено это, прежде всего простотой аппроксимации производных в дифференциальных уравнениях. Однако методу конечных разностей присущи и определенные недостатки, к которым, прежде всего, относится сложность аппроксимации граничных

условий при наличии угловых точек на контуре исследуемой области, сложность учёта неоднородности материалов (в частности мелких деталей) и сложных геометрических форм. Указанного недостатка можно избежать при использовании более общего метода численного решения – метода конечных элементов [4.8, 4.9]. Метод конечных элементов является наиболее целесообразным при расчётах температурных полей узлов сложных строительных конструкций. Усовершенствованная методика компьютерного расчёта 3-х мерных стационарных полей ограждающих конструкций зданий, имеющих теплопроводные включения различной сложности, и позволяющая определить их приведенное сопротивление теплопередаче, изложена в работе [4.10].

Выполнение расчётов температурных полей конструкций является в той или иной степени приближенными. Точность результатов расчётов зависит от степени разбиения «расчётного участка» на элементарные участки и объёмы, от допустимой погрешности итерационных вычислений. Некоторые результаты расчётов приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен зданий приведены в работе [4.11].

Получив по решению уравнений (4.4) распределение температур по внутренней поверхности каждого из n -х фрагментов «расчётного участка» и используя известные заданные величины коэффициента теплообмена, определяются величины сопротивления теплопередаче каждого n -го фрагмента по формуле (4.9):

$$R_{fp_n} = R_{T_n} = \frac{t_B - t_H}{\alpha_B \cdot t_B - \tau_{B_n}^{cp}}, \quad (4.9)$$

где α_B – принятый коэффициент теплообмена внутренней поверхности фрагмента ограждающей конструкции, Вт/(м² °С);

$\tau_{B_n}^{cp}$ – средняя температура на внутренней поверхности n -го фрагмента ограждающей конструкции, °С.

Особенностью формулы (4.6) является то, что при вычислении приведенного сопротивления теплопередаче расчетного участка ограждения можно учитывать перенос теплоты не только через то-

чные теплопроводные включения, но и через фрагменты конструкций с краевыми зонами оконных, балконных и др. проёмов.

На рисунке 4.3,а представлен расчётный участок наружной стены с оконным проёмом площадью $F_{\text{пу}} = H \cdot L$, м². На поверхности расчётного участка выделяется фрагмент №1 с площадью $F_1 = a \cdot b$, м², без учёта площади примыкающего к нему откоса проёма $F_{\text{от}_1} = a \cdot c$, м². Оставшаяся площадь расчётного участка разбивается на фрагменты 2 и 3.

По известным геометрическим размерам выполняется расчёт температурного поля фрагмента 1, с включенными в него откосом проёма и частью оконного блока (рис. 4.3, б)

По результатам расчёта температурного поля тепловой поток через выделенный фрагмент №1 «расчётного участка» равен:

$$Q_1 = \frac{F_1}{R_{T,1}^{\text{пр}}} (t_B - t_H) \quad (4.10)$$

где $R_{T,1}^{\text{пр}}$ – сопротивление теплопередаче фрагмента №1 наружной стены, определенное по формуле (4.9), м²·°C/Вт.

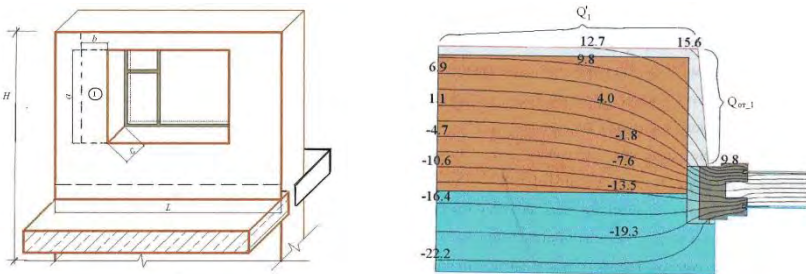


Рис. 4.3. Расчетный участок ограждающих конструкций:

а – схема расчётного участка наружной стены;

б – температурное поле сечения наружной стены по фрагменту 1

При расчёте температурного поля фрагмента №1 учитывались подвод теплоты через площадку стены F_1 и через площадь откоса $F_{\text{от}_1}$, поэтому величина теплового потока через выделенный фраг-

мент №1 фактически равна) сумме тепловых потоков $Q_1 = Q'_1 + Q_{OT_1}$, а выражение (4.10) можно записать в виде:

$$Q_1 = Q'_1 + Q_{OT_1} = \frac{F_1}{R_{T,1}^{np}} t_B - t_H . \quad (4.11)$$

С помощью преобразований уравнения (4.11) получим

$$\left(\frac{F'_1}{R_{T,ГЛ}} + \frac{F_{OT_1}}{R_{T,OT_1}} \right) t_B - t_H = \frac{F_1}{R_{T,1}^{np}} t_B - t_H$$

или

$$R_{T,1} = \frac{F_1}{Q_1} t_B - t_H = \frac{F_1}{\frac{F'_1}{R_{T,ГЛ}} + \frac{F_{OT_1}}{R_{T,OT_1}}} . \quad (4.12)$$

Здесь $R_{T, OT,1}$ – условное сопротивление теплопередаче через площадь $a \times c$, м откоса проёма, которое может быть определено как

$$R_{T,OT_1} = \frac{F_{OT_1}}{\frac{F_1}{R_{T,1}} - \frac{F_1}{R_{T,ГЛ}}} . \quad (4.13)$$

или по уравнению (4.9), а $R_{T,ГЛ}$ – сопротивление теплопередаче по «глади стены».

Влияние переноса теплоты через откос проёма на величину сопротивления теплопередаче фрагмента 1 может быть также определено с использованием коэффициента теплотехнической однородности

$$\tau_1 = \frac{R_{T,1}}{R_{T,ГЛ}} . \quad (4.14)$$

Для фрагмента 2 площадью $F_2 = A \times L$, без учёта площади откосов проёма (рис. 4.4) приведенное сопротивление теплопередаче

$R_{T.2}^{np}$ с учётом влияния переноса теплоты через откосы, определяется по выражению:

$$R_{T.2}^{np} = \frac{F_2}{O_2} t_B - t_H = \frac{F_2}{\frac{F_2}{R_{T.ГЛ}} + \frac{F_{OT_2}}{R_{T.OT_2}}}, \quad (4.15)$$

где F_{OT_2} – площадь откосов оконного проёма фрагмента 2, м².

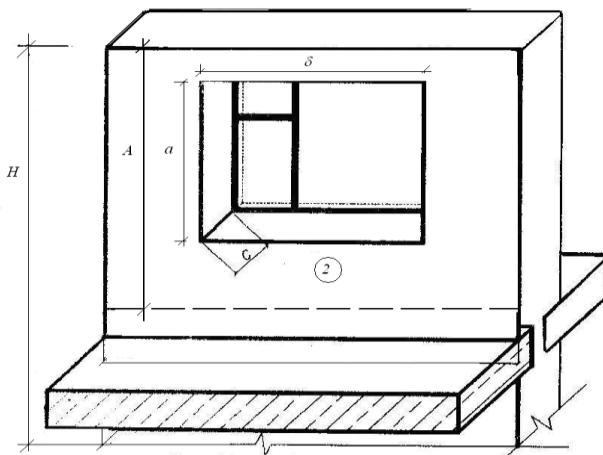


Рис. 4.4. Схема фрагмента 2 расчётного участка наружной стены

Определение приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента 3 расчётного участка площадью $F_3 = L \times N$, м² с учётом межэтажного диска перекрытия (рис. 4.5), выполняется по формуле:

$$R_{T.3} = \frac{F_3}{O_3} t_B - t_H = \frac{F_3}{\frac{F_3}{R_{T.ГЛ}} + \frac{F_3'}{R_{ПЕР}} + \frac{F_3''}{R_{ПЕР}}}. \quad (4.16)$$

где $F_3' = F_3'' = M \times L$ – площадь поверхности пола и потолка, м²;

$R_{ПЕР} = R_{ПЕР}'$ – сопротивление теплопередаче участка диска фрагмента 3, м²·°C/Вт.

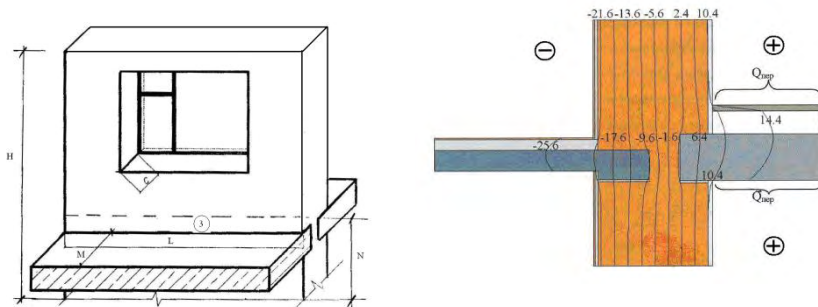


Рис. 4.5. Расчетный участок:
 а – схема фрагмента 3 расчётного участка наружной стены,
 б – температурное поле сечения наружной

Коэффициент технической однородности фрагмента 3 равен

$$r_3 = \frac{R_{T.3}}{R_{T.ГЛ}} . \quad (4.17)$$

Определение приведенного сопротивления теплопередаче «расчётного участка» наружной стены с учётом переноса теплоты через откосы проёма и междуэтажный диск перекрытия выполняется по формуле

$$R_{T.ПР}^{py} = \frac{F_{py}}{\frac{F_{py}}{R_{T.ГЛ}} + \frac{F_{OT}}{R_{OT}} + \frac{F_3'}{R_{ПЕР}} + \frac{F_3''}{R_{ПЕР}}} . \quad (4.18)$$

При оценке принимаемых конструктивных решений каждого вида ограждающих конструкций величину приведенного сопротивления теплопередаче с учётом теплопроводных включений удобно для «расчётного участка» определять как

$$R_{T.ПРИ}^{py} = R_{T.ГЛ} \cdot r_n \cdot r_{n+1} \cdot r_{n+2} \cdot \dots , \quad (4.19)$$

где r_n – коэффициент теплотехнической однородности теплопроводных включений.

Пример. Выполнить расчёт приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен жилого дома с уровнем теплозащиты $R_T = 2,00 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Наружные стены здания из ячеистобетонных блоков ($\delta = 400 \text{ мм}$, $\rho = 500 \text{ кг}/\text{м}^3$, $W = 12 \%$, $\lambda_{\text{кл}} = 0,205 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$) на клеевом растворе с наружной штукатуркой полимерцементным раствором толщиной 4 мм и внутренней известково-песчаным раствором толщиной $\delta_{\text{шт}} = 10 \text{ мм}$. Над оконными проёмами стены имеют перемычки ($\rho = 700 \text{ кг}/\text{м}^3$). Наружные стены в уровне дисков междуэтажные перекрытий, а также откосы проёмов снаружи стен, дополнительно утеплены плитами минераловатными толщиной $\delta = 50 \text{ мм}$.

Фрагмент плана типового этажа с выделенным «расчётным участком» наружных стен показан на рис. 4.6. Сопротивление теплопередаче по «глади» стены – $R_{T,гг} = 2,127 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Результаты расчётов температурных полей фрагментов и сечений наружных стен показаны на рис. 4.7 – 4.9. Удельные мощности теплового потока через участки наружных стен приведены в табл. 4.1, приведенные сопротивления теплопередаче и коэффициенты теплотехнической однородности в – табл. 4.2.



Рис. 4.6. Фрагмент плана типового этажа с расчётным участком наружной стены

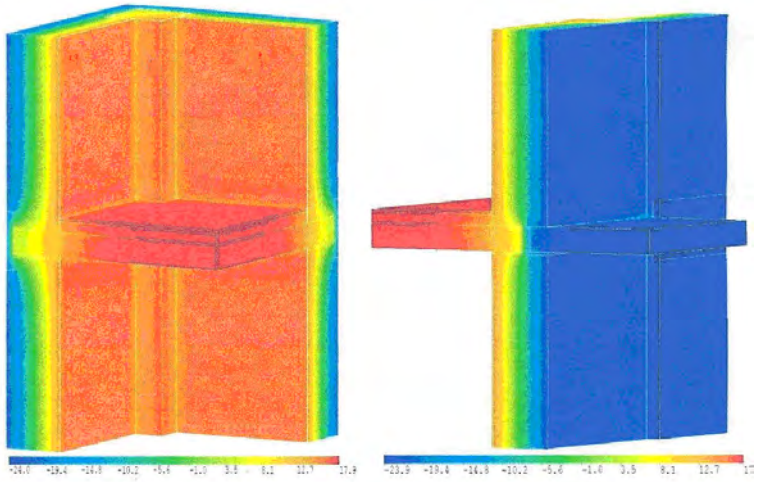


Рис. 4.7. Температурные поля участков наружной стены в местах сопряжений колонн с дисками перекрытий

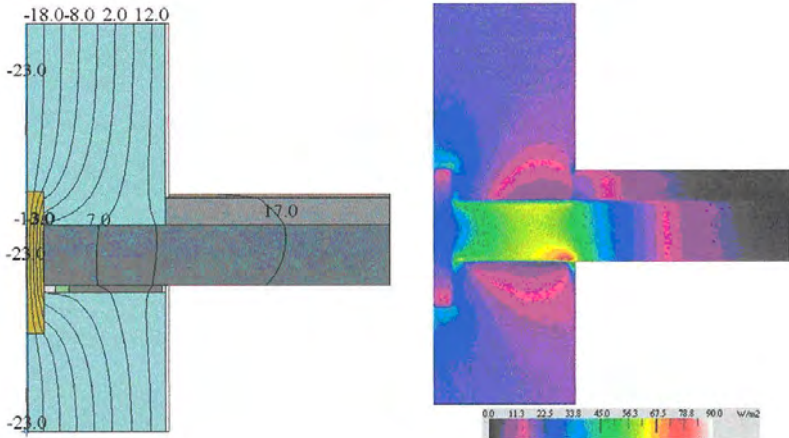


Рис. 4.8. Температурное поле и распределение плотности теплового потока по сечению наружной стены в месте сопряжения кладки с перекрытием

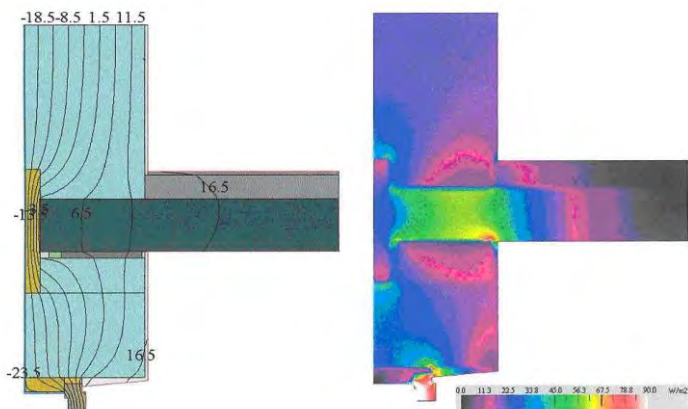


Рис. 4.9. Температурное поле и распределение плотности теплового потока по сечению наружной стены в месте сопряжения кладки с перекрытием в уровне оконного проёма

Таблица 4.1

Результаты расчётов удельной мощности теплового потока

Наименование расчётного участка ограждающих конструкций							
Внутренняя поверхность наружной стены		Поверхность откосов проёма наружной стены		Поверхность потолка междуэтажного перекрытия		Поверхность пола междуэтажного перекрытия	
$F_{ру}, \text{м}^2$	$q, \text{Вт/м}^2$	$F_{от}, \text{м}^2$	$q, \text{Вт/м}^2$	$F_{пер-В}, \text{м}^2$	$q, \text{Вт/м}^2$	$F_{пер-Н}, \text{м}^2$	$q, \text{Вт/м}^2$
10,72	21,69	0,963	24,90	3,584	16,75	3,584	5,13

Таблица 4.2

Результаты расчётов приведенного сопротивления теплопередаче

Приведенные сопротивления теплопередаче и коэффициенты теплотехнической однородности наружной стены			
Приведенное сопротивление теплопередаче с учётом влияния откосов проёма стены		Приведенное сопротивление теплопередаче с учётом влияния откосов проёма и участков междуэтажного перекрытия	
$R_{Т.ПР}^{от}$, м ² ·°С/Вт	$r_2 = R_{Т.ПР}^{от} / R_{Т.ПР}$	$R_{Т.ПР}^д$, м ² ·°С/Вт	$r_2 = R_{Т.ПР}^д / R_{Т.ПР}$
1,755	0,907	1,344	0,694

Результаты расчётов показывают на наличие значительных стоков теплоты через участки междуэтажного перекрытия и откосов проёмов, несмотря на их дополнительную теплозащиту (снаружи) минераловатными плитами. При это, коэффициент теплотехнической однородности с учётом влияния откосов проёма наружной стены, а также участков междуэтажного перекрытия $r_2 = 0,694$, а приведенное сопротивление теплопередаче – $R_{Т.ПР}^д = 1,344$ м²·°С/Вт, что значительно меньше величины сопротивления теплопередаче – $R_{Т.ПР} = 2,0$ м²·°С/Вт.

4.3 Теплотехнические особенности подвалов и крыш

4.3.1 Подвальные помещения

Большинство эксплуатируемых зданий имеют подвальные помещения, ограждения которых контактируют с грунтом. Подвал или подвальный этаж представляет помещение, отметка пола которого ниже отметки земли более чем на половину его высоты. В подвалах одно- и двухэтажных жилых домов часто размещают жилые и подсобные помещения, в многоэтажных – технические и коммунальные службы. В общественных зданиях подвалы могут быть использованы для размещения различных мастерских и организаций.

В современном строительстве с целью экономии территорий, распространяется практика заглубления общественных зданий на несколько этажей в грунт. Подвальные эксплуатируемые помещения отапливаются, что определяет необходимость их теплоизоляции для снижения теплопотерь, обеспечения тепловлажностного режима, исключаящего переувлажнение ограждающих конструкций.

Многие здания не имеют отапливаемых подвальных помещений. Так в жилых десятиэтажных зданиях из блок-комнат серии 3А-ОПБ-9, 1996...1998 годов строительства устроены неотапливаемые технические подвалы, в которых размещаются тепловые узлы и инженерные сети. Перекрытия над подвалами теплоизолированы минеральной ватой с толщиной слоя $\delta \approx 200$ мм и имеют сопротивление теплопередаче $R_T > 3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Несмотря на наличие теплоизоляции на перекрытии, пол первого этажа на ряде зданий «холодный», а температура воздуха в жилых помещениях в зимний период года $t_b = 15...16 \text{ °C}$. Причиной охлаждения перекрытия являются дефекты стыковых соединений строительных конструкций со стороны подвала и на уровне нулевой отметки наружных ограждений (рис. 4.10).

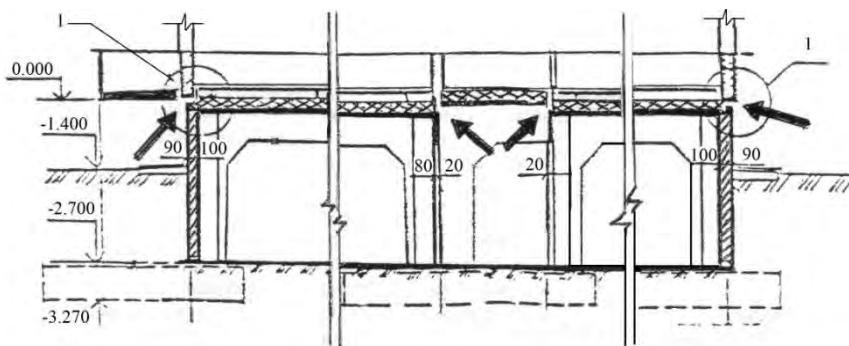


Рис. 4.10. Схема технического подвала:
1 – узел стыковки блок-комнат на отметке 0.000

Места проникновения холодного воздуха в перекрытие подвала на схеме указаны стрелками. Чтобы исключить поступление воздуха необходимо выполнить ремонт стыковых соединений блок-комнат и других элементов ограждающих конструкций наружных

стен ниже и выше нулевой отметки, а также стыковых соединений конструкций перекрытия со стороны подвала путём запенивания или дополнительной теплоизоляции.

Стены отапливаемых подвалов выполняются из сборных элементов или монолитно. Теплоизоляционный слой обычно размещается на наружной или внутренней поверхности фундаментов. Встречаются варианты ограждающих конструкций со средним теплоизоляционным слоем или с двухсторонней теплоизоляцией. Для предохранения стен подвалов от увлажнения поверхностными водами устраиваются отмостки шириной не менее 0,8 м с уклоном от здания 0,02...0,01. Вертикальные и горизонтальные участки фундаментов защищаются гидроизоляцией.

Несмотря на выполнение защитных мероприятий наблюдается увлажнение фундаментов, сопровождающееся просадками, трещинообразованием, разрушением железобетонных блоков и т.д. Поступление влаги в конструкции подвальных помещений происходит в следствии:

- капиллярного подъёма по фундаменту;
- конденсации водяного пара из воздуха;
- проникновения атмосферных осадков через грунт.

Во вновь возведенных зданиях в ограждениях присутствует также строительная влага.

Увлажнение конструкций подвалов влечёт изменение интенсивности переноса теплоты из помещений в окружающую среду, а, следовательно, и увеличение их теплопотерь. Величина теплопотерь зависит от термических сопротивлений ограждающих конструкций подвалов и примыкающего массива грунта.

Учитывая переменный характер внешних атмосферных условий тепловлажностный режим системы «подвальное помещение – массив грунта» следует характеризовать как нестационарный. Изменяющимися факторами являются температура наружного воздуха, фазовые переходы грунтовой влаги, толщина снежного покрова и т.д. Все они влияют на теплофизические характеристики грунта и строительных материалов.

Исследование теплового режима, процессов переноса массы, а также теплопотерь через ограждения заглубленных и подвальных помещений посвящены работы Аше Б.М. [4.12], Щукина О.Г. [4.13], Дячека П.И. и Макаревича С.А. [4.14, 4.15], Владимирова Р.В.

[4.16], Сотникова А.Г. [4.17] и др. В ранних работах рассматривались задачи стационарного режима переноса теплоты через стены и полы заглубленных в грунт зданий. На их основании разработаны упрощённые методики расчёта. Наиболее известна методика расчёта теплопотерь заглубленных частей здания по зонам – полосам 2-метровой ширины по периметру здания и условным коэффициентам теплопередачи этих зон, отнесённых к наружной температуре. Данная методика включена в нормативные документы Республики Беларусь [4.19] и используется для выполнения расчётов по формуле (4.1). К недостаткам методики относятся:

- принятие коэффициентов теплопередачи постоянной величины вне зависимости их от влажности и температуры;

- не учёт тепловой инерции массива грунта, которая практически приравнивается к тепловой инерции наружных стен, так как расчётная температура наружного воздуха в формуле (4.1) принимается равной средней температуре наиболее холодной пятидневки;

- отсутствие учёта сезонного промерзания грунта вне контура здания и т.д.

Учёт нестационарности физических процессов переноса теплоты в заглубленных и подвальных помещениях предложен в методике Гиндояна А.Г. [4.20]. На основании аналитического решения дифференциальных уравнений стационарной и нестационарной теплопроводности для двумерной области были получены зависимости для расчёта стационарной и нестационарной составляющих теплопотерь через ограждения здания.

$$Q_T = Q_C + Q_H. \quad (4.20)$$

Стационарная составляющая Q_C находится как функция перепада температур поверхности ограждения и среднегодовой температурой поверхности грунта за пределами здания, коэффициента теплопроводности грунта, ширины здания, толщины наружной стены здания.

А нестационарная составляющая Q_H определяется амплитудой годовых колебаний температуры поверхности грунта, значениями теплофизических характеристик грунта, толщиной наружной стены и другими факторами.

Используемый подход основан на принципе суперпозиции, что позволяет уточнить влияние нестационарности процесса на действитель-

ные теплотери. В тоже время в данной методике приняты упрощения. К ним относится равенство теплофизических характеристик материалов ограждений и грунта, косвенный учёт фазовых переходов влаги и другие. Из-за принятых упрощений в результаты расчётов температурных полей, в зонах ограждений прилегающих к грунту, вносятся искажения, что влияет на результаты расчётов теплотери.

Принципиально иной подход к формулировке теплофизической задачи и разработке инженерной методики определения расчётных потерь теплоты через полы и заглубленные участки стен зданий в зимний период года предложен в работах [4.14, 4.15]. Рассматривается трехмерная задача нестационарной теплопроводности с учётом фазовых превращений. Расчётная схема заглубленной части зданий показана на рис. 4.11.

Уравнение переноса теплоты имеет вид

$$C_v \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + Q_\phi, \quad (4.21)$$

где $C_v = C_v(x, y, z, t)$, $\lambda = \lambda(x, y, z, t)$,
 $t = t(x, y, z, \tau)$, $Q_\phi = Q_\phi(x, y, z, t)$.

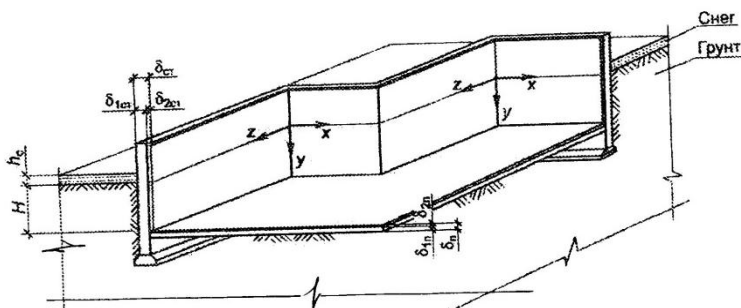


Рис. 4.11. Расчётная схема заглубленной части здания:

x, y, z – координатные оси; $\delta_{1ст}, \delta_{2ст}$ – толщина конструктивных слоев стены в расчётной области; h_c – высота снежного покрова; H – глубина заложения поверхности пола по отношению к отметке поверхности земли;

$\delta_{1п}, \delta_{2п}$ – толщина конструктивных слоев пола

Граничные условия учитывают особенности теплообмена на наружной поверхности стены и прилегающего массива грунта, наличие снежного покрова. Теплофизические характеристики приняты как эффективные значения в зависимости от плотности, влажности, льдистости грунта. Начальные условия принимаются приближенно. Расчёт выполняется для нескольких годовых циклов до тех пор, пока не устранялось влияние начальных условий на формирующееся температурное поле. Достоверные результаты получаются после расчёта двух-трёх годовых циклов изменения наружных климатических параметров.

Проверка соответствия принятой задачи реальным условиям теплового режима эксплуатируемых подвальных помещений была проведена натурными экспериментами на трёх объектах общественного и сельскохозяйственного назначения.

Численные решения уравнения 4.21 позволили сформулировать методику расчёта теплового потока на внутренней заглубленной части стены или пола по грунту. Его локальные значения предлагается определять по формуле

$$q = q_c + q_n \frac{k_m}{\rho_n} + q_n \frac{k_m}{\rho_n}, \quad (4.22)$$

где q_c – стационарная составляющая теплового потока, обусловленная действием разности между расчётной температурной внутреннего воздуха для холодного периода года и среднегодовой температурой наружного воздуха, Вт/м²;

q_n – нестационарная составляющая теплового потока, формируемая действием дополнительной разности температур, обусловленной отклонением среднемесячных температур от среднегодовой температуры наружного воздуха, Вт/м²;

q_n – нестационарная составляющая теплового потока, формируемая кратковременными (от 5 до 7 суток) случайными процессами отклонения среднесуточных температур наружного воздуха от среднегодовой температуры наружного воздуха, Вт/м²;

k_m – поправочный коэффициент, учитывающий влияние внутреннего угла на значение тепловых потоков;

p_n, p_n – поправочные коэффициенты, учитывающие влияние снежного покрова на значение потерь теплоты через полы по грунту и заглубленные части зданий.

Расчёт значений величин, входящих в формулу (4.22), осуществляется по рекомендациям [4.21].

Суммарный тепловой поток через расчётную область заглубленной части стены или пола по грунту определяется как

$$Q = \int_F q dF, \quad (4.23)$$

где F – площадь рассматриваемой области, м².

Следует отметить, что методика, предложенная в [4.14, 4.15, 4.21], достаточно сложна и требует от её пользователей подготовки.

Методика расчёта теплопотерь заглубленной части здания, основанная на использовании решений задач стационарного переноса теплоты в телах простой геометрической формы предложена в [4.17]. Рассматривается тепловое взаимодействие двух тел «элемента здания (пластина, цилиндр и т.д.)» с бесконечным или полуограниченным массивом грунта. Пример расчётной схемы задачи показан на рис. 4.12.

Решение указанной задачи проводится с использованием формул решения частных примеров, приведенных в монографии [4.22].

В общем случае, для ограждений подземной части здания (стена, пол) учитывают все слои конструкции, кроме $1/\alpha_n$ для пола. Тогда общее термическое сопротивление, отнесённое к температуре наружного и внутреннего воздуха, равно:

$$R_{\text{огр}} = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}} \cdot F}{Q} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{\text{гр}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}. \quad (4.24)$$

Данная методика учитывает термическое сопротивление стен пола, а также теплопроводность грунта. Для более плотного и влажного грунта его теплопроводность и теплопотери растут, при этом влияние грунта становится более заметным.

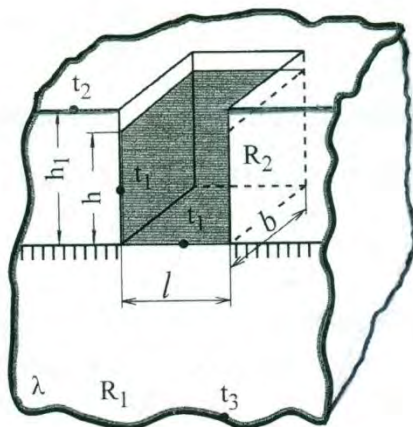


Рис. 4.12. Расчётная схема подземной части здания, разделённая на две части – бесконечную пластину и полуограниченный массив:
 t_1 и t_2 – температуры изотермической поверхности конструкции, °С;
 l , b , h , h_1 – геометрические размеры, м; R_1 , t_3 – термическое сопротивление и температура грунта, (м²·°С)/Вт и °С; R_2 – термическое сопротивление грунта между конструкцией и атмосферой, (м²·°С)/Вт

При определении термического сопротивления следует учитывать только те слои конструкции, которые надёжно защищены гидроизоляцией от грунтовой воды или влажного грунта.

Анализ работ по решению задачи расчёта теплопотерь через заглубленные части зданий показывают, что простой достоверной методики на данный момент не предложено. Поэтому в нормативной документации попрежнему используется методика расчёта теплопотерь заглубленных частей зданий по зонам с условным коэффициентом теплопередачи этих зон.

4.3.2 Крыши

Верхними конструктивными элементами зданий, защищающими их от атмосферных осадков, служат крыши. Они подразделяются на чердачные и совмещённые (бесчердачные), эксплуатируемые и неэксплуатируемые.

Крыша состоит из двух основных элементов: несущих конструкций и кровли. К несущим конструкциям относятся чердачные перекрытия, фермы, стропила и другие устройства, воспринимающие и передающие на стены нагрузки от массы самой крыши, снега, ветра и др.

Кровли из рулонных материалов, асбестоцементных листов, черепицы, листовой стали, защищают поверхности конструкций крыши от климатических воздействий. Они подразделяются на кровли пониженной воздухопроницаемости (металлические, рулонные и мастичные), при которых необходимо устройство эффективной вентиляции и в некоторых случаях технических чердаков, и повышенной воздухопроницаемости (из асбестоцементных волнистых листов и плоских плиток, черепичные), при которых вентиляция чердаков обеспечивается через неплотности между элементами кровельного покрытия.

В современных зданиях, в основном, используются три основных типа крыш из железобетонных элементов:

- бесчердачные с теплоизолирующим слоем из легкого бетона, засыпного утеплителя или плотных минераловатных плит (вентилируемые или невентилируемые);
- чердачные с холодным чердаком и теплоизоляцией перекрытия верхнего этажа;
- чердачные с тёплым чердаком и теплоизоляцией покрытия.

Бесчердачные крыши, примеры которых приведены на рис. 4.13, могут быть невентилируемыми (сплошными) и вентилируемыми с воздушными прослойками.

Основными элементами совмещённой невентилируемой крыши являются несущая железобетонная плита, пароизоляция, теплоизоляция, выравнивающая стяжка или тонкостенная железобетонная плита и гидроизоляционный ковёр с защитным покрытием.

В вентилируемых совмещённых крышах между слоями теплоизоляции и верхним теплоизоляционным покрытием, уложенным по железобетонным плитам, предусмотрены воздушные прослойки. Площадь приточных отверстий (продухов) прослоек должна быть не менее $1/500$ площади горизонтальной проекции покрытия.

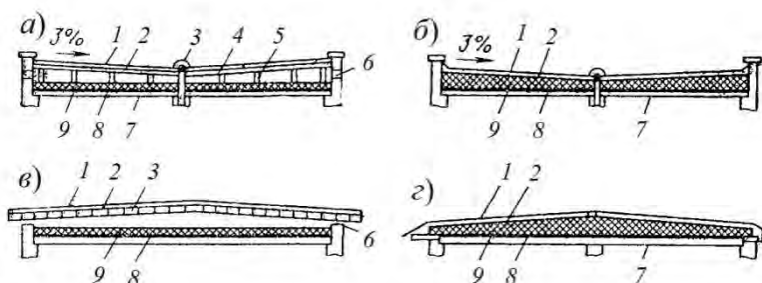


Рис. 4.13. Схемы совмещённых крыш:

а – с внутренним водостоком вентилируемая; *б* – то же, невентилируемая;
в – с наружным водостоком вентилируемая; *г* – то же, невентилируемая;
 1 – защитный слой кровельного покрытия; 2 – гидроизоляционный рулонный ко-
 вёр; 3 – водоприёмная воронка; 4 – железобетонные панели; 5 – опорные
 столбики; 6 – вентилируемые продухи; 7 – несущее основание; 8 – пароизоляция;
 9 – теплоизоляция

В Республике Беларусь в 1960...1980 годы велось строительство жилых крупнопанельных и из блок-комнат зданий с совмещёнными вентилируемыми покрытиями. Эти дома серий 1-464 А, 1-464 А-77, 3А-ОПБ-5-VII и др.

Совмещённая вентилируемая крыша дома серии 1-464 А представляет собой панель-пакет, состоящий из двух аглопоритобетонных ребристых плит-скорлуп переменного сечения, обращённых рёбрами внутрь (рис. 4.14).

Сплошная вентилируемая воздушная прослойка в совмещённом покрытии предназначалась для борьбы с накоплением влаги в конструкции. Однако практика эксплуатации зданий с совмещёнными вентилируемыми крышами выявила наличие в них отрицательных сторон. Наиболее уязвимые элементы крыш связаны с системой их вентилиации. К ним относятся стыки между панелями, где устройство канала для пропуска воздуха затрудняет качественно выполнить герметизацию; воздухозаборные отверстия, необходимость защиты которых от попадания дождевой влаги с помощью жалюзийных решёток, уменьшает сечение вентканалов и объёмы поступающего воздуха.

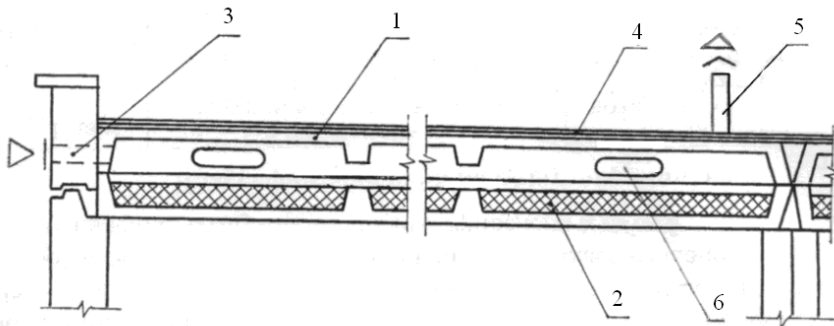


Рис. 4.14. Схема совмещённого вентилируемого покрытия:

- 1 – аглопоритобетонная ребристая плита; 2 – минераловатные плиты, обёрнутые в пергамин; 3 – приточное вентиляционное отверстие; 4 – рубероидный ковёр; 5 – вентиляционная вытяжка; 6 – отверстия для движения воздуха в боковых стенках панелей

Кроме того, наблюдаются протечки покрытий в период зимних оттепелей и весенние протечки при переходе к положительным температурам наружного воздуха, пониженные теплотехнические характеристики в местах заделки пазух между рёбрами плит и при-
мыканиях к вентшактам.

Увеличение количества вентиляционных отверстий, ремонты кровельного ковра на аварийных совмещённых крышах зданий к ощутимым положительным результатам не приводит. Для ремонта вентилируемых крыш была разработана технология с применением дополнительной теплоизоляции из пеноизола запеняемого в пространство между плитами. Заливка дополнительного слоя вспененного пеноизола осуществляется через отверстия, подготавливаемые в верхней плите крыши. Обследование совмещённых покрытий после годичной эксплуатации показало, что дополнительная теплоизоляция из уложенного пеноизола имеет массовую влажность до $w = 100 \%$, что превышает его предельно допустимую влажность в $w = 40 \%$ [4.23, 4.24]. При вскрытии покрытий на внутренней поверхности верхних плит обнаружен конденсат водяного пара, а на рубероиде вкладышей и в минеральной вате присутствует капельная влага. Полное запенивание воздушной прослойки покрытия пе-

ноизолом выполнить не удаётся. Из-за усадки пеноизола образуются воздушные зазоры в 10–130 мм между верхней плитой и поверхностью теплоизоляции. При выполнении запенивания не обеспечивается равномерность плотности слоя пеноизола. Плотность отобранных образцов в сухом состоянии составляла 6–15 кг/м³ при расчётной марке «20».

Указанные дефекты существенно влияют на теплозащитные качества дополнительно теплоизолированных покрытий, снижая их величину сопротивления теплопередаче на 20...30 %.

Наиболее рациональным способом ремонта совмещённых вентилируемых покрытий является изменение конструкции кровли путём перевода их в невентилируемые совмещённые с воздушной замкнутой прослойкой и дополнительной теплоизоляцией верхней плиты, а также панели парапета со стороны воздушной прослойки или его наружной стороны.

Для выполнения дополнительной теплоизоляции наиболее эффективно использование напыляемого пенополиуретана плотностью $\rho \approx 60 \text{ кг/м}^3$. Утеплитель, например, пенополиуретан ППУ-Н-ОС-60, наносится толщиной до 30 мм, что позволяет обеспечить увеличение сопротивления теплопередаче на $1,1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$. Поверхность пенополиуретана защищается от атмосферных воздействий путём нанесения слоя мастики или гидроизоляционного покрытия.

Бесчердачные плоские крыши сплошного сечения могут быть с ограниченным хождением (неэксплуатируемые) и эксплуатируемые под пешеходные нагрузки. Расположение слоёв кровель в неэксплуатируемых и эксплуатируемых крышах показаны на рис. 4.15 и 4.16.

Бесчердачные крыши подвергаются с внутренней и наружной сторон воздействиям теплоты и холода, ветра, дождя и снега, что определяет резкую перестройку их теплового режима в условиях эксплуатации. Годовые амплитуды колебания температуры на поверхности гидроизоляционного ковра могут достигать 100 °С. Резкие колебания температур существенно влияют на водопроницаемость покрытия, на образование конденсата по его сечению, на влажность теплоизоляционного материала, что проявляется в снижении его теплозащитных качеств.

Надёжность плоских совмещённых покрытий также определяется массой влаги, накапливаемой в зоне конденсации конструкции в холодный период года.

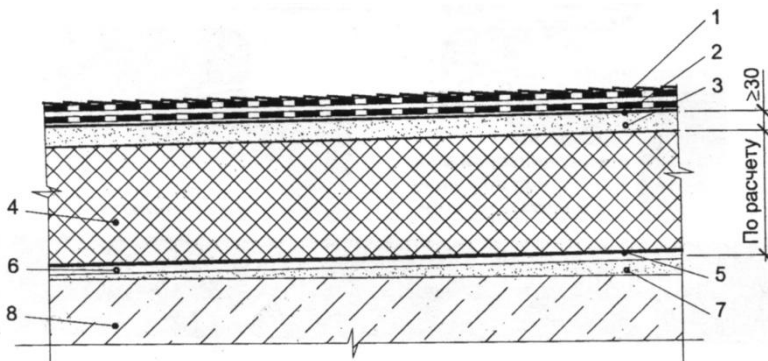


Рис. 4.15. Неэксплуатируемая кровля с теплоизоляцией и сплошной наклейкой водоизоляционного ковра:

- 1– водоизоляционный ковёр; 2– грунтовка; 3– стяжка; 4– теплоизоляция; 5– пароизоляция; 6– выравнивающая стяжка (затирка); 7– разуклонка из лёгкого бетона; 8– несущая конструкция

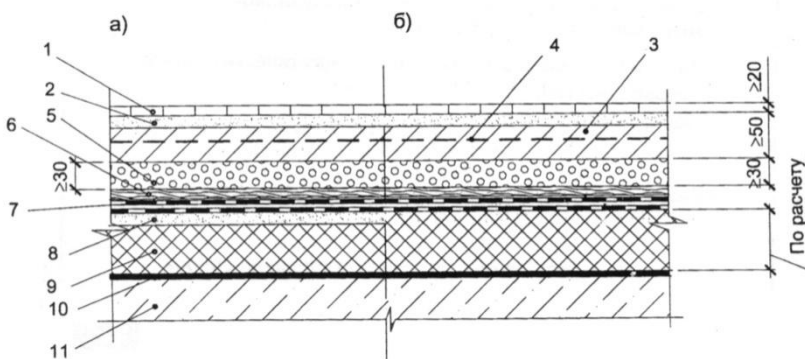


Рис. 4.16. Эксплуатируемая под пешеходные нагрузки кровля с плиточным полом:

- а* – со стяжкой по теплоизоляции; *б* – по жёсткой плитной теплоизоляции;
 1– плиточный пол; 2– раствор; 3– подготовка из мелкозернистого бетона;
 4– арматурные сетки с ячейкой не более 100×100 мм;
 5– демпферно-дренирующий слой крупнозернистого песка; 6– геотекстиль;
 7– водоизоляционный ковёр; 8– стяжка; 9– теплоизоляция; 10– пароизоляция;
 11– несущая конструкция

Ограничение количества влаги поступающей в покрытие из помещений может быть достигнуто устройством качественного пароизоляционного слоя.

Теплозащитные качества крыш обеспечиваются качественной теплоизоляцией их наружных ограждений. При проектировании кровель следует руководствоваться рекомендациями по их устройству, изложенными в [4.25], а теплотехнический расчёт выполнять в соответствии с требованиями [4.26]. Коэффициент теплопередачи и сопротивление теплопередаче для участка покрытия рассчитываются по уравнению (4.3).

Широкое распространение имеют скатные крыши, защищающие чердачные помещения зданий, используемые под жильё или общественные службы. Вариант устройства карниза кровли мансардного этажа показан на рис. 4.17.

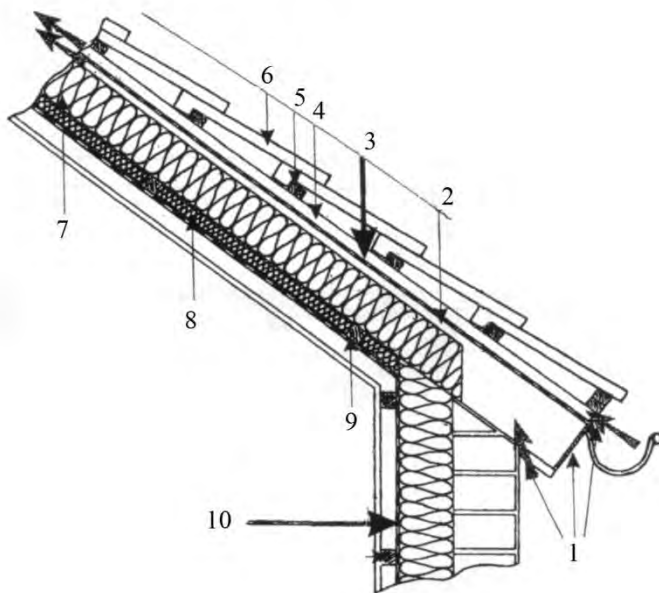


Рис. 4.17. Кровельное покрытие мансардного этажа:

7 – вентиляционные решётки; 2 – нижний воздушный канал; 3 – диффузионная или антиконденсатная плёнка; 4 – верхний воздушный канал; 5 – обрешётка; 6 – металлочерепица; 7 – верхний слой теплоизоляции; 8 – нижний слой теплоизоляции; 9 – рейки; 10 – пароизоляционная плёнка

Вентилируемые скатные крыши имеют специальные вентиляционные каналы. Как правило, их два – верхний и нижний. Через верхний канал удаляются осадки и атмосферная влага, попавшая под кровельное покрытие. Благодаря вентиляции деревянные конструкции постоянно проветриваются, что и обеспечивает их долговечность. Через нижний вентиляционный канал удаляется влага, проникающая в утеплитель из помещения. Чтобы избежать перемещения влаги в утеплитель необходима пароизоляция со стороны внутреннего помещения и наличие достаточного по площади сечения нижнего вентиляционного канала.

Для обеспечения влажностного режима скатных крыш используются подкровельные и паронепроницаемые плёнки, предназначенные для образования защитного слоя с внутренней стороны теплоизоляции подкровельного пространства. Подкровельные диффузионные плёнки применяются для защиты от проникновения внешней дождевой и снеговой влаги, пыли и ветра во внутреннее пространство объекта. Благодаря её диффузионной способности, обеспечивается возможность выхода водяных паров, уходящих из внутренних помещений, через плёнку до внешнего пространства объекта. Плёнка предназначена для наклонных вентиляруемых подкровельных чердачных конструкций.

При устройстве холодного чердака, его перекрытие может быть выполнено с использованием железобетонных плит с дополнительной теплоизоляцией или с применением комплексных панелей. На рис. 4.18 показан разрез холодного чердака здания из сборных железобетонных изделий.

Комплексные панели имеют теплоизоляционные вкладыши из минераловатных изделий, заключённых в оболочки из полиэтиленовой плёнки.

При традиционном устройстве перекрытия холодного чердака несущими элементами служат железобетонные плиты, по которым укладывают паро- и теплоизоляционные слои. Поверх теплоизоляции размещается стяжка из цементнопесчаного раствора. Необходимость устройства пароизоляции перекрытия и её требуемое сопротивление паропроницанию устанавливают расчётом. Пароизоляционный слой должен размещаться ниже слоя теплоизоляции.

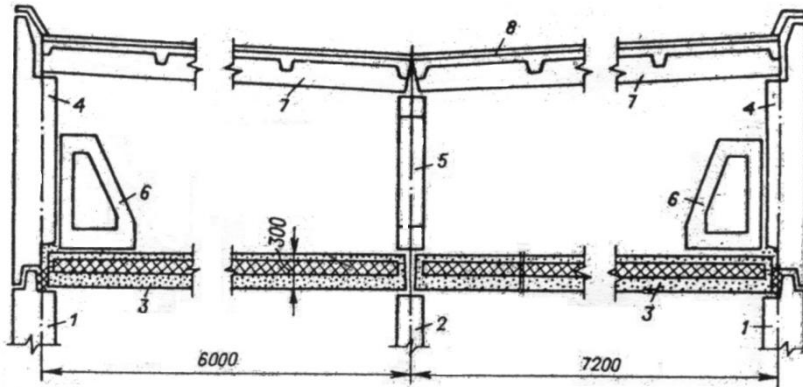


Рис. 4.18. Разрез крыши с комплексными плитами чердачного перекрытия:
 1 – стеновая панель верхнего этажа наружная; 2 – то же, внутренняя;
 3 – комплексная плита чердачного перекрытия; 4 – наружная стеновая панель чердака; 5 – внутренняя опорная рама чердака; 6 – подпорная рама;
 7 – кровельные ребристые плиты; 8 – рулонная кровля

Чердачные помещения следует вентилировать наружным воздухом через отверстия и проёмы: приточные, размещённые под свесами кровли или в стеновых панелях чердака, и вытяжными – в коньке крыши или торцевых панелях. Сечения вентиляционных отверстий и проёмов устанавливаются расчётом.

Толщина слоя теплоизоляции перекрытия чердака рассчитывается по уравнению 4.3. в соответствии с требованиями нормативных документов [4.26].

Крыша с тёплым чердаком состоит из внутреннего помещения и ограждающих конструкций, к которым относятся стены, чердачное покрытие и перекрытие. Помещение чердака представляет единый объём в пределах планировочной секции здания. Схема крыши с тёплым чердаком показана на рис. 4.19.

На схеме представлены два варианта крыши с различными решениями гидроизоляционного слоя: с рулонной кровлей и с панелью покрытия.

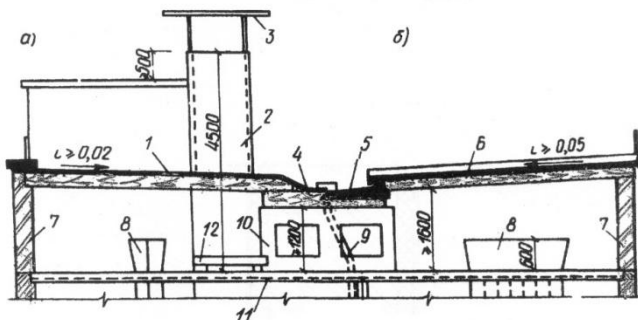


Рис. 4.19 Схема крыши с тёплым чердаком

- а* – покрытие с рулонной кровлей; *б* – покрытие с безрулонной кровлей;
 1 – легкобетонная панель покрытия под рулонной кровлей; 2 – вытяжная шахта;
 3 – защитный зонт; 4, 5 – панели лотка; 6 – двухслойная панель покрытия
 с безрулонной кровлей; 7 – наружные стены чердака; 8 – оголовок
 вентиляционного блока; 9 – внутренний водосток; 10 – опорная панель;
 11 – чердачное перекрытие; 12 – водосборный поддон

Чердачное пространство крыши используется в качестве сборной вентиляционной камеры статического давления, обогреваемой воздухом вытяжной вентиляции, поэтому его ограждающие наружные конструкции имеют теплоизоляцию. Все вентиляционные каналы помещения здания открываются внутрь чердака, куда поступает воздуха с температурой 18...22 °С. Удаляется воздух из чердака через общую вытяжную шахту секции.

Теплотехнический расчёт тёплого чердака рекомендуется выполнять в соответствии с требованиями ТКП 45-2-04-43 или по методике [4.27], в следующей последовательности:

– по условию обеспечения санитарно-гигиенического состояния помещений верхнего этажа дома находится минимально-допустимая температура воздуха на чердаке

$$t_{\text{чер}}^r = t_{\text{в}} - \Delta t^{\text{н}} \alpha_{\text{в}} R_0^{\text{пер}}; \quad (4.25)$$

– затем по условию соблюдения теплового баланса помещения тёплого чердака определяется сопротивление теплопередаче покрытия по формуле

$$R_0^{нок} = \frac{t_{чеп} - t_n R_0^{неп} R_0^{\zeta\tau}}{q^{вент} t_{чеп} - t_n R_0^{неп} R_0^{\zeta\tau} + t_в - t_{чеп} R_0^{\zeta\tau} - F_{ст} t_{чеп} - t_n R_0^{неп}}; \quad (4.26)$$

– по значениям полученных показателей рассчитывается температура внутренней поверхности покрытия, как

$$\tau_{нок} = t_{чеп} - t_{чеп} - t_n / \alpha_B^{нок} R_0^{нок}, \quad (4.27)$$

которая должна быть не ниже значения, определённого по указаниям [4.24].

При пониженной температуре внутренней поверхности покрытия следует определить температуру воздуха в объёме чердаке по условию недопустимости конденсации влаги

$$t_{чеп}^к = t_n - \tau_{нок} R_0^{нок} \alpha_B^{нок} / (1 - R_0^{нок} \alpha_B^{нок}), \quad (4.28)$$

подставляя которую в формулу (4.23), получают окончательное значение сопротивления теплопередаче чердачного покрытия.

При известных теплотехнических параметрах покрытий действительная температура воздуха на чердаке находится по общей формуле

$$t_{чеп} = \frac{t_n F_{ст} R_0^{нок} + R_0^{\zeta\tau} R_0^{неп} + q^{вент} t_{вент} R_0^{неп} + t_в R_0^{нок} R_0^{\zeta\tau}}{R_0^{нок} + R_0^{неп} R_0^{\zeta\tau} + q^{вент} R_0^{\zeta\tau} + F_{ст} R_0^{нок} R_0^{неп}}. \quad (4.29)$$

Для заданной конструкции покрытия выполняется расчёт температуры наружного воздуха, при которой в тёплом чердаке соблюдаются требуемые условия

$$t_n = \frac{t_{чеп} F_{ст} R_0^{нок} + R_0^{\zeta\tau} R_0^{неп} - t_в - t_{чеп} R_0^{нок} R_0^{\zeta\tau} - q^{вент} t_{вент} - t_{чеп} R_0^{нок} R_0^{неп} R_0^{\zeta\tau}}{F_{ст} R_0^{нок} + R_0^{\zeta\tau} R_0^{неп}} \quad (4.30)$$

При этом температура воздуха на чердаке рассчитывается по формуле (4.25), а условие недопустимости конденсата проверяется по форму-

лам (4.27) и (4.30). В случае не соблюдения последнего исходная температура воздуха на чердаке определяется по формуле (4.27).

В расчётных формулах (4.25...4.30) приняты следующие обозначения:

$R_0^{nep}; R_0^{ст}$ – сопротивление теплопередаче чердачного перекрытия и наружной стены чердака, $м^2 \cdot ^\circ C / Вт$;

$\alpha_B, \alpha_B^{нок}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности перекрытия и покрытия, $Вт / (м^2 \cdot ^\circ C)$;

$\Delta t^{н}$ – нормативный температурный перепад у внутренней поверхности чердачного перекрытия, $^\circ C$;

t_B, t_n – температура внутреннего и наружного воздуха, $^\circ C$;

$t_{вен}$ – температура воздуха, поступающего в чердак из вентиляционных каналов, $^\circ C$;

$q^{вен}$ – удельные тепlopоступления в объём чердака с вентиляционным воздухом, $Вт / (м^2 \cdot ^\circ C)$;

$F_{ст}$ – приведенная площадь наружных стен чердака, $м^2$.

Расчётные значения теплотехнических показателей принимаются по указаниям действующих нормативных документов.

Сопротивление теплопередаче наружных вертикальных стен чердака принимается равным сопротивлению теплопередаче наружных стен здания.

Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности покрытия при расчёте по условию недопустимости конденсации водяного пара рекомендуется принимать по экспериментальным значениям, приведенным в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Коэффициенты теплоотдачи внутренней поверхности покрытия

№ п/п	Внутренняя поверхность покрытия	$\alpha_B^{нок}$, $Вт / (м^2 \cdot ^\circ C)$			
		Этажность дома			
		5	9	12	16
1	Плоская	8,5	9,5	10,5	11,5
2	Ребристая	8,0	8,5	9,5	10,5
3	С перегородками	7,0	7,5	8,5	9,5

Преимуществами крыши с тёплым чердаком являются: улучшение вентиляции помещений зданий; повышение надёжности кровли; снижение теплопотерь верхнего этажа; упрощение конструкции покрытия; доступность для осмотра и ремонта.

4.4 Выводы

1. Основным показателем уровня теплозащиты наружных ограждающих конструкций следует считать приведенное сопротивление теплопередаче.

2. Конструктивные решения современных автоматизированных систем отопления здания позволяет осуществлять как индивидуальное, так и групповое регулирование отпуска тепловой энергии для поддержания заданной температуры внутреннего воздуха в помещениях. Для таких условий эксплуатации возможно выполнять расчёты приведенного сопротивления теплопередаче для каждой из наружных ограждающих конструкций по одному выбранному «расчётному участку», имеющему наибольшее количество теплопроводных включений на единицу площади, т.е. определять наихудшее теплозащитные характеристики, по которым следует определять теплопотери помещений здания.

3. Для определения приведенного сопротивления теплопередаче с учётом наличия теплопроводных включений в толще конструкций, а также откосов проёмов и междуэтажных перекрытий предложена методика, основанная на расчёте температурных полей отдельных выделенных фрагментов с последующим усреднением полученных результатов по поверхности конструкции. Методика позволяет выполнить анализ конструктивных решений наружных ограждающих конструкций с целью обеспечения их нормируемого сопротивления теплопередаче.

Литература к главе 4.

4.1. Корниенко С.В. Повышение эффективности зданий за счёт снижения теплопотерь через краевые зоны ограждающих конструкций /С.В. Корниенко//Журнал РААСН. АСА DEMIA, Строительство и архитектура, 2010. № 3 – С.348-351.

4.2. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть 1. Отопление./под ред. И.Г. Староверова и Ю.И. Шиллера. – М.: Стройиздат, 1990. – 344 с.

4.3. Citterio M., Cocco M., Erhorn-Kluttig H. Thermal bridges The EBCD context: overview on MS approaches regulations// EBCD Buildings Platform/ 2008/ 28-p.6.

4.4. DIN EN ISO Wärmeströme und Oberflächentemperaturen. Teil 2 Linienförmige Wärmebrücken/ Juni 2001.

4.5. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Минрегион России. 2012.

4.6. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Теоретические предпосылки расчёта приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Строительные материалы. 2010. №12. С.4-12.

4.7. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Перспективы повышения энергетической эффективности жилых зданий в России. // Вестник МГСУ. №3. 2011.

4.8. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация./ О.Зенкевич, К. Морган; Перевод с английского под ред. Н.С. Бахвалова. – Москва: Мир. 1986. – 318 с.

4.9. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов/ Л. Сегерлинд; Перевод с английского, под ред. Б.Е. Победри. – Москва: Мир. 1979. – 392 с.

4.10. Протасевич А.М. Расчёт температурного поля многослойных ограждающих конструкций с теплопроводными включениями методом конечных элементов./ А.М.Протасевич, В.В.Лешкевич.// Энергоэффективность №10. –Минск. 2013.– С.16...20.

4.11. Протасевич А.М. Некоторые результаты расчётов приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен зданий с повышенным уровнем теплозащиты//А.М.Протасевич, А.Б.Крутилин./Строительная физика. Системы обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях. Сборник докладов. – Москва.-2014.С.54...59.

4.12. Аше Б.М. Отопление и вентиляция. Т.1:Общие сведения. Системы отопления//Учебник для вузов. Изд.1-е. Госстройиздат, М.-Л.1934; Изд.2-е. Госстройиздат, М.-Л. 1939.

4.13. Щукин О.Г. Расчёт теплотерь подвалов, заглубленных в вечномёрзлый грунт// Водоснабжение и санитарная техника– 1965.– №8.

- 4.14. Макаревич С.А. Тепловой режим полов и заглубленных частей зданий./Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Нижний Новгород. 1991.
- 4.15. Дячек П.И., Макаревич С.А. Расчёт потерь теплоты заглубленных частей здания//Водоснабжение и санитарная техника. – 1992.–№8.
- 4.16. Владимиров Р.В. Подвалы многоквартирных жилых домов./АВОК. 2007.–№6.
- 4.17. Сотников А.Г. Теплофизический расчёт теплопотерь подземной части зданий./АВОК. 2010.–№8.
- 4.18. СНБ 4.02.01-03. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Минск. 2004.
- 4.19. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. Москва. 2012.
- 4.20. Гиндоян А.Г. Тепловой режим конструкций полов. Москва. 1984.
- 4.21. ТКП 45-4.0-140-2009. Потери теплоты через полы по грунту и заглубленные части зданий. Порядок расчёта. Минск. 2009.
- 4.22. Пехович А.И. Расчёты теплового режима твёрдых тел./А.И.Пехович, В.М.Жидких. – Ленинград:Энергия. 1968. Изд. 2-е Ленинград: Энергия. 1976.
- 4.23. Протасевич А.М. К вопросу о тепловлажностном режиме совмещённых вентилируемых крыш//А.М.Протасевич, Л.С.Калинина. В сборнике «Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях». М. 2001. –С.216...220.
- 4.24. Протасевич А.М. и др. Дополнительная теплоизоляция совмещённых вентилируемых покрытий жилых зданий. / Белорусский строительный рынок. 2005–№15.
- 4.25. П1-03 к СНБ 5.08.01-2000. Проектирование и устройство кровель. Минск.2004.
- 4.26. ТКП 45-2.04.43-2006. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования. Минск. 2004.
- 4.27. Рекомендации по проектированию железобетонных крыш с тёплым чердаком для многоэтажных жилых зданий. М. Стройиздат 1986.

ГЛАВА 5. СВЕТОПРОЗРАЧНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ

5.1 Общие сведения

По теплотехническим показателям светопрозрачные ограждения представляют наиболее слабое звено в системе наружных ограждающих конструкций. Доля теплопотерь через традиционные светопрозрачные ограждения здания составляет от 30 до 50% от общей их величины. Конструкция и размеры остекления оказывают существенное влияние на поддержание микроклимата в помещениях и на расход энергии инженерным оборудованием зданий.

Окнами или заполнениями световых проемов называют элементы стеновых конструкций, предназначенные для общения помещений с окружающим пространством, их вентиляции и естественного освещения, защиты от атмосферных и шумовых воздействии. Указанные особенности окон важны при проектировании систем естественной вентиляции и естественной освещенности помещений зданий. По физиологическим показателям оптимальные условия естественного освещения достигаются при ширине окон, равной 55 % ширины комнаты. Следует также помнить, что максимальное использование естественного освещения – одна из составляющих экономии энергии при эксплуатации зданий. В состав «окон» входят оконный проем с откосами, оконный блок, системы уплотнения монтажных зазоров, подоконные доски, детали отлива и облицовок.

В зданиях жилого и нежилого фонда РБ и других стран СНГ до 1980 года оконные заполнения были в основном деревянными с отдельными или спаренными переплетами и с двойным остеклением. Оконные блоки их глубоко посажены в четверти проемов. Во многих случаях рядом с окном устраивались приточные воздушные клапаны. Сопrotивление теплопередаче наиболее часто используемых окон представлены в табл. 5.1. Схема остекления описывается его формулой, например, $3 \times 40 \times 3$ (3 мм стекло \times 40 мм воздушная прослойка \times 3 мм стекло).

В жилых домах старой постройки окна, в основном, имеют площадь до 2 м^2 с шириной оконных проемов от 0,9 до 1,4 м. Для проветривания окна имели форточки. Расстояние между переплетами

варьировалось от 50...80 мм до 150...200 мм. Оконное стекло толщиной 2,5...4,0 мм.

Таблица 5.1

Теплоизолирующие и физические свойства заполнений световых проемов производства до 1980 года

Заполнение светового проема	Сопротивление теплопередаче R_T , $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$	Индекс изоляции воздушного шума, дБ	Светопропускание, %
Одинарное остекление в деревянных переплетах	0,18	30	89
Одинарное остекление в металлических переплетах	0,15	30	86
Двойное остекление в деревянных спаренных переплетах, 3×40×3 мм	0,39	33	80
Двойное остекление в деревянных раздельных переплетах, 3×70×3 мм	0,42	3628	72
Двойное остекление в металлических раздельных переплетах, 4×70×4 мм	0,34	33	70
Тройное остекление в деревянных раздельноспаренных переплетах, 3×70×3×40×3 мм	0,55	32	—
Тройное остекление в металлических раздельноспаренных переплетах, 4×70×4×40×4 мм	0,46	30	—

Теплозащитные качества окон оцениваются величиной сопротивления теплопередаче $R_T^{\text{ок}}$ или коэффициентом теплопередачи $K_{\text{ок}}$. Перенос теплоты через обычные оконные заполнения сложный процесс, включающий многообразие процессов конвективного и

лучистого теплообмена и теплопроводности. Для конструкций обычных оконных заполнений, представленных в табл. 5.1, выполнены достаточно обширные аналитические исследования процессов переноса теплоты [5.1, 5.2]. В указанных работах оконное заполнение рассматривалось в условиях стационарного режима как неограниченная пластина с граничными условиями 1-го, 2-го или 3-го рода. Указанный подход справедлив для центральной зоны окна, в которой можно моделировать одномерный перенос теплоты. Но в зоне сопряжения стеклопакета с блоком, также как блока со стеной, одномерность теплового потока нарушается, и задача переноса переходит в двухмерную. Учитывая этот фактор, теплозащитные свойства окон по величине приведенного сопротивления теплопередаче следует определять экспериментально, используя для этого стенды с климатическими камерами.

Испытания оконных заполнений проводятся в соответствии с требованиями [5.3]. Результаты испытаний позволяют оценить приведенное сопротивление теплопередаче оконного блока и стеклопакета, но не учитывают влияния контакта блока со стеной. Т.е. не учитываются реальные условия эксплуатации оконных заполнений, влияющих на температурное поле оконных откосов и блока.

Современная архитектура и строительство развивается в направлении широкого использования светопрозрачных ограждающих конструкций. Проектируются и строятся здания, у которых площадь остекления достигает 70...80% от общей площади ограждений (рис. 5.1).

С увеличением остекления в летний период года увеличиваются теплопоступления в здания за счет солнечного облучения и, как следствие, стоимость систем вентиляции и кондиционирования воздуха и их эксплуатации. В зимних условиях повышаются теплопотери зданий и эксплуатационные затраты на их отопление.

Повышенное остекление допустимо в общественных зданиях, работающих продолжительную часть дня с большим потоком посетителей. Они, как правило, имеют большие внутренние объемы и глубину. Это здания выставок, аэропортов, торговых центров, вокзалов и другие.

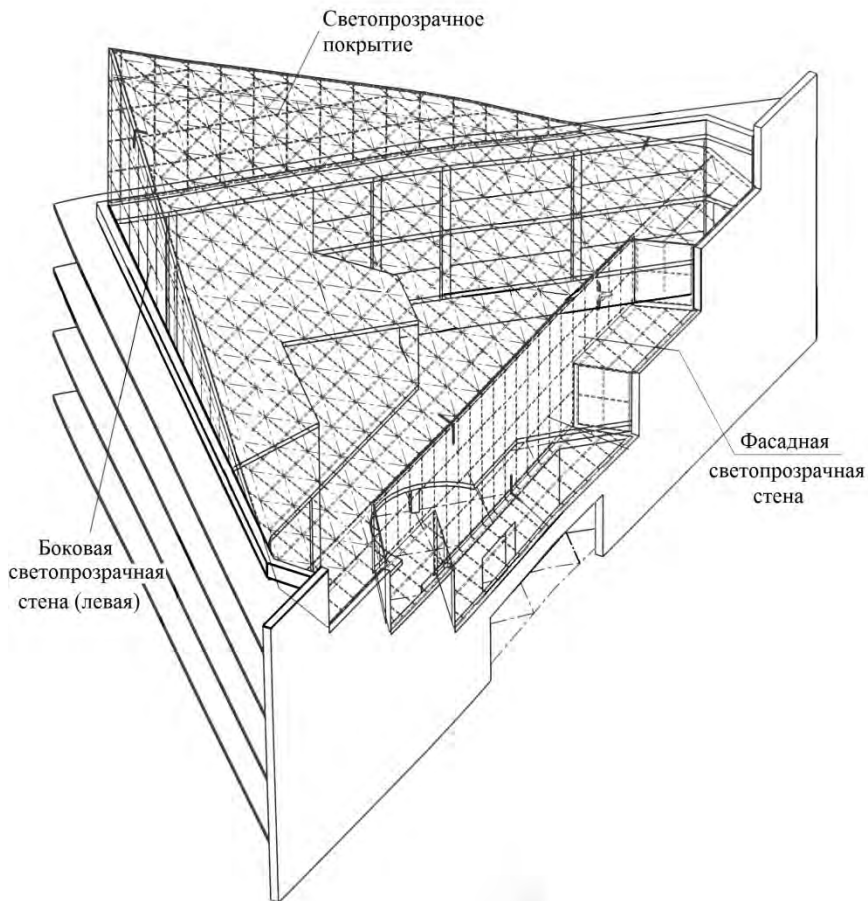


Рис. 5.1. Схема светопрозрачных конструкций атриума общественного здания

Современные методы остекления, модульный, спайдерный, структурный, вместе с широко используемым стоечно-ригельным, находят все более широкое распространение в строительной практике.

Возрастает строительство зданий с двойными фасадами различной модификации. Их использование, по мнению европейских и американских специалистов, открывает возможности для снижения тепловых затрат на поддержание микроклимата помещений, как за

счет конструктивных особенностей двойных фасадов, так и за счет их комбинирования с инженерными системами.

Примером такого комбинирования служит организация естественной вентиляции здания с двойным фасадом. Наружный слой вентилируемого фасада выполнен из стекла со щелевыми отверстиями в верхней и нижней частях (рис. 5.2). Внутренний слой – однокамерный стеклопакет с фрамугой в верхней части окна. Наружный воздух поступает в вентилируемую прослойку через нижнее отверстие, а в помещение – через открытую фрамугу. Из вентилируемой прослойки воздух выходит в верхнее отверстие наружно-го слоя остекления.

Описанная конструкция «двойного фасада» позволяет в летний период года при температурах воздуха выше $t_n \geq 5^\circ\text{C}$, использовать естественную вентиляцию для поддержания микроклимата помещений без применения систем механической вентиляции или кондиционирования воздуха. При необходимости дополнительного охлаждения помещений могут быть использованы теплоемкие перекрытия с замоноличенными трубопроводами, по которым циркулирует холодная вода. Примером организации естественной вентиляции «двойного фасада» и с использованием охлаждающих потолков, может служить здание «Commerzbank» в Германии. Обеспечение оптимального режима работы инженерных систем в данном здании осуществляется «интеллектуальной» системой управления микроклиматом.

Использование «двойных фасадов» в климатических условиях РБ, РФ и других стран СНГ связано с рядом проблем, как в зимних, так и летних условиях эксплуатации. В зимних условиях необходимо обеспечить такой тепловлажностный режим воздушной прослойки и помещений, прилегающих к ней, который позволит избежать конденсации водяного пара из воздуха на поверхностях остекления, особенно в зонах силовых элементов. В летних условиях необходимо защищать помещения от перегрева при поступлении солнечной энергии через фасад.

Критический анализ применения «двойных фасадов» приведен в работе [5.4].

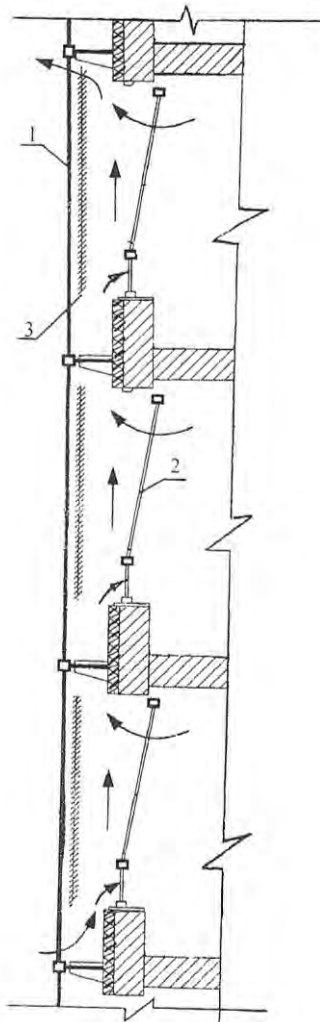


Рис. 5.2. Схема организации естественной вентиляции с использованием «двойного фасада»:
1 – внешнее остекление; 2 – фрамуга; 3 – жалюзи

Не менее важным направлением в использовании современных методов остекления является строительство и ремонт зданий жилого и общественного назначения.

Теплозащитные качества по величинам приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачных фасадов, атриумов, оконных и балконных заполнений должны соответствовать требованиям действующих нормативных документов. При этом наблюдается тенденция периодического повышения указанной величины. Так, например, в Республике Беларусь величина сопротивления теплопередаче оконных заполнений принимается равной $R_T^{пр} = 1,0 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$.

В энергосберегающих программах г. Москвы предложено с 1 января 2015 г. установить для окон $R_T = 1,0 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$, а с 1 января 2020 г. не менее $R_T = 1,1 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$,

В зарубежных странах требования к теплозащитным характеристикам окон еще более высоки. В Германии, Австрии, Швейцарии при возведении современных зданий используются оконные заполнения с сопротивлением теплопередаче $R_T = 1,2 \dots 1,25 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$, что соответствует коэффициенту теплопередачи $K = 0,80 \dots 0,83 \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}$.

Окна имеют значительно более низкое сопротивление теплопередаче по сравнению с аналогичным показателем наружных стен и представляют конструкцию с пониженной теплозащитой. С целью повышения теплозащитных качеств окон разработаны и разрабатываются новые конструкции блоков, увеличивается число слоев остекления с использованием стеклопакетов в деревянных, ПВХ и других переплетах и т.д.

Стеклопакет представляет герметичную пространственную конструкцию из нескольких стекол, разделенных прослойкой, заполненной газом. Между стеклами размещены дистанционные рамки с адсорбентом – силикагелем, гранулированным цеолитом и др. (рис. 5.3).

Конструкция стеклопакета описывается его формулой представляемой по схеме 4-12-4 (4 мм стекло, 12 мм воздух, 4 мм стекло) или 4-16Ar-4И (4 мм стекло, 16 мм аргон, 4 мм стекло с покрытием).

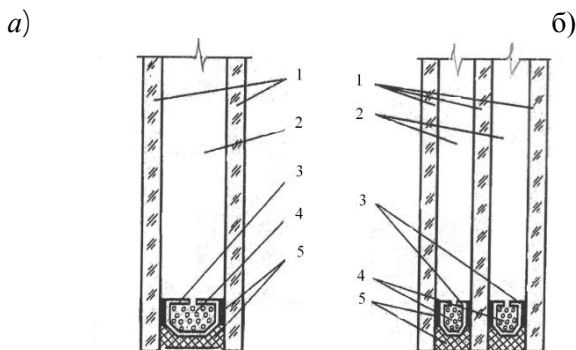


Рис. 5.3. Конструкция стеклопакета:

a – однокамерного; *б* – двухкамерного;

1 – стекло; 2 – газовая прослойка; 3 – дистанционная рамка;

4 – осушитель; 5 – герметизирующие материалы

Теплозащитные качества оконных заполнений также зависят от сопротивления теплопередаче их несветопрозрачной части. Принято считать, что одним из эффективных решений, позволяющих реализовать повышенные требования по теплозащите, является использование окон в пластмассовых переплетах со стеклопакетами.

Особенностью оконных блоков из ПВХ, изготовленных из многокамерных профилей жесткого поливинилхлорида армированного металлическими элементами, являются:

- узкая ширина профиля блока;
- устройство одинарных, реже спаренных переплетов;
- высокое качество уплотнения притворов;
- использование металлических элементов усиления.

К недостаткам окон, изготовленных с использованием профиля из поливинилхлорида, следует отнести подверженность их деформациям под действием повышенных температур и внешних нагрузок. Для усиления профиля выполняется армирование металлическими вкладышами, которые способствуют сохранению линейных расширений и сжатий в пределах допустимых отклонений, без коробления, но снижают теплозащитные качества окон.

В изготовлении оконных блоков находят применение также профили из полиэфирных стеклопластиков. Благодаря большой механической прочности стеклопластика оконные блоки изготавли-

ваются без металлических усилителей профилей. А так как стеклопластик имеет коэффициент линейного расширения, практически не отличающийся от коэффициента линейного расширения стекла, то не возникают напряжения в стеклопакетах и в уплотнительной системе окон при изменении температуры.

Изложенная ниже тенденция совершенствования конструкции принята и при изготовлении оконных блоков из дерева.

Улучшения конструкций блоков и стеклопакетов не всегда дают положительные результаты, т.к. теплозащитные качества оконных заполнений зависят также от расположения блока в проеме, от конструкции и теплотехнических характеристик самой наружной стены.

Указанные особенности современных оконных блоков расходятся с принципами, принятыми при устройстве оконных заполнений для существующего жилого фонда страны, построенного в XX веке и ранее. Поэтому в данной главе рассматриваются, в основном, современные оконные заполнения, их теплотехнические, физические и конструктивные особенности, позволяющие повысить теплозащитные качества ограждающих конструкций зданий. Также приведены примеры эксплуатации помещений и зданий с современным остеклением, в которых сформировались условия, приведшие к нарушениям микроклимата помещений.

5.2 Воздухопроницаемость оконных заполнений и естественный приток воздуха

Конструкция традиционного окна обычно допускает некоторое воздухопроницание. Через притворы и стыки стекла с переплетом воздух попадает в межстекольное пространство, где нагревается до температуры воздушной прослойки, а затем через неплотности внутреннего остекления в помещение. Инфильтрация воздуха вызвана действием гравитационных сил или ветровым давлением. Количество воздуха, проникающего через окно, тем больше, чем хуже герметичность притворов и больше скорость ветра (рис. 5.4).

При скорости ветра 10 м/с объем инфильтрующего воздуха равен 10 м³/ч через 1 м притвора окна. Такой объем воздуха в зимний период потребует до 130 Вт тепловой мощности для его нагрева.

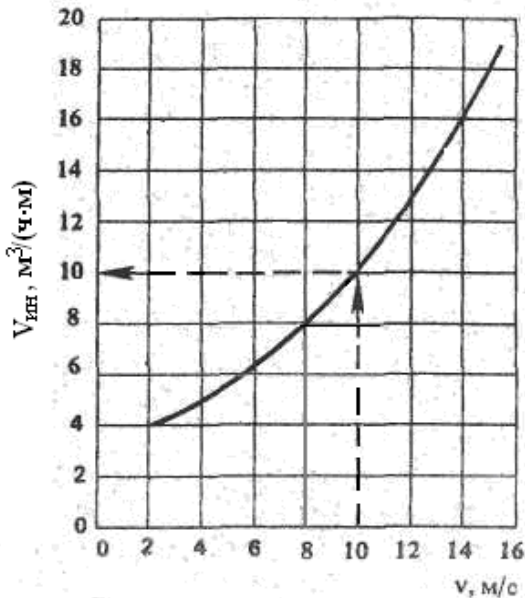


Рис. 5.4. Зависимость объема инфильтрующегося воздуха $V_{ин}$ через 1 м шва традиционного окна от скорости ветра v

Инфильтрация и эксфильтрация воздуха через окна нежелательны с теплотехнической точки зрения. Однако с гигиенической точки зрения определенный обмен воздуха в зданиях необходим. Если он не обеспечивается системой вентиляции, то допускается приток воздуха в здания через притворы окон и дверей, в пределах нормируемых объемов.

Особенностью современных окон является устройство монтажных швов узлов примыкания блоков к стеновым проемам по технологии, обеспечивающей их высокое сопротивление воздухопроницанию. Кроме того, притворы окон, изготовленных по современным технологиям, имеют сопротивление воздухопроницаемости не менее $R_b = 0,9 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}/\text{кг}$ (при $\Delta p = 10 \text{ Па}$), в то время как традиционные окна с двойным остеклением в отдельных переплетах имеют сопротивление $R_b \approx 0,005 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}/\text{кг}$. Повышение сопротивления воздухопроницанию значительно уменьшает поступление воздуха за счет

инfiltrации. Проветривание через створки окон создает улучшение качества воздуха помещений лишь на период их открывания.

Повышение герметичности окон снижает теплопотери, но и уменьшает объем поступающего в помещения наружного воздуха. В первую очередь это относится к жилому фонду, т.к. нарушается принятая в большинстве зданий естественная вентиляция, что становится причиной резкого ухудшения качества воздуха в квартирах.

Традиционная методика расчета и выбора конструкции окон предусматривает определение расчетных наружных температур и разности давлений воздуха по обе стороны окна с учетом допустимой удельной воздухопроницаемости. В соответствии с нормативными документами воздухопроницаемость окон и балконных дверей должно быть не менее требуемого сопротивления воздухопроницанию $R_{в.тр.}$, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$. По ТКП 45-2.04-43-2006 сопротивление воздухопроницанию определяется по формуле:

$$R_{в.тр.} = (\Delta p / \Delta p_n)^{2/3} / G_{норм}, \quad (5.1)$$

при $\Delta p_n = 10 \text{ Па}$

$$R_{в.тр.} = 0,216 \cdot \Delta p^{2/3} / G_{норм}, \quad (5.2)$$

где Δp – расчетная разность давления воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций, Па;

$G_{норм}$ – нормативная воздухопроницаемость ограждающих конструкций, $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, принимаемая по табл. 5.2.

Расчетную разность давления воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции Δp , Па, следует определять по формуле:

$$\Delta p = H \gamma_n - \gamma_v + 0,5 \rho_n v_{ср}^2 c_n - c_n k_j \quad (5.3)$$

где H – расчетная высота от центра рассчитываемого заполнения светового проема до устья вытяжной шахты, м;

γ_n, γ_v – удельный вес, соответственно, наружного и внутреннего воздуха, $\text{Н} / \text{м}^3$, определяемый по формуле:

Таблица 5.2

Нормируемая воздухопроницаемость оконных
и дверных заполнений

Ограждающие конструкции	Нормативная воздухопроницаемость $G_{\text{норм}}$, кг/(м ² ·ч)
1 Входные двери в квартиры	1,5
2 Окна и балконные двери жилых и общественных зданий, а также административных и бытовых зданий и помещений промышленных предприятий; окна производственных зданий с кондиционированием воздуха; двери и ворота производственных зданий	10,0
3 Зенитные фонари производственных зданий, окна производственных зданий с избытками явной теплоты не более 23 Вт/м ³	15,0
4 Окна производственных зданий с избытками явной теплоты более 23 Вт/м ³	30,0

$$\gamma = \frac{3463}{273 + t}, \quad (5.4)$$

где t – температура соответственно внутреннего и наружного воздуха, °С; для наружного воздуха она равна средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 [5.6];

v_{cp} – максимальная из средних скоростей ветра по румбам в январе, м/с.

$\rho_{\text{н}}$ – плотность наружного воздуха, кг/м³, определяемая по формуле $\rho_{\text{н}} = \gamma_{\text{н}}/9,8$

$c_{\text{н}}$, $c_{\text{п}}$ – аэродинамические коэффициенты, соответственно, наветренной и подветренной поверхностей ограждающих конструкций здания, принимаемые по СНиП 2.01.07 [5.6];

k_f – коэффициент учета изменения скоростного давления ветра в зависимости от высоты здания, принимаемый по СНиП 2.01.07 [5.7].

Допускается отклонение сопротивления воздухопроницанию заполнения светового проема от требуемого не более +20 %.

Разность давлений воздуха на поверхностях окна рассчитывается по отношению к отметке устья вытяжной шахты, т.е. на высоту столба воздуха в вытяжной шахте.

В строительных нормах России $R_{в,тр}$ находится также по формуле 5.1, но с иными требованиями. Согласно СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» воздухопроницаемость окон и балконных дверей не должна превышать соответственно: 5,0 кг/(м²·ч) для окон в пластмассовых (алюминиевых) переплетах и 6,0 кг/(м²·ч) в деревянных переплетах.

Фактически воздухопроницаемость современных оконных блоков с двумя контурами уплотнения притворов не превышает 0,3 – 0,6 кг/(м²·ч). Поэтому при замене светопрозрачных конструкций на энергоэффективные следует предусматривать обеспечение необходимого воздухообмена помещений зданий. Возможны несколько способов организации притока наружного воздуха в помещении. К ним относятся организация «щелевого» проветривания при приоткрытой или «полного» при открытой створке, микрофльтрация, использование приточных клапанов.

«Щелевое» проветривание обеспечивает интенсивное неконтролируемое поступление воздуха в помещение в большом объеме. Существующие механизмы позволяют организовывать многоступенчатое открывание створок в несколько положений. Этот способ проветривания можно назвать «ударным» и использовать для замены воздуха в помещении за короткие промежутки времени.

Организация микрофльтрации воздуха осуществляется при закрытом окне путем разгерметизации притвора. Для приведения окна в режим микрофльтрации необходима установка специальной фурнитуры. Окна с микрофльтрацией используются для помещений, требующих постоянного поступления наружного воздуха. Применение специальной фурнитуры с функцией микрофльтрации является прогрессивным и популярным решением.

Приточные вентиляционные клапаны – это небольшие приспособления или устройства, предназначенные для монтажа в окнах

или стенах здания. Клапаны, предназначенные для установки в окнах, классифицируются по особенностям их конструкции и принципа регулирования притока воздуха на:

- клапаны с нерегулируемым притоком (имеют отверстия постоянного размера, приток воздуха обеспечивается разностью давлений вне и внутри помещения);

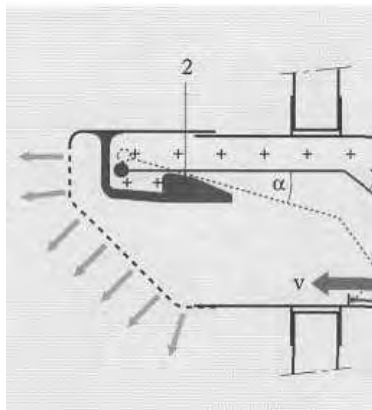
- клапаны с ручной регулировкой притока (имеют специальные заслонки, устанавливаемые в определенной позиции и изменяющие площадь отверстия для прохода воздуха);

- автоматические клапаны, которые подразделяются на устройства, работающие в зависимости от разности давлений воздуха по сторонам окна, и гигрорегулируемые, работающие в зависимости от величины относительной влажности воздуха.

Конструкции клапанов с ручным регулированием открытия управляемой заслонки имеют марку Aerco, Air-Box-Comfort и др.

Принципиальная схема клапана TNO представлена на рис. 5.5.

а)



б)

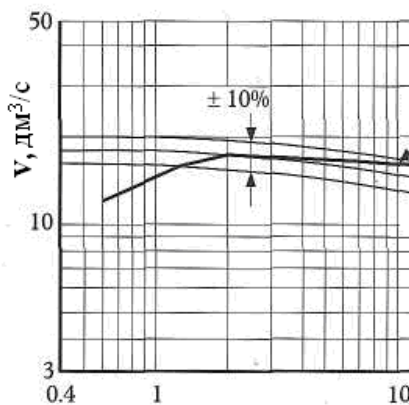


Рис. 5.5. Клапан перепада давления TNO:

а – принципиальная схема; б – аэродинамическая характеристика;

1 – верхняя перемещающаяся заслонка; 2 – опорная пластина;

3 – нижняя заслонка; 4 – действительная характеристика;

5 – теоретическая характеристика

Верхняя перемещающаяся заслонка 1 размещается на опорной пластине 2. При изменении перепада давления в пределах от 2 до 25 Па осуществляется автоматическое перемещение обеих заслонок таким образом, чтобы объем проходящего через отверстие «А» воздуха сохранялся практически постоянным.

Автоматический саморегулируемый приточный клапан ASTATO серии 2А, конструкция и характеристики которого приведены на рис. 5.6, предназначен для монтажа в створках окна.

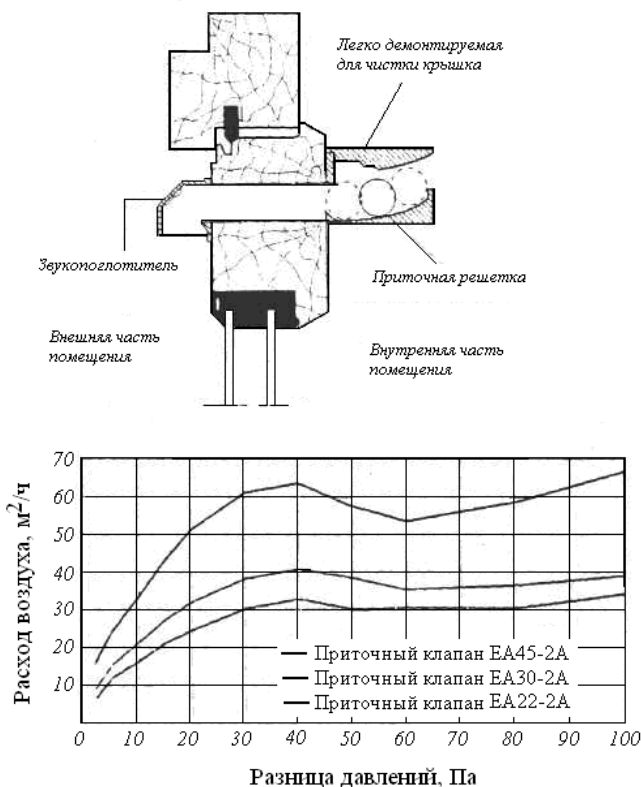


Рис. 5.6. Разрез и характеристики приточного клапана ASTATO

Номинальные расходы воздуха, поступающие через него, равны 45, 30 и 22 м³/ч. Принцип действия основан на перемещении ролика

по каналу с параболическим профилем. В диапазоне давлений от 20 до 100 Па расход меняется не более чем на $15 \text{ м}^3/\text{ч}$. Клапаны обладают звукоизолирующим свойством, выполняют функции обратного клапана.

Примерами гигрорегулируемых клапанов являются модели ЕНА и ЕММ торговой марки Aereco. На рис. 5.7 показаны геометрические размеры клапана ЕНА и его аэродинамические характеристики.

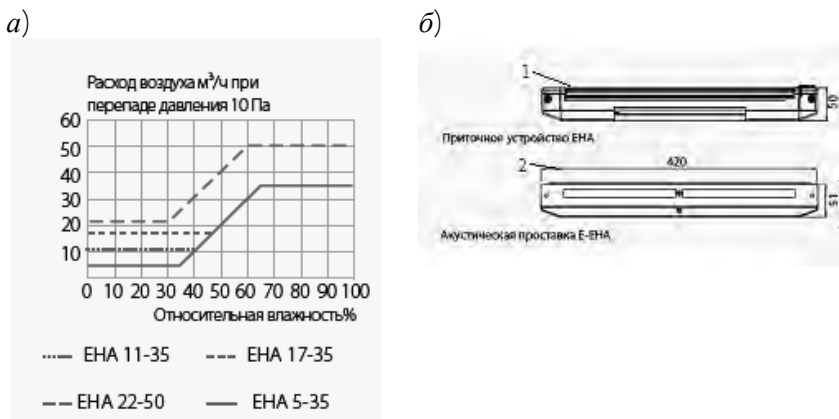


Рис. 5.7. Гигрорегулируемый клапан ЕНА:
 а – аэродинамические характеристики; б – геометрические размеры;
 1 – приточное устройство; 2 – акустическая приставка

Для монтажа клапана в окне необходим паз размерами $354 \times 12 \text{ мм}$.

Термостатические клапаны работают по принципу термостата. При понижении температуры автоматически уменьшается ширина приточного отверстия. Объем приточного воздуха через такой клапан зависит от разности давлений воздуха по его сторонам.

Термостатические клапаны обычно размером не менее $200 \times 200 \text{ мм}$, что определяет их монтаж на стенах зданий. Схема саморегулирующего клапана VTK показана на рис. 5.8.

Входное отверстие клапана имеет саморегулируемый термостат, который регулирует расход воздуха в зависимости от наружной температуры. Автоматический диапазон температур от -5°C до 10°C (полностью открыто при $+10^\circ\text{C}$), при желании возможно от-

крытие вручную. Отверстие клапана легко регулируется, т.е. уменьшает или увеличивает расход воздуха.

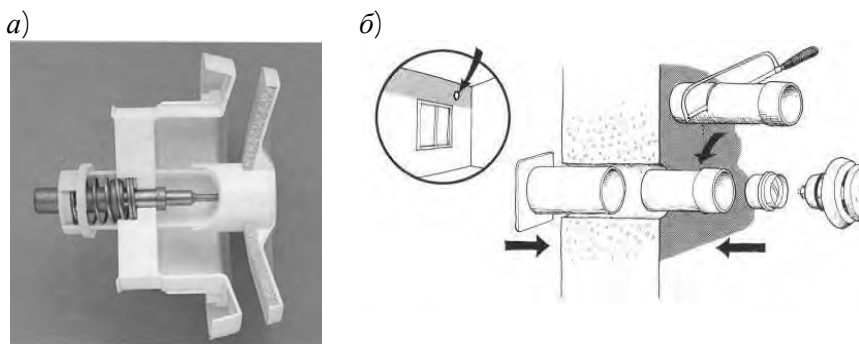


Рис. 5.8. Автоматический клапан VTK:
а – термостат с регулируемой заслонкой; б – схема монтажа

Поступление воздуха в помещения может осуществляться с использованием внутрипрофильной системы его транспорта к приточным отверстиям.

В оконных блоках EXPROF Aero Therma наружный воздух поступает в помещение по воздуховоду, размещенному внутри ПВХ-профиля вдоль его периметра. Профиль для оконного блока имеет монтажную ширину $\delta = 118$ мм. Схема движения воздуха показана на рис. 5.9.

Наружный воздух поступает в канал в нижней части блока, проходит по воздуховоду путь длиной 2,7 – 3,0 метра и выходит через приточные отверстия в верхней части блока.

В Евросоюзе с проблемами нарушения вентиляции помещений при установке герметичных окон столкнулись давно, поэтому там намного раньше приняли и соответствующие решения, предупреждающие негативные последствия воздухообмена. Согласно польским нормам (PN-83/B-03430), приточные устройства должны обеспечивать максимальный приток воздуха в объеме от 20 до 50 м³/ч при естественной вентиляции и от 15 до 30 м³/ч в случае использования механической вытяжной вентиляции и естественного притока. И только при использовании механической приточно-вытяжной вентиляции все окна могут быть герметичными.

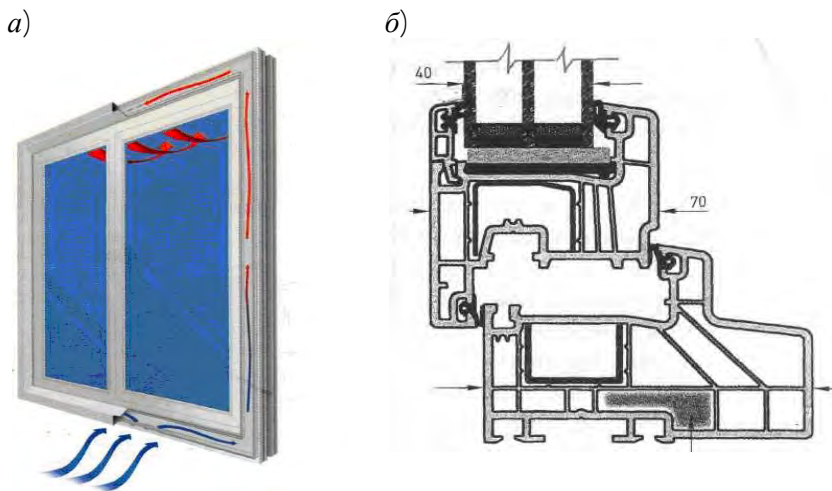


Рис. 5.9. Схема внутрипрофильной вентиляции EXPROFAeroTherma:
a – общий вид; *б* – ПВХ-профиль

Примером организации воздухообмена служит устройство приточного клапана скандинавского типа в окнах с широкой коробкой и отдельными створками со стеклом и стеклопакетом (рис. 5.10).

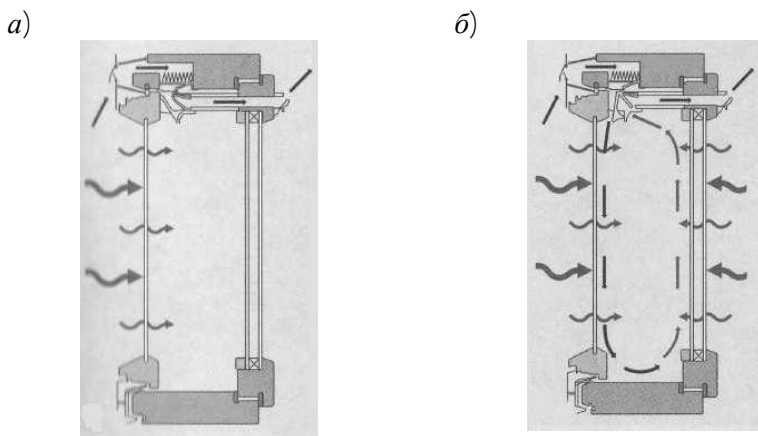


Рис. 5.10. Приточный клапан в оконном блоке скандинавского типа:
a – летом; *б* – зимой

В холодный и теплый периоды года клапан обеспечивает поступление наружного воздуха в помещение. При низких наружных температурах клапан, до выпуска воздуха, организует поступление его в межстекольное пространство и предварительный подогрев за счет теплового потока направленного из отапливаемого помещения.

Нормативными документами Республики Беларусь закреплена необходимость обеспечения окон техническими средствами для возможности организации притока. Правда, из стандарта не следует, что это обязательно должны быть клапаны, – допускаются и другие решения.

Обязательную необходимость притока воздуха через окна ввели в России, закрепив в санитарных правилах требование оборудования окон соответствующими устройствами и механизмами.

Потеря герметичности окна при организации притока воздуха с использованием микрофльтрации и клапанов снижает энергоэффективность оконных заполнений. Выбор направления эксплуатации окон следует решать по принципу приоритета: что важнее обеспечение качества воздушной среды или экономия теплоты на отопление помещения.

Достигнуть стабильного поступления наружного воздуха во всех квартирах многоэтажного здания можно только при механической вентиляции или кондиционировании помещений. Наряду с отдельными преимуществами механические системы вентиляции имеют существенные недостатки. Качество воздушного режима помещений при механической вентиляции и кондиционировании резко ухудшается в связи с уменьшением необходимых человеку отрицательно заряженных ионов в поступающем воздухе. Кроме того, при таких способах вентиляции растут расходы теплоты на подогрев наружного воздуха.

Повышение эффективности светопрозрачных конструкций по обеспечению микроклимата помещений связано с разработкой новых образцов с использованием продольно-поперечной вентиляции межстекольного пространства и подачей воздуха в помещения через распределитель или теплообменник-утилизатор рекуперативного или регенеративного типа.

5.3 Теплотехнические особенности современных оконных заполнений

В массовом строительстве и при выполнении капитального ремонта первоначально распространение получили оконные блоки из ПВХ-профиля с толщиной коробки $\delta \approx 60$ мм. Толщина коробок наиболее распространенных деревянных оконных блоков снизилась до 70...80 мм.

Установка оконных блоков с малой толщиной коробок повлекла ряд проблем, основные из которых [5.8]:

- повышенные теплопотери через оконные откосы наружных стен, вызывающие конденсацию водяного пара из воздуха помещений;
- выпадение конденсата на поверхности стеклопакетов в местах сопряжения с переплетами;
- сложность обеспечения требуемого воздухообмена в жилых квартирах с естественной вентиляцией в холодный период года при закрытых окнах.

Причины дефектов хорошо видны при рассмотрении температурного плоского поля узла сопряжения оконного блока с наружными неутепленными кирпичными стенами (рис. 5.11).

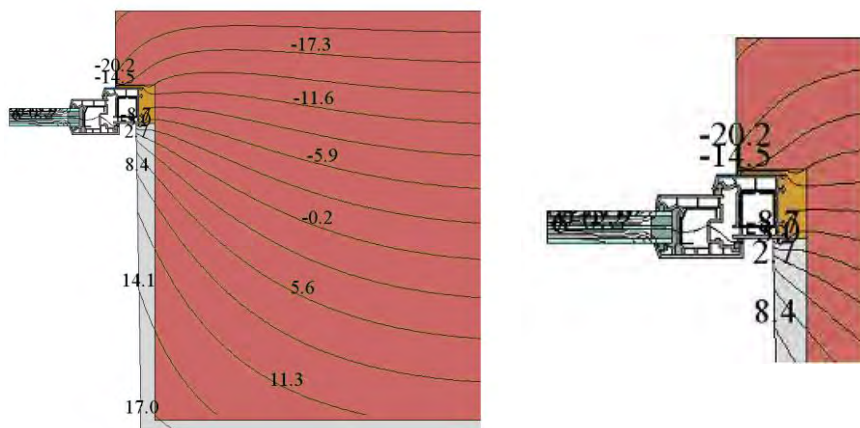


Рис. 5.11. Температурное поле узла сопряжения оконного блока из поливинилхлоридного профиля с кирпичной стеной толщиной кладки 770 мм

Тепловой поток через откосы, огибая профили и четверть кладки, направляется в сторону наружной поверхности стены. При этом блок окна, толщиной 60 мм и участки откосов проемов находятся в зоне температур ниже температуры точки росы воздуха помещения ($t_v = 18^\circ\text{C}$, $\varphi_v = 55\%$).

Недостатком окон из профиля ПВХ является то, что он не устойчив к температурным воздействиям. При повышенных температурах может начаться коробление, изменение цвета профиля, т.е. перестройка молекулярной структуры материала. Профили светлого цвета выдерживают температуры в пределах $43\dots 50^\circ\text{C}$, а цветные до 80°C . При высоких температурах и пожарах пластики выделяют токсичные вещества, в том числе и диоксин.

Оконные блоки из хвойной древесины соответствуют всем требованиям по прочности, устойчивости к воздействию ультрафиолетового излучения и дождей, перепадам температур. Они изготавливаются из клееной древесины. Многослойность оконного бруса обеспечивает стойкость к деформациям деревянного профиля. В многослойном брусе отдельные его слои (ламели) расположены таким образом, что волокна их древесины направлены в разные стороны. В этом их защита от коробления при изменениях влажности среды. Блоки, выполненные из клеевой древесины, обработанные диффузионно-проницаемыми красками, способны сохранять свои физико-технические характеристики в диапазоне температур от -45 до $+50^\circ\text{C}$. Срок их эксплуатации от 40 до 50 лет.

Изготавливают блоки из древесины и с теплоизоляционным ядром из вспененного полиуретана или пробки. Замена в трехслойном клееном брусе среднего слоя древесины на слой из полимерного материала с коэффициентом теплопроводности $\lambda \leq 0,05$ Вт/($^\circ\text{C}$) повышает сопротивление теплопередаче блока до $R_T^0 = 1,0\dots 1,1$ м²С/Вт.

Использование комбинации «дерево-алюминий» позволяет изготавливать двухслойные конструкции оконных блоков. Древесина составляет внутренний, обращенный в помещение слой профиля, а алюминиевый внешний. Коэффициент теплопередачи данного профиля в пределах $K = 1,7\dots 2,0$ Вт/(м²С), сопротивление теплопередаче $R_T^0 = 0,5\dots 0,6$ м²С/Вт. Срок эксплуатации больше 30 лет.

Использование профилей из алюминия и стали для оконных заполнений и фасадов допускается, если существуют требования к их механической прочности, или их применение экономически обосновано, а также по другим соображениям.

Повышение теплозащитных качеств современных окон может быть осуществлено с одновременным повышением сопротивления теплопередаче несветопрозрачной части оконного блока, светопрозрачных стеклопакетов и узлов примыкания оконных блоков к наружной стене.

$$R_{\Gamma}^{\text{ок}} = f R_{\Gamma}^{\delta}, R_{\Gamma}^{\text{ст}}, R_{\Gamma}^{\text{пр}}, \quad (5.5)$$

где $R_{\Gamma}^{\text{ок}}$ – приведенное сопротивление теплопередаче оконного заполнения, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$;

$R_{\Gamma}^{\delta}, R_{\Gamma}^{\text{ст}}, R_{\Gamma}^{\text{пр}}$ – сопротивление теплопередаче соответственно блока, стеклопакета и узла примыкания, $\text{м}^2\text{°C/Вт}$.

В инженерных расчетах приведенное сопротивление теплопередаче окна $R_{\Gamma}^{\text{ок}}$ приближенно может быть определено по формуле:

$$R_{\Gamma}^{\text{ок}} = \frac{F_{\text{с}} + F_{\delta}}{F_{\text{с}} / R_{\Gamma}^{\text{с}} + F_{\delta} / R_{\Gamma}^{\delta}}, \quad (5.6)$$

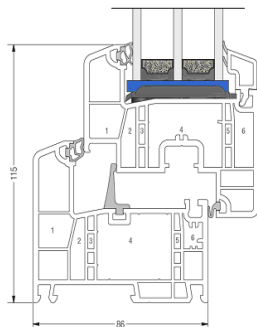
где $F_{\text{с}}$ и F_{δ} – площади остекления и непрозрачной части (блока), м^2 ;

Из (5.6) следует, что для повышения сопротивления теплопередаче окна необходимо повышать одновременно сопротивление теплопередаче, как блока, так и остекления.

Оконные блоки из пластика изготавливают из профиля, количество камер в котором может быть до семи. Повышенное сопротивление теплопередаче блоков достигается при заполнении камер профиля частично или полностью эффективным теплоизолирующим материалом или увеличением ширины блока до 100...120 мм и створок до 70 мм.

Например, заполнение теплоизоляционным материалом части камер шестикамерного оконного блока REHAU GENEО позволило повысить сопротивление теплопередаче его до $R_T^b = 1,2 \text{ м}^2\text{С/Вт}$ при толщине блока $\delta = 86 \text{ мм}$ (рис. 5.12).

а)



б)

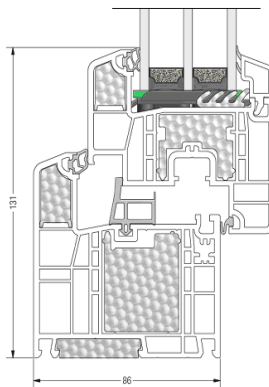


Рис. 5.12. Шестикамерный профиль оконного блока REHAU GENEО:
а – GENEО; б – GENEО PHZ

Конструкция профиля позволяет установить стеклопакеты толщиной до 53 мм.

Увеличить сопротивление теплопередаче оконного блока можно путем использования профильных систем монтажной глубины свыше 100 мм (рис. 5.13).

Использование широких профилей не вносит существенно влияния на приведенное сопротивление теплопередаче всего окна, но значительно улучшает температурный режим узла сопряжения оконного блока и стеклопакета. Повышение температуры на внутренней поверхности стеклопакета снижает вероятность конденсации водяного пара из воздуха помещения в случаях нарушения их микроклимата.



Рис. 5.13. Широкопрофильная оконная система (разрез)

Профильная система Topline Plus (рис. 5.14) имеет сопротивление теплопередаче оконного блока $R_T^{\delta} = 1,37 \text{ м}^2\text{°С/Вт}$. Геометрия профиля при ширине 104 мм, в сочетании со специальными теплоизоляционными вставками, обеспечивает коэффициент теплопередачи окна $K = 0,8 \text{ Вт/(м}^2\text{°С)}$, повышенные шумоизолирующие характеристики. По теплозащитным качествам оконные заполнения VEKA TOPLINE Plus соответствуют требованиям Института пассивных зданий [5.10].

Использование широких профилей уменьшает светопропускание окна, так как непрозрачная часть имеет большие размеры, как импоста, так и комбинации блок-створка. Применение двух энергосберегающих стекол также снижает светопропускание, а так как это основная функция окна, то следует учитывать, что повышение энергосбережения ведет к потере светопропускания.

В окнах из дерева также имеет место увеличение ширины профиля и его высоты, снижающее их светопропускание.

Основное влияние на приведенное сопротивление теплопередаче окон оказывают теплозащитные качества стеклопакетов. Перенос теплоты через стеклопакет происходит излучением, конвекцией и теплопроводностью. Повышать теплозащитные качества его можно, уменьшая или изменяя интенсивность и механизм процессов переноса теплоты, учитывая при этом требования условий летней и зимней эксплуатации.

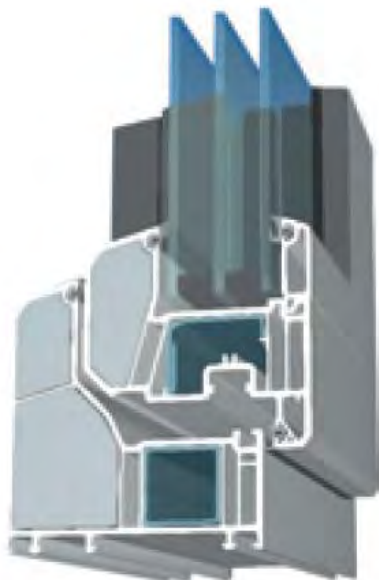


Рис. 5.14. Оконные заполнения VEKA TOPLINE Plus

Величиной, характеризующей теплозащитные качества светопрозрачных конструкций в зимних условиях эксплуатации, служит приведенное сопротивление теплопередаче. В летних же условиях определяющую роль играют элементы солнцезащиты, определяемые конструкцией и характеристиками остекления.

Наиболее интенсивным видом переноса теплоты через стеклопакеты является излучение.

Солнечное излучение в видимой и инфракрасной областях имеет длину волн $\lambda = 0,4 \dots 3,0$ мкм. Обыкновенное оконное стекло почти полностью отражает или поглощает излучение в ультрафиолетовой области $\lambda < 0,4$ мкм. Проницаемость его для видимой части спектра $\lambda = 0,4 \dots 0,8$ мкм и инфракрасной $\lambda = 0,8 \dots 3,0$ мкм составляет 80...90%.

Коротковолновое излучение, проникнув в помещение, поглощается конструкциями и предметами обстановки и превращается в теплоту. В дальнейшем эта теплота в виде длинноволнового излучения с $\lambda > 3$ мкм остается в помещении. Покинуть его через окно

оно не может, т.к. для излучения с $\lambda > 3$ мкм оконное стекло почти непроницаемо.

При оценке теплотехнических и солнцезащитных характеристик стеклопакета по отношению к потоку энергии излучения пользуются следующими основными характеристиками:

E – поток солнечной энергии падающей на остекление, Вт;

ER – процент солнечной энергии отраженный от остекления, %;

R – отражательная способность стекла;

EA – процент солнечной энергии поглощенный остеклением, %;

A – поглощательная способность стекла;

ED – процент солнечной энергии прошедшей сквозь остекление, %;

D – пропускательная способность стекла.

На рис. 5.15 представлена схема, показывающая потоки энергии, взаимодействующие с одинарным стеклопакетом [5.11].

Общий поток энергии, прошедший через стеклопакет, равен сумме потоков энергии непосредственно прошедший через него - DET и энергии, излучаемой внутрь помещения EA'' , после преобразования её из коротковолновой в длинноволновую.

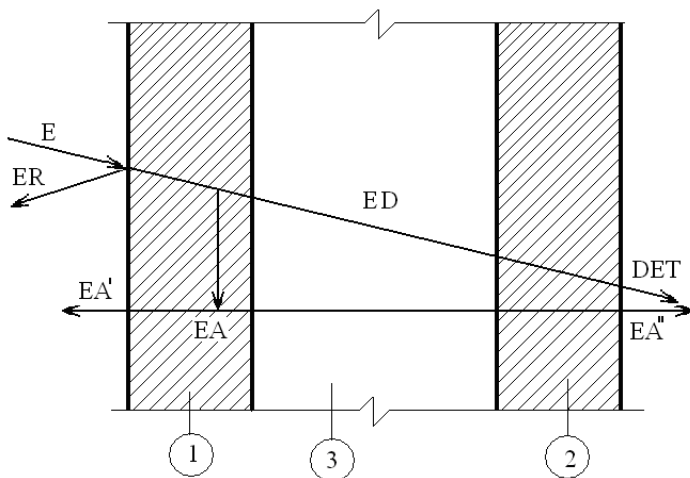


Рис.5.15. Схема потоков энергии через одинарный стеклопакет:

1 – наружное стекло; 2 – внутреннее стекло; 3 – межстекольное пространство

Оценка солнцезащитных качеств стеклопакета выполняется по величине солнечного фактора, определяющего отношение общей энергии, поступившей в помещение, к энергии, падающей на остекление

$$SF = \frac{DET + EA''}{E} \quad (5.7)$$

Для сравнения в табл. 5.3 приведены солнцезащитные характеристики некоторых стеклопакетов, в конструкции которых использованы энергосберегающие стекла.

Таблица 5.3

Солнце защитные характеристики стеклопакетов

Характеристики	Вариант стеклопакета с наружным стеклом			
	I	II	III	IV
	Stopsol Supersilver Grey, воздух	Stratobel Stopray 44.1 silver, аргон	Guardian Float Glass ExtraClear, аргон	Stopsol Supersilver Grey, аргон
1	2	3	4	5
Отраженная энергия, ER, %	31	42	34,7	33
Поглощенная энергия EA, %	53	49	60	52
Солнечный фактор SF, %	24	22	10,4	23

Из характеристик стеклопакетов, представленных в табл. 5.3, видно, что отражательная способность их лежит в пределах ER = 31-42 %, а солнечный фактор SF = 10,4-24 %, что существенно позволяет снизить энергозатраты на кондиционирование помещений в летний период года.

Для снижения передачи энергии через стекло используются различные покрытия, пропускающие через него излучения с короткой или длинной волной спектра.

Стекло с низкоэмиссионным покрытием пропускает внутрь помещения коротковолновую часть солнечного излучения и задерживает длинноволновую. Низкоэмиссионное покрытие наносят различными способами. При изготовлении стекла его поверхность химическим путем покрывается тонкопроводящим прозрачным слоем окислов металлов, что значительно снижает излучательную способность стекла. Такие покрытия называют «защитными».

Другой метод покрытия, называемый «солнцезащитным», заключается в вакуумном напылении многослойной (чередующейся серебро-диэлектрик) пленки. Такие стекла значительно превосходят «защитные» по своим теплосберегающим свойствам.

Наносимые на поверхность стекла покрытия выполняют определенные функции. Так, увеличение отражения достигается покрытием стекла материалом с коэффициентом преломления большим, чем коэффициент преломления стекла. Применение оксида титана (TiO_2) – для покрытия стекол одинарного пакета уменьшает поступление энергии в помещение с 73 % до 40 %.

Различают стекла с мягким и твердым покрытием. Мягкие покрытия, *i*-покрытия, подверженные повреждениям при эксплуатации, как правило, наносятся на поверхность стекла, обращенную внутрь стеклопакета. Твердые покрытия, *k*-покрытия, наносятся на наружную поверхность стеклопакета.

Особенность солнцезащитных покрытий – максимальная светопрозрачность в видимом диапазоне волн и повышенное отражение в инфракрасном диапазоне. Кроме того, эти покрытия снижают перенос теплоты излучением через газовую прослойку.

С внутренней стороны стеклопакетов размещают «энергосберегающие» стекла. Их поверхность покрыта низкоэмиссионным оптическим покрытием из электропроводящего металла и защищена вторым покрытием из оксида металла. Тонкие слои создаются из металлов, таких как медь, алюминий, серебро или золото. Покрытия имеют нейтральный цвет и уменьшают теплоизлучающую способность поверхности стекла. Схема низкоэмиссионного покрытия показана на рис. 5.16.

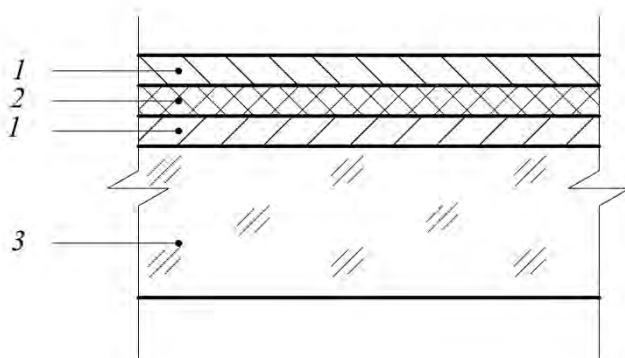


Рис. 5.16. Схема низкоэмиссионного покрытия:
1 – диэлектрик; 2 – серебро; 3 – стекло

При нанесении солнцезащитного покрытия на поверхность наружного стекла стеклопакета уменьшается поток теплоты в помещение. При установке отражающего стекла со стороны помещения уменьшается отвод теплоты из него.

Теплозащитные качества стеклопакетов зависят от использования при их изготовлении не только стекол с низкоэмиссионным селективным покрытием, но и количества их в изделии. Вследствие этого очевиден переход к применению двухкамерных стеклопакетов, в которых стекла имеют низкоэмиссионное покрытие. При этом стекло, непосредственно контактирующее с внутренним воздухом, преграждает путь энергии из помещения к наружному воздуху. Качество стеклопакетов зависит от их герметичности, которая достигается склеиванием его с применением эффективных герметиков. Стеклопакеты с высокой степенью герметичности изготавливают с двойным уплотнением. При этом первый слой служит для задержания влаги, а второй – обеспечивает необходимую прочность соединения. Благодаря герметичности стеклопакета исключается проникновение сквозь окно пыли, атмосферной влаги, улучшаются тепло- и звукоизоляционные качества окон.

Теплозащитные качества стеклопакетов зависят от расстояния между стеклами. Многочисленные исследования, проведенные на стеклопакетах различной толщины, выявили, что оптимальная толщина газовой прослойки равна 16...20 мм.

Для уменьшения конвективного теплообмена в межстекольном пространстве стеклопакетов необходимо создать вакуум порядка $10^{-2} \dots 10^{-3}$ мм рт.ст. или заполнить камеры инертными газами – аргоном, криптоном или др.

Применение в стеклопакетах мягкого теплоотражающего низкоэмиссионного стекла и замена воздуха на криптон повышает их теплозащитные качества в 3 и более раз.

Снижение переноса теплоты теплопроводностью осуществляется заменой дистанционных рамок стеклопакета из алюминия на так называемые «теплые» дистанционные рамки. Замена алюминиевой рамки на рамку из термикса повышает температуру на внутренней поверхности у края стеклопакета на $6 \dots 7^\circ\text{C}$.

Если в двухкамерном стеклопакете с двумя энергосберегающими стеклами коэффициент теплопередачи $K = 1,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{C})$, то при заполнении одной из камер аргоном можно добиться коэффициента $K = 0,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{C})$, если же две камеры заполняются аргоном, то – $K = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{C})$. При заполнении одной камеры криптоном получаем коэффициент $K = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{C})$, при заполнении двух камер данный коэффициент будет равен $0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{C})$.

Таким образом, при заполнении аргоном двух камер в стеклопакете с двумя низкоэмиссионными стеклами сопротивление теплопередаче их будет $R_T = 1,25 \text{ м}^2\text{C}/\text{Вт}$. Это дает возможность получения энергоэффективных окон.

При выборе оконного заполнения следует учитывать не только теплоизоляционные качества или защиту от солнца, но и защиту помещения от внешнего шума. Акустические характеристики оцениваются показателем изоляции от воздушного шума.

Индекс изоляции воздушного шума R_w стеклопакетов может лежать в пределах от 29 дБ до 51 дБ. Для стеклопакета формулы 4–12–4 значение индекса изоляции равно 29 дБ. Повышение шумозащитных качеств стеклопакета связано с увеличением его массы, использованием многослойного стекла и стекол, имеющих различную толщину и массу. Т.е. следует учитывать при выборе стекол пакета, что их толщина и звукоизоляционные качества взаимосвязаны.

Тот факт, что современные оконные блоки имеют узкие коробки, влияет на повышение теплопотерь через откосы наружных стен и возможность конденсации на них водяного пара из воздуха поме-

шений. Это указывает на необходимость особого внимания к тепловому режиму узлов сопряжения блоков с наружными стенами.

Исключить попадание блока в зону температур ниже температуры точки росы на поверхности откосов можно, если выполнено одно из следующих мероприятий.

1. Смещение оконного блока к центру наружной стены, так чтобы на откосах окна температура была выше температуры точки росы.

2. Устройство или увеличение теплозащиты между оконным блоком и наружной стеной, в том числе и путем установки термовкладышей в толще наружной стены по периметру проема.

3. Теплоизоляция наружных стен и оконных откосов с наружной стороны проемов.

4. Теплоизоляция оконных откосов с внутренней стороны проемов.

Расчеты температурных полей для различных условий сопряжения узлов со стенами кирпичных и панельных зданий показали, что наиболее простыми и эффективными решениями является теплоизоляция проемов с наружной и внутренней стороны (рис. 5.17).

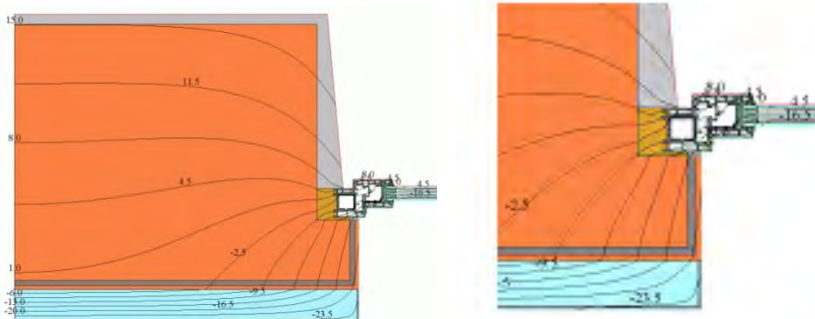


Рис. 5.17. Температурное поле узла сопряжения оконного блока из ПВХ с кирпичной стеной толщиной 510 мм и наружной теплоизоляцией пенополистирольными плитами толщиной 60 мм

Одним из способов уменьшения теплопотерь через окна является применение стеклопакетов с электронагревом стекла. Их принцип работы довольно простой. Через твердое покрытие стекла пропускается электрический ток, что позволяет выравнять температуры между наружным воздухом и воздухом в помещении.

Повышение теплозащитных качеств оконных заполнений приводит к уменьшению теплотерь помещений и, следовательно, мощности и количества отопительных приборов. Но в то же время предпочтительным остается расположение приборов вдоль окон при соблюдении требования об их размере, составляющем 75% длины окна, а для светопрозрачных конструкций фасадов желательна установка напольных конвекторов отопления с наддувом для обеспечения поступления теплого воздуха вдоль всей плоскости остекления.

Теплотери через оконное заполнение можно сократить, если размеры подоконника и высота его расположения над нагревательным прибором будут оптимальными в пределах $\delta = 50 \dots 100$ мм. В этом случае потоки нагретого воздуха от нагревательного прибора беспрепятственно поднимаются вверх, обогревая поверхность стекла.

5.4 Особенности тепловлажностного режима современных оконных заполнений

Эксплуатация оконных заполнений сопровождается протеканием взаимосвязанных процессов тепло- и массопереноса через оконные блоки, стеклопакеты и сопряжения блока с наружной стеной. Наличие контакта окна с внешней и внутренней средой, изменяющей свои температурные и влажностные режимы, как по периодам года, так и в течение суток, вызывает появление определенных дефектов. К основным, часто встречающимся, дефектам относятся:

- разрушение стеклопакета из-за термошока;
- разрушение стеклопакета из-за избыточно высокого или низкого давления в газовой (воздушной) прослойке;
- увеличение воздухопроницаемости притворов и монтажных швов;
- конденсация водяного пара в местах сопряжений стеклопакета с оконным блоком;
- конденсация водяного пара на откосах оконных проемов.

а. Разрушение стеклопакета из-за термошока.

При перепадах температур по поверхности стеклопакета возможно быстрое расширение стекла на одном более нагретом участке. Если остальные участки стеклопакета остаются холодными и

препятствуют расширению нагретого, возникают растягивающие напряжения. При превышении величины напряжений механической прочности стекла, возникает разрушение, известное, как «термический шок». Термошоку подвержены неупрочненные стекла находящиеся под неравномерным нагревом.

Избежать термошока можно при увеличении сопротивления стеклопакета разрушающим напряжениям, т.е. увеличивая его прочность. Достигается указанное использованием в стеклопакете закаленного стекла, обладающего напряжением сжатия в поверхностных слоях.

б. Разрушение стеклопакета из-за избыточно высокого или низкого давления в газовой (воздушной) прослойке.

В летний и зимний периоды года, из-за разности температур, между давлением газа в герметичной камере стеклопакета и атмосферным давлением среды возникает их перепад. Величина перепада давлений может стать критической и привести к разрушению стекла, на которое ложится нагрузка.

Обезопасить стеклопакет от возможного разрушения можно при соблюдении определенных правил изготовления. К ним относятся:

- выбор отношения высоты к ширине не более 4;
- принятие размеров изделий не менее 350 × 350 мм;
- применение в двухкамерных изделиях дистанционных рамок одного размера.

Разрушение от разности давлений не страшно для стеклопакетов, в конструкции которых использовано закаленное стекло.

в. Увеличение воздухопроницаемости притворов и монтажных швов.

Поступление наружного воздуха через оконное заполнение может происходить по периметру створок, по монтажному шву или в сопряжении блок-подоконник.

Основной причиной, вызывающей повышение воздухопроницаемости окон служат температурные деформации профиля. При высоком перепаде температур на внешней и внутренней сторонах профиля, из-за большого коэффициента линейного температурного расширения ПВХ, возникают его деформации как в продольном направлении, с изгибанием по дуге, так и в поперечном сечении, с выворачиванием элементов коробки и притворов. Термическую деформацию испытывает и стеклопакет из-за возникновения изги-

бающих напряжений. Наличие деформаций приводит к появлению зазоров до 2 мм по ширине.

Появление зазоров может быть также связано с нарушениями технологии монтажных работ, с неверным подбором фурнитуры и с другими причинами.

Подтверждением влияния температурных деформаций на воздухопроницаемость оконных заполнений из профиля ПВХ служат результаты испытаний, изложенные в [5.12] и представленные на рис. 5.18.

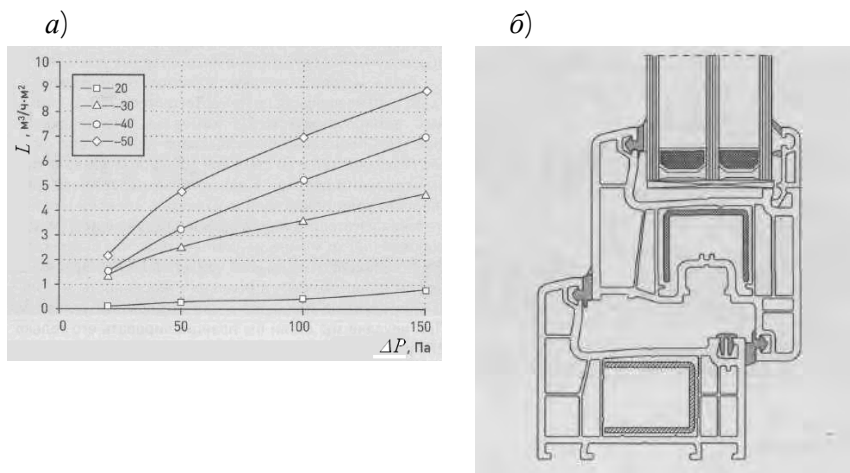


Рис. 5.18. Увеличение воздухопроницаемости оконного заполнения из профилей Termotech 752 от перепада давлений при фиксированных перепадах температуры:
а) результаты испытаний; б) сечение профилей

Испытания оконного заполнения выполнены в низкотемпературной камере КТК-2009. Температуры со стороны холодной камеры поддерживались -20°C , -30°C , -40°C , -50°C , перепад давления $\Delta P = 0 \dots 150$ Па.

Анализ графиков $L = f(\Delta P)$ при фиксированных перепадах температур указывает на связь термических деформаций профиля с увеличением объемов воздуха, проходящего за счет фильтрации через заполнение.

Зависимость между воздухопроницаемостью и перепадом давления по сторонам оконного заполнения может быть представлена в виде $L \sim \Delta P^{2/3}$.

Увеличение воздухопроницаемости окон влечет возникновение сопутствующих дефектов, в основном связанных с конденсацией водяного пара на охлажденных поверхностях.

г. Конденсация водяного пара на внутренней поверхности остекления оконного заполнения.

Особенности конструкции оконного заполнения вызывают неравномерность распределения температуры по высоте поверхности остекления, обращенной в помещение. Об этом свидетельствуют результаты исследований, приведенные в [5.1, 5.13]. В Институте технической теплофизики НАН Украины [5.14] выполнены сравнительные экспериментальные исследования распределения температур и мощности удельных тепловых потоков по высоте современных стеклопакетов. Исследования проведены на двух образцах: однокамерном стеклопакете с простыми стеклами и заполнением прослойки воздухом «4-12-4» и двухкамерном с энергоэффективными стеклами и заполнением прослоек аргоном «4Е-12Аг-4-12Аг-4Е». Дистанционные рамки стеклопакетов из алюминия. При испытаниях стеклопакеты были помещены в оконные блоки из дерева. Результаты исследований оформлены в виде графиков (рис. 5.19).

Графические зависимости, представленные на рис. 5.19, показывают существенную неравномерность распределения температур, а также тепловых потоков, по высоте стеклопакетов. Краевые эффекты влияют на снижение температур по их поверхности у оконных блоков с одновременным увеличением мощности удельных тепловых потоков. Уменьшение температуры в зависимости от сопротивления теплопередаче стеклопакета зафиксировано на 4...10°C по сравнению с центральной зоной, а тепловые потоки увеличились в несколько раз.

К техническим решениям, позволяющим исключить конденсацию пара, относится использование теплоизолирующих дистанционных рамок и более глубокое до 25 мм перекрытие краевой зоны стеклопакета профилем. При выполнении указанных рекомендаций достигается повышение температуры краевой зоны, т.е. снижается вероятность выпадения конденсата. При этом коэффициент теплопередачи окна $K_{ок}$ уменьшается приблизительно на величину

0,04 Вт/(м²·°C), что соответствует повышению величины сопротивления теплопередаче на $\Delta R_T \approx 0,08 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

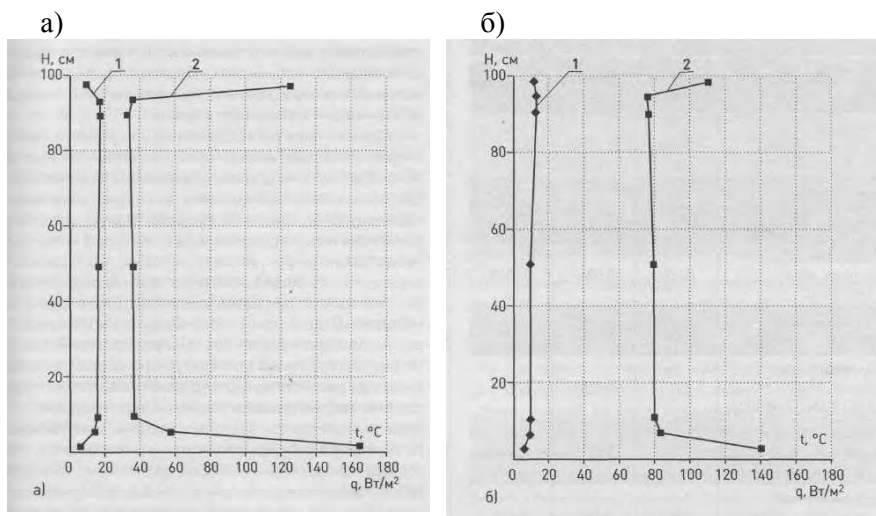


Рис. 5.19. Распределение температур и удельной мощности тепловых потоков по высоте стеклопакетов:

a – двухкамерного 4E-12Ar-4-12Ar-4E; *б* – однокамерного 4-12-4;

1 – температура по поверхности стеклопакета со стороны внутреннего воздуха; 2 – мощность удельного теплового потока через стеклопакет

д) Конденсация водяного пара на откосах оконных проемов

В отопительный период года при изменениях наружных и внутренних температур воздуха, оконное заполнение испытывает нагрузки от расширения и сжатия блока, которые инициируют возникновение в нем напряжений и деформаций, приводящих к появлению трещин и щелей. В первую очередь это относится к узлу сопряжения блока со стеной, через который проходит перенос теплоты и массы. Встречаются направленные навстречу друг другу потоки холодного воздуха, фильтрующегося под действием ветрового и гравитационного давлений, и водяного пара, диффундирующего вследствие разности парциальных давлений его во внутреннем и наружном воздухе. Указанные потоки способствуют снижению

температур в узлах сопряжения и на откосах оконных проемов, что приводит к их увлажнению и образованию колоний грибка.

Учитывая многообразие конструкций наружных стен зданий и современных оконных заполнений, решение по снижению передачи теплоты через узел сопряжения, следует искать исходя из формирования его температурного поля. В пределах оконного откоса формируется двухмерное температурное поле, способствующее увеличению оттока теплоты на этом участке ограждения.

Необходимость рассмотрения указанной задачи вызвана отсутствием четкой информации по установке окон в стенах различного конструктивного решения в условиях Республики Беларусь, имеющих отличные от соседних стран климатические условия. Отличие связано с резкими изменениями температуры наружного воздуха, низкими ее величинами, высокой влажностью воздуха, чередованием солнечной и пасмурной погоды в течение дня и т.д.

Исследования температурных полей узлов сопряжений оконных блоков с наружными стенами включает.

1. Составление расчетных схем узлов сопряжений.
2. Расчет температурных полей узлов на основании составленных схем.

Определение температурного поля выполняется для двухмерной области расчетного участка оконного заполнения решением дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \ x \ \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \ y \ \frac{\partial t}{\partial y} \right) = 0, \quad (5.8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°С).

На расчетный фрагмент узла накладывается конечно-элементная сетка, в узлах которой определяются температуры, используя результаты решения дискретного аналога уравнения (5.8).

Граничные условия на поверхностях расчетного фрагмента конструкции III-рода. Коэффициент теплообмена внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций принимается равным $\alpha_{в} = 8,7$ Вт/(м²·°С), наружной поверхности – $\alpha_{н} = 23$ Вт/(м²·°С).

Температура воздуха внутри помещений $t_{в} = 18^{\circ}\text{C}$, наружного воздуха – $t_{н}$ в зависимости от тепловой инерции наружных стен «D»

и теплофизические характеристики материалов принимаются по [5.5].

Формирование температурного поля узла сопряжения рассмотрено на примере жилого шестнадцатиэтажного дома, наружные стены которого выложены из газосиликатных блоков толщиной $\delta = 400$ мм. Плотность бетона $\rho = 500$ кг/м³. С внутренней стороны кладка оштукатурена известково-песчаным раствором с наружной – сложным раствором.

Оконные блоки из поливинилхлоридного профиля, толщина короба профиля $\delta = 58$ мм. Стеклопакеты двухкамерные.

Температура наружного воздуха $t_n = -26,0^\circ\text{C}$ ($D = 6,6$).

Расчеты выполнены для узла сопряжения наружной стены по горизонтальному сечению (рис. 5.20).

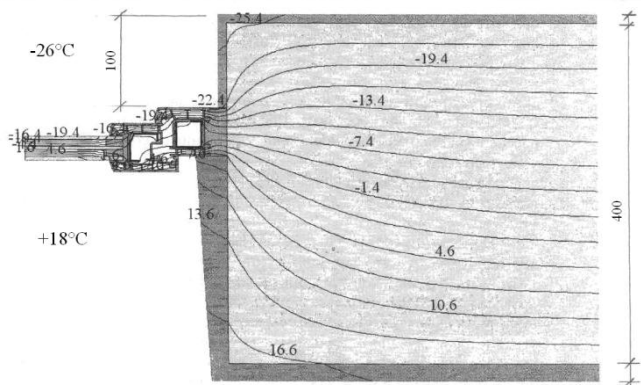
Анализ результатов расчета показал, что температура на внутренней поверхности оконного блока равна $\tau_{\text{пов}} = 4,6^\circ\text{C}$, а на откосах проема $\tau_{\text{пов}} = 6,1^\circ\text{C}$. Указанные температуры ниже температуры точки росы, равной $\tau_p = 8,8^\circ\text{C}$ при $\varphi_b = 55\%$ и $t_b = 18^\circ\text{C}$, что означает возможность конденсации водяного пара из воздуха помещения.

Улучшение теплового режима узла сопряжения возможно, если с наружной стороны откосов выполнить четверть из газосиликата той же плотности. Результаты расчета температурного поля новой конструкции показаны на рис. 5.21.

Во втором улучшенном варианте узла температура на поверхности откоса выше температуры точки росы $\tau_n > \tau_p = 8,8^\circ\text{C}$.

Следующий расчет проведен для узла сопряжения оконного блока из трехкамерного профиля из ПВХ со стеной, выполненной кладкой из полнотелого глиняного кирпича с наружной облицовкой керамической плиткой на цементно-песчаном растворе. С наружной стороны стены устроена дополнительная теплоизоляция из плит пенополистирольных $\rho = 15$ кг/м³, толщиной слоя $\delta = 60$ мм. Со стороны помещения стена оштукатурена известково-песчаным раствором. Толщина кладки $\delta = 510$ мм.

a)



б)

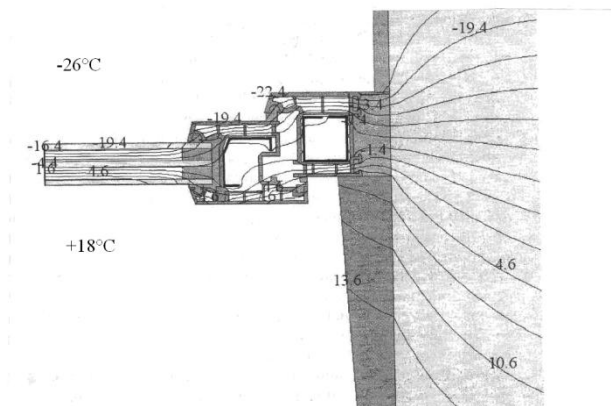
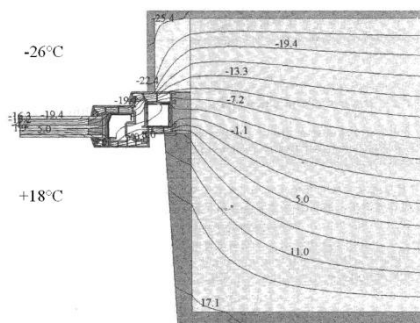


Рис. 5.20. Температурное поле узла сопряжения оконного блока с наружной стеной из газосиликатных блоков ($\rho = 500 \text{ кг/м}^3$), горизонтальное сечение:
а – общий вид; б – укрупненный участок

а)



б)

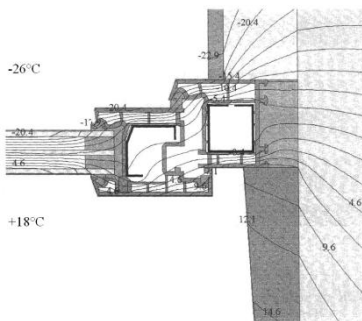


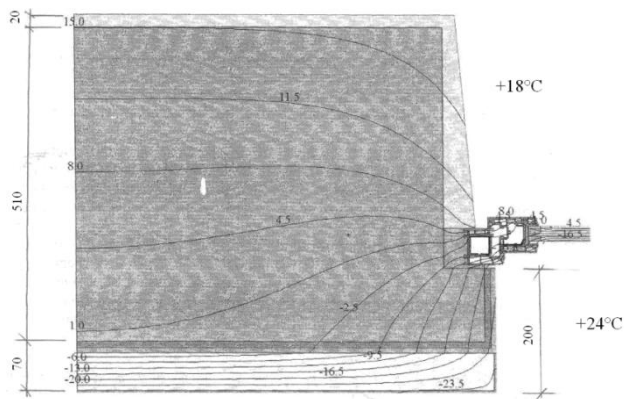
Рис. 5.21. Температурное поле узла сопряжения наружной стены с четвертью и с оконным блоком:
а – общий вид; б – укрупненный вид участка откоса

Оконный блок, установленный вплотную к четверти кладки, имеет коробку толщиной $\delta = 58$ мм. Остекление из двухкамерных стеклопакетов.

Расчетная температура наружного воздуха принята равной $t_{\text{н}} = -4,0^{\circ}\text{C}$ ($D > 7,5$).

Расчет температурного поля для горизонтального сечения узла сопряжения представлен на рис. 5.22.

a)



б)

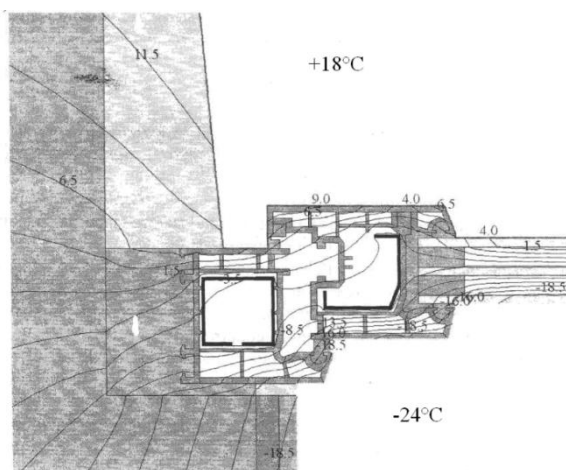


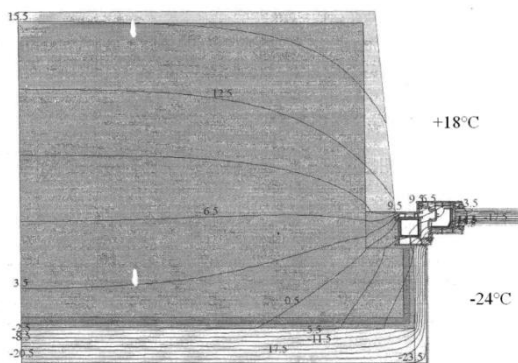
Рис. 5.22. Температурное поле узла сопряжения наружной стены с оконным блоком в местах устройства четвертой кладки:
a – общий вид; *б* – укрупненный вид участка откоса

Результаты расчета показали, что на поверхности коробки блока и на участке откоса температура в пределах $t_{\text{п}} = 7,5 \dots 8,8^\circ\text{C}$, что ниже температуры точки росы для расчетных условий жилых помещений. Отсутствие теплоизоляции на внешней поверхности от-

косов, отрицательно отразилось на температурном поле всего узла сопряжения.

На рис. 5.23 представлено температурное поле этого же узла после выполнения дополнительной теплоизоляции откоса в пределах от наружной поверхности стены до оконного блока. Толщина слоя теплоизоляции $\delta = 20$ мм.

а)



б)

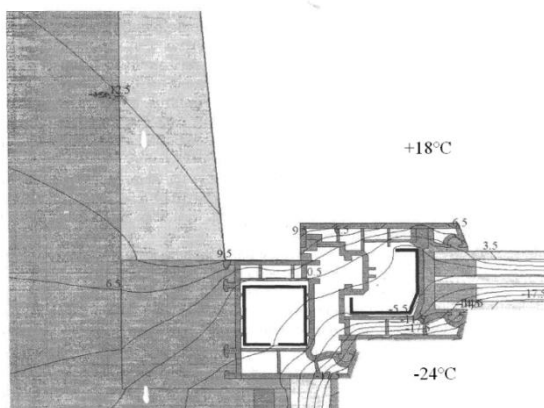


Рис. 5.23. Температурное поле узла сопряжения наружной стены с оконным блоком после выполнения дополнительной теплоизоляции:

а – общий вид, б – укрупненный вид участка откоса

Сравнение температурных полей до теплоизоляции откоса и после показало, что после выполнения дополнительного утепления на откосах со стороны помещения $\tau_{\text{пов}} > 9,5^\circ\text{C}$, что выше температуры точки росы.

На формирование неблагоприятного теплового режима узла сопряжения наружных стен и оконного заполнения часто оказывает влияние проведение некавалифицированного ремонта зданий. Примером служат результаты эксплуатации жилых помещений кирпичного дома после выполнения дополнительной теплоизоляции наружных стен. Толщина наружных стен $\delta = 510$ мм. Их дополнительная теплоизоляция выполнена плитами из пенополистирола толщиной $\delta = 60$ мм, и плотностью $\rho = 15$ кг/м³. Откосы проемов с наружной стороны теплоизолированы плитами толщиной $\delta = 20$ мм. Слой теплоизоляции укрыт полимерцементной штукатуркой толщиной $\delta = 4 \dots 6$ мм.

В первый год эксплуатации после ремонта жилых помещений в угловых сопряжениях откосов с внутренней стороны появились колонии «грибка». Вскрытием откосов со стороны улицы определено, что нижние откосы под металлическими отливами не имеют теплоизоляции. Боковые и верхние откосы проемов теплоизолированы. Выявление причины возникновения колоний грибка на внутренней поверхности откосов определялось на основании расчета объемного распределения температур участка стены в месте его сопряжения с оконным блоком.

Определение температурных полей для трехмерной области расчетного фрагмента ограждающих конструкций выполняется на основании решения дифференциального уравнения теплопроводности вида:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = 0. \quad (5.9)$$

В уравнении (5.9) те же обозначения, что и в уравнении (5.8). Расчет проводится при граничных условиях III рода по той же методике, что и уравнения (5.8).

На расчетный фрагмент ограждающих конструкций накладывается сетка, в узлах которой определяются температуры на различ-

ных участках, используя результаты решений дискретных аналогов уравнения (5.9).

Полученное температурное поле узла сопряжения наружной стены с оконным блоком показано на рис. 5.24.

а)



б)

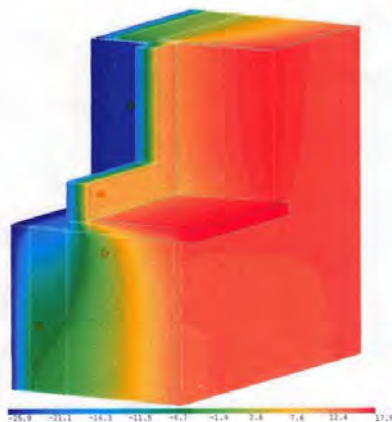


Рис. 5.24. Узел сопряжения наружной стены с оконным блоком:
а – колония «грибка» на откосе; б – трехмерное температурное поле

Минимальная температура на внутренней поверхности сопряжения получена равной $t_{\text{н}} = 8,2^{\circ}\text{C}$ при расчетных условиях $D = 2,4$; $t_{\text{н}} = -28^{\circ}\text{C}$. Эта температура ниже температуры точки росы $\tau_{\text{р}} = 8,8^{\circ}\text{C}$, что указывает на возможность конденсации водяного пара из воздуха помещения и увлажнения откоса.

5.5 Монтаж оконных блоков в проемах

Установка оконных блоков в проемах должна быть выполнена с учетом всех факторов, определяющих температурный режим оконного заполнения в целом. В первую очередь следует избегать появления мостиков холода. Во многом их появление зависит от неучета особенностей конструкции наружной стены и выбора места расположения блока в проеме. Многочисленные исследования причин

появления дефектов при установке блоков позволили разработать ряд рекомендаций, некоторые из которых изложены ниже.

В однослойных стенах с проемами имеющими «четверть», при установке современных блоков толщиной $\delta = 68 \dots 110$ мм и температурах наружного воздуха $t_n < -28^\circ\text{C}$ наличие мостиков холода практически неизбежно (рис. 5.25). Их наличие приводит к снижению температуры на поверхности откосов и возможности конденсации пара, а также к уменьшению сопротивления теплопередаче указанного участка стены на 40%.

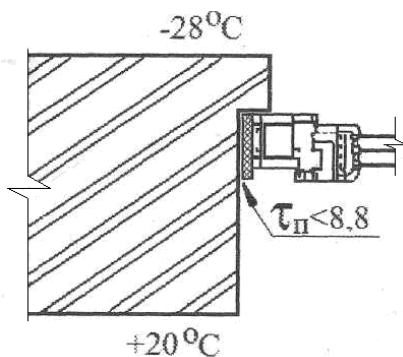


Рис. 5.25. Установка оконного блока в однослойной стене:
 τ_n – температура точки росы при $t_b = 18^\circ\text{C}$, $\varphi_b = 55\%$, $^\circ\text{C}$

Эффективными решениями, позволяющими уменьшать влияние мостиков холода являются:

- наружная теплоизоляция стен здания с обязательным утеплением наружных откосов;
- смещение оконного блока к середине стены с установкой теплоизоляционного вкладыша между блоком и четвертью, блоком и стеной;
- теплоизоляция внутренней поверхности откосов или устройство термовкладышей $\delta = 20 \dots 30$ мм вдоль внутренней поверхности откосов.

В многослойных наружных стенах с эффективными теплоизоляционными материалами, выходящими на поверхность откосов, оконные блоки следует устанавливать таким образом, чтобы блок

или часть его находилась против слоя утеплителя (рис. 5.26). Дополнительной теплоизоляции оконных проемов не требуется.

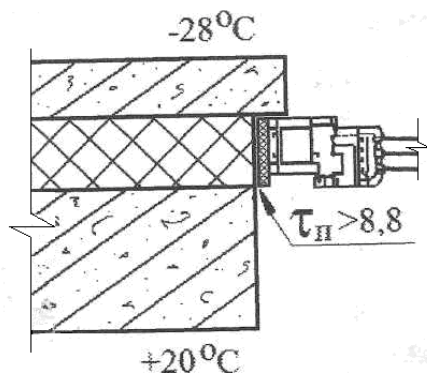


Рис. 5.26. Установка оконного блока в многослойной стене

При устройстве оконных блоков с узкой коробкой $\delta = 68$ мм в стенах из штучных материалов особое внимание необходимо обращать на теплоизоляцию железобетонных перемычек. В месте их размещения наиболее вероятно выпадение конденсата вследствие более высокой теплопроводности железобетона. При установке блоков необходимо вскрыть швы у наружной перемычки, запенить его и затем выполнить утепление откосов.

Высокие требования предъявляются к качеству соединительных швов. Они должны быть устойчивы как к внешним климатическим воздействиям, так и внутренним. Важно обеспечить защиту от просачивания влаги как с наружной стороны шва, при дождях и снегопадах, так и изнутри.

Чтобы добиться этого, стыковые швы должны заполняться теплоизолирующими материалами и проклеиваться изнутри замедляющими диффузию влаги пленками. С наружной стороны между окном и фасадом прокладывается предварительно сжатая герметизирующая лента, исключая проникновение влаги во время проливных дождей.

5.6 Окна для пассивного дома

Для домов, удовлетворяющих стандарту «пассивный дом», оконные заполнения должны иметь коэффициент теплопередачи не более $K = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, что соответствует сопротивлению теплопередаче равному $R_T = 1,2 \dots 1,25 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Такие окна известны под названием «окна для пассивного дома» или «пассивные окна».

Для оконных блоков пассивного дома используется уширенный деревянный профиль рамы и створки, имеющие внутри теплоизолирующие вставки в виде вспененных материалов, либо ПВХ-профиль с шестью и более камерами, часть которых при этом заполнена вспененной теплоизоляцией, или имеет термовкладыши из теплоизолирующего материала.

Для изготовления оконных профилей для пассивного окна можно использовать полиуретан и пенополиуретан [5.15]. Монолитный профиль имеет двухслойную структуру (рис. 5.27). Внешний слой из жесткого полиуретана, а внутренняя часть заполнена вспененным полиуретаном $\rho = 0,11 \text{ кг}/\text{см}^3$. При ширине $\delta = 90 \text{ мм}$, коэффициент теплопередачи профиля равен $K = 0,68 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,

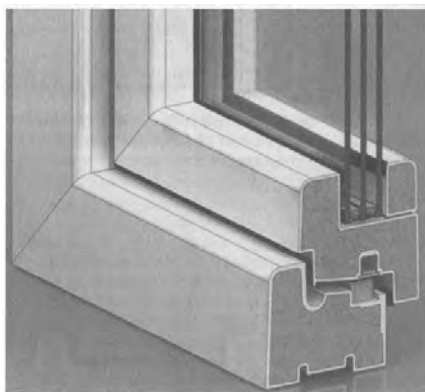


Рис. 5.27. Общий вид профиля из полиуретана и пенополиуретана

Исследование светопрозрачных конструкций из полиуретана показали их стабильность и неизменность прочностных свойств при длительных термических воздействиях (от -50°C до $+50^\circ\text{C}$), пони-

женном и повышенном воздушном давлении, а также воздействию всех указанных факторов на дождевальную установку при проверке герметичности швов и соединений. Коэффициент теплопередачи оконного заполнения размером 1230 × 1480 мм равен $K = 0,68 \dots 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$.

Стеклопакет в пассивном окне, как правило, применяется двухкамерный с заполнением межстекольного пространства инертными газами, а одно или два стекла имеют низкоэмиссионное покрытие. Обязательно наличие в стеклопакетах теплой дистанционной рамки.

Так как концепция пассивного дома предполагает полную герметичность здания, оконные заполнения должны также удовлетворять этому требованию. Герметичность окон означает, что они должны иметь два или три контура уплотнений, выполненных с предельной точностью.

Необходимость в вентиляционных клапанах в пассивном доме отсутствует, поскольку в нем обязательно устройство принудительной приточно-вытяжной вентиляции. Функция окон сводится к обеспечению освещенности помещений и тепловой защите.

Для того, чтобы установка пассивного окна дала ожидаемый результат, необходимо правильно его смонтировать в проеме. Наиболее приемлемы варианты установки, когда окно располагается как можно ближе к наружной плоскости стены, но при этом смонтировано полностью напротив слоя теплоизоляции или помещено частично в него. Для выполнения монтажа в слое теплоизоляции применяются специальные крепежные консоли и кронштейны, разработанные для этой цели.

5.7 Натурные исследования микроклимата помещений с современными оконными заполнениями или светопрозрачным фасадом

Использование современных конструкций оконных заполнений и светопрозрачных фасадов вступает в противоречие с обеспечением воздухообмена в помещениях. Следствием этого является повышение относительной влажности и температуры воздуха, увлажнение оконных проемов и наружных стен и т.д.

Анализ возникновения нарушений микроклимата помещений и дефектов ограждающих конструкций выполнен на конкретных примерах. Выбраны объекты, для которых характерны обсуждаемые недостатки.

Первый объект – жилой 19-ти этажный одноподъездный панельный дом серии 111-90. Дом с «теплым» чердаком [5.16].

В качестве оконных заполнений к установке приняты конструкции окон из алюминиевого профиля фирмы «Айтрабел».

Система вентиляции квартир – естественная. Приток естественный неорганизованный. Вытяжка естественная организованная с удалением воздуха на теплый чердак и из него в окружающую среду. На кухнях установлены электроплиты.

С начала эксплуатации дома в заселенных квартирах на стенах и оконных заполнениях были обнаружены увлажненные участки, на которых поселились колонии грибка. В связи с этим проведены инструментальные обследования квартир дома с наиболее сильными нарушениями санитарно-гигиенических условий проживания.

Анализ причин нарушения микроклимата и появления дефектов оконных заполнений выполнен на примере одной квартиры, расположенной на 19 этаже (рис. 5.28).

Измерения относительной влажности воздуха, проведенные после начала эксплуатации квартиры, по данным измерений центра гигиены и эпидемиологии, в жилых помещениях составляла $\varphi = 83 - 87\%$.

Осмотр квартиры выявил следующие дефекты:

- увлажнение стены, отделяющей комнату 3 и прихожую, от незадымляемой лестничной клетки;
- увлажнение наружных стен квартиры;
- конденсацию водяного пара на откосах оконных проемов;
- неудовлетворительное состояние системы вентиляции;
- повышенную влажность воздуха в жилых помещениях.

Натурные теплотехнические исследования микроклимата помещений квартиры проведены в зимний период.

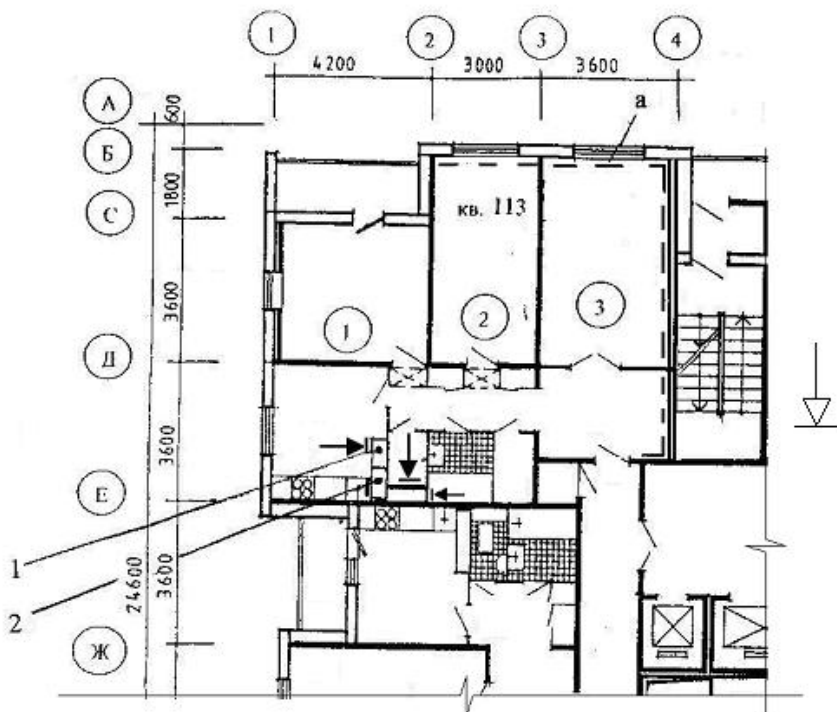


Рис. 5.28. План обследуемой квартиры:
а – участки увлажнения внутренней поверхности стен;
 1 – вентиляционный блок ВВ1-28;
 2 – вентиляционный блок ВВ1 зданий серии 111-90

Визуальное обследование квартиры выявило на откосах оконных и дверных проемов наружных стен многочисленные дефекты. На рис. 5.29 представлено оконное заполнение в комнате 3. На снимке видны участки откоса, пораженного плесенью. Больше поражены вертикальные участки проемов вдоль плоскости примыкания оконного блока.

Результаты инструментальных измерений температур и относительной влажности воздуха в помещениях квартиры даны в табл. 5.4.



Рис. 5.29. Оконное заполнение комнаты 3

Таблица 5.4

Параметры микроклимата квартиры

Помещения	Дата обследования	Температура, $t_{в}$, °С		Относительная влажность воздуха, φ , %	Примечание
		сухого термометра	мокрого термометра		
Комната 1	01.02.02	17,8	13,0	59,0	Комната не эксплуатируется на момент обследования
Комната 2	01.02.02	20,0	16,8	72,0	Детская комната
Комната 3	12.01.02	20,2	16,2	68,5	
	01.02.02	18,8	15,2	69,0	
Коридор	12.01.02	21,4	17,8	67,0	
Кухня	12.01.02	20,5	16,4	60,0	

Температура воздуха в помещениях находилась в пределах оптимального и допустимого значений температур по ГОСТ 30494-96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях». Исключение составляла комната 1, которая на момент обследования не являлась жилой.

Относительная влажность в обследуемых помещениях превышает допустимые величины по требованию ГОСТ 30494-96, $\varphi = 40 - 60\%$ и оптимальные значения для жилых помещений $\varphi = 30 - 45\%$.

Определение воздухообмена квартиры.

Вентиляция квартиры, как и всего дома, организована по схеме с «теплым» чердаком. Особенностью организации вентиляции в обследуемой квартире является наличие двух вентиляционных вытяжных стояков, размещенных в простенке между санитарным узлом и кухней (рисунок 5.28). Вытяжные системы смонтированы из вентблоков двух разных конструкций. Основной вентблок – ВБ1 с наклонными каналами-спутниками для зданий серии 111-90 и дополнительный вентблок ВБ1-28.

Вентблок ВБ1-28 служит для создания вытяжных систем кухонь с 10 по 19 этажи. При этом удаление воздуха осуществляется с использованием вытяжного вентилятора, установленного на входном отверстии каналов. Вентблок ВБ1 зданий серии 111-90 используется для вытяжных систем санитарных узлов квартир с 10 по 19 этажи. Он имеет один сборный канал и два канала с входными отверстиями как со стороны санузла, так и из кухни. Входное отверстие вытяжных каналов из блоков ВБ1 со стороны кухни на этажах с 10 по 19 должно быть закрыто (рис. 5.30). В обследуемой квартире на кухне оба приемных отверстия в вентблоках были открыты.

Установленные в оконных проемах стеклоалюминиевые блоки фирмы «Айтрабел», позволяет эксплуатировать их в трех режимах:

- створки окон полностью закрыты;
- створки окон находятся в режиме инфильтрации;
- створки окон находятся в режиме проветривания.

Определение объема удаляемого воздуха через приемные отверстия вытяжных систем дало следующие результаты:

- при закрытых створках окна – удаление воздуха из квартиры отсутствует;

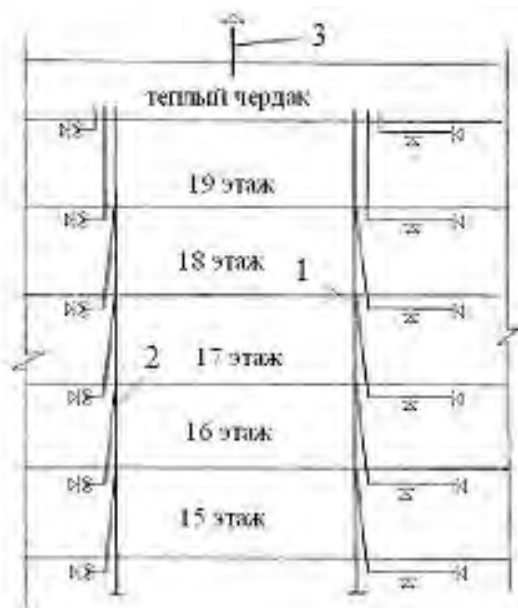


Рис. 5.30. Принципиальная схема вытяжных вентиляционных систем квартир верхних этажей здания

- 1 – вытяжные каналы санузла из блоков ВБ1 – зданий серии 111-90;
 2 – вытяжные каналы кухни из блоков ВБ1-28 института «Белпроект»;
 3 – вытяжная шахта

– при положении створок окон в режиме инфильтрации поток воздуха на кухне через входное отверстие блока ВБ1 для зданий серии 111-90 равен $G = 21,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, при необходимом расходе $G_n = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$; поток воздуха во входном отверстии в ванной комнате пульсирующий от 0 до $20 \text{ м}^3/\text{ч}$; в туалете удаление воздуха отсутствует;

– в режиме проветривания потоки удаляемого воздуха из кухни и ванной комнаты в пределах нормы;

– при включении вентилятора поток воздуха удаляемого из кухни транзитом через «теплый» чердак возвращается на кухню через приемное отверстие канала вентиляционного блока ВБ1 серии 111-90.

Анализ состояния системы вентиляции квартиры показывает:

– установка оконных блоков фирмы «Айтрабел» нарушила принятые для жилых помещений принципы организации вентиляции: приток воздуха в квартиры естественный неорганизованный, вытяжка естественная организованная, вследствие высокого сопротивления воздухопроницанию оконных заполнений;

– отсутствие притока воздуха, а также наличие открытого отверстия в блоке ВВ1 серии 111-90 способствует организации притока воздуха через «теплый» чердак на кухню при включении вытяжного вентилятора, т.е. «опрокидыванию потока воздуха»;

– объемы воздуха, удаляемые из квартиры при эксплуатации окон в режим инфильтрации, не соответствует нормативным требованиям.

Оконные заполнения. Установленные окна с алюминиевыми переплетами, изготовленные фирмой «Айтрабел», по данным испытаний, проведенных в БелНИИС, имеют сопротивление теплопередаче $R_{Т}^{np} = 0,65 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Эта величина получена путем осреднения пропорционально площадям: сопротивление теплопередаче светопропускающей части $R_{Т}^{cg} = 0,96 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ и непрозрачной части оконного заполнения $R_{Т}^H = 0,44 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. При этом сопротивление теплопередаче частей алюминиевой коробки окна, прилегающих к стене составляет от $0,37 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ до $0,51 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ в разных зонах конструкции.

Для оценки состояния оконных заполнений были изучены их поверхностные температурные поля в ИК-лучах. Результаты исследований показали, что температура на участках, пораженных плесенью, на $3 - 4 \text{ °C}$ ниже, чем на других участках откосов.

Минимальные температуры на поверхности оконного блока зафиксированы в местах примыкания стеклопакета и равны $8,8 \text{ °C}$ и $12,9 \text{ °C}$, а на откосах проемов равны $11,2 \text{ °C}$ и $13,3 \text{ °C}$.

Вскрытие узла примыкания оконного блока к наружной стене выявило «затекание» бетона в противопожарные отсеки.

Наружные стены. Наружные стены дома смонтированы из трехслойных стеновых панелей на гибких связях толщиной 300 мм. Теплоизоляционный слой из пенопласта плотностью $\rho = 15 \text{ кг}/\text{м}^3$ и толщиной слоя $\delta = 160 \text{ мм}$.

Расчетное приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен здания равно $R_T^{пр} = 2,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, экспериментально определенное сопротивление теплопередаче получено на различных участках стен в пределах $R_T = 2,1 \dots 2,4 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Для восстановления микроклимата помещений квартиры были выполнены следующие мероприятия.

На откосах оконных проемов в местах, где образовались участки покрытые плесенью:

- удален бетон до слоя пенополистирольной теплоизоляции;
- восстановлена по всему периметру оконного проема противопожарная отсечка с использованием для этого полистиролбетона с $\rho = 260 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- слой теплоизоляции из полистиролбетона заведен на 5-10 мм на коробку оконного блока.

Для восстановления системы вентиляции:

- закрыто приточное отверстие в блоке ВБ1 серии 111-90;
- прочищены вытяжные вентиляционные каналы ванной комнаты и туалета;
- проверена эффективность работы вытяжных каналов кухни и санитарного узла при эксплуатации окон в режиме инфильтрации;
- обеспечен организованный приток наружного воздуха путем установки приточных клапанов. В наружных стенах установлен саморегулируемый клапан VTK 100.

После устранения выявленных дефектов в квартире восстановились требуемые условия микроклимата.

Второй объект.

Общественное [5.17] четырехэтажное здание с подвалом. Центральной частью его является атриум со светопрозрачными ограждающими конструкциями (рис. 5.31), ориентированными на юго-восток.

Покрытие атриума – пространственная конструкция, уложенная на верхнем поясе структурной плиты, по которому смонтирована система алюминиевых несущих конструкций с ячейкой $1,154 \times 1,029 \text{ м}$. На несущую конструкцию уложены однокамерные стеклопакеты толщиной $\delta = 28 \text{ мм}$ со стеклами «Planibel». Наружное стекло – тонированное в массе, цвет – «бронза».



Рис. 5.31. Общий вид главного фасада здания

Вертикальные конструкции главного и частично боковых фасадов также выполнены с использованием стеклопакетов с наружным стеклом цвета «бронза», тонированным в массе. Схема светопрозрачных конструкций атриума показана на рис. 5.1.

Организация вентиляции здания осуществляется с использованием 5 приточных и 24 вытяжных установок с механическим и естественным побуждением движения воздуха.

В летний и переходный периоды года в здании нарушался воздушно-тепловой режим. Так в летние месяцы температура воздуха в атриуме повышалась до $t_b = 35^\circ\text{C}$.

Оценка микроклимата здания, выполненная в переходный период года при температуре наружного воздуха $t_n = 10 \dots 15^\circ\text{C}$ и периодическим поступлением солнечной радиации через светопрозрачные ограждения, определила следующие параметры климата атриума $t_b = 25 \dots 26,1^\circ\text{C}$, $\varphi_b = 50 \dots 55^\circ\text{C}$, $t_R = 26,6^\circ\text{C}$, $v = 0,2$ м/с. При этом на внутренней поверхности стеклопакетов температура была равна $t_{\text{ст}} = 26,9 \dots 27,9^\circ\text{C}$. На прозрачных вертикальных конструкциях –

$t_{\text{н}} = 25,7 \dots 26,9^{\circ}\text{C}$ на левом боковом, $t_{\text{н}} = 26,8 \dots 27,6^{\circ}\text{C}$ на правом боковом фасадах (рис. 5.32).

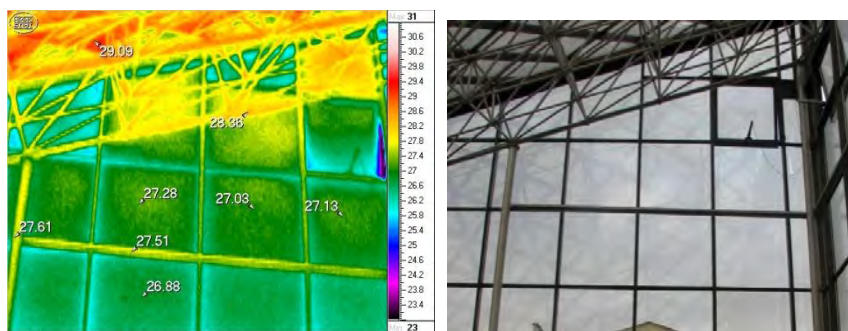


Рис. 5.32. ИК- и фотоснимок торцевой стены атриума на отм. + 9,900

Следует также отметить, что система приточной вентиляции обеспечивала реальную подачу воздуха в атриум в пределах 78% от проектного значения. Измерением температуры воздуха при прохождении его через воздухозаборные шахты и воздуховоды, установлено, что температура наружного воздуха за счет подсосов, в том числе и из воздуховода рециркуляции, увеличивается на $5 \dots 10^{\circ}\text{C}$.

Полученные при обследовании результаты указывают на то, что нарушение микроклимата в объеме атриума связано как с неудовлетворительными теплозащитными характеристиками ограждающих конструкций, так и с проблемами в организации вентиляции.

Расчет солнечного фактора по формуле 5.3 показал, что для стеклопакетов, установленных на фасадах и покрытии атриума, он равен $SF = 37\%$. Сравнение по солнечному фактору данного стеклопакета со стеклопакетами, в конструкции которых использованы солнцезащитные и энергосберегающие стекла, характеристики которых представлены в таблице 5.3, указывает на низкую защиту атриума от проникновения солнечной энергии в летний период года.

Оценка влияния солнечного облучения ограждений на микроклимат атриума выполнена для летнего периода года с учетом переноса теплоты через светопрозрачные конструкции лучистым и конвективным потоками.

Мощность теплового потока, поступающего в помещение через заполнение световых проемов, определена по формуле:

$$Q_{\text{п}} = q_{\text{пр}} + q_{\text{пт}} \cdot F_{\text{п}}, \quad (5.10)$$

где $q_{\text{пт}}$ – мощность теплового потока за счет теплопередачи, Вт/м²;

$q_{\text{пр}}$ – мощность теплового потока за счет солнечной радиации, Вт/м²;

Для горизонтального и близко к горизонтальному заполнению расчет $q_{\text{пр}}$ выполнен по приближенной методике с использованием солнечного фактора

$$q_{\text{пр}} = q_{\text{п}} \cdot SF \cdot \tau_2, \quad (5.11)$$

где $q_{\text{п}}$ – мощность теплового потока солнечной радиации, поступающей на поверхность остекления, Вт/м²;

SF – солнечный фактор;

τ_2 – коэффициент, учитывающий затенение светового проема переплетами ($\tau_2 = 0,8$).

Результаты оценки влияния поступления солнечной энергии в объем атриума в зависимости от характеристик стеклопакетов даны в табл. 5.5 при температуре наружного воздуха +25,8°С.

Анализ полученных данных показывает, что при выборе варианта стеклопакета, следует ориентироваться на характеристику солнечного фактора SF в пределах 0,14÷0,24. При этом следует отметить, что при отсутствии кондиционирования, обязательного для атриума, прогнозируемая температура воздуха может в нем повышаться до $t_{\text{в}} = 40$ °С и выше.

Организация вентиляции атриума осуществлена в использовании приточных и вытяжных механических установок.

Таблица 5.5

**Теплопоступление в атриум
при различных стеклопакетах остекления**

Вариант	Солнечный фактор стеклопакетов, SF , %	Коэффициент поглощения солнечной энергии E_A , %	Суммарные теплопритоки за счет теплопередачи, Вт	Суммарные теплопритоки солнечной радиации, Вт	Прогнозируемая температура внутреннего воздуха в атриуме, $t_{атр}$, °С
1	2	3	4	5	6
1	37	58	-21779	130536	+57,37
2	24	48	-6482	84672	+48,39
3	10	60	9888	35281	+38,68
4	14	71	8476	49391	+44,42

Для подачи воздуха в атриум предусмотрена приточная система, осуществляющая его распределение:

– на отм. 3.300 через девять вентиляционных решеток типа АТ-АГ 425×125;

– на отм. 6.600 через две вентиляционные решетки типа АТ-АГ 425×125;

– на отм. 9.050 через две вентиляционные решетки типа АН-АГ 1999×225;

– на отм. 9.900 через две вентиляционные решетки типа АН-15АГ 425×225 и через две вентиляционные решетки типа АТ-АГ 425×125.

Воздухообмен в атриуме был определен на основании нормативных документов, действовавших на момент проектирования объекта.

Экспериментально измеренные объемы воздуха подаваемые в атриум в сравнении с проектными величинами сведены в табл. 5.6.

В приточной системе атриума предусмотрена рециркуляция воздуха в холодный период года в объеме 6200 м³/ч. Для забора воздуха на рециркуляцию в помещении предусмотрена вентиляционная решетка АР-АГ 4479×225 на отм. 6.300.

Таблица 5.6

Результаты определения суммарного расхода приточного воздуха в атриуме

№ п/п	Помещение	Расход воздуха по результатам обследования, м ³ /ч	Расход воздуха по проекту, м ³ /ч
1	Площадка на отм. 3.300	1440	3015
2	Площадка на отм. 6.600	542	600
3	Помещение атриума на отм. 9.050	4381	4000
4	Площадка на отм. 9.900	880	1600
	Итого:	7243	9215

Воздушная заслонка на рециркуляционном воздуховоде приточной системы должна быть открыта в холодный период года и закрыта в теплый период года.

Удаление воздуха из атриума осуществляется вытяжными системами через две вытяжные решетки, расположенные на отм. 12.650.

Одна из вытяжных систем оборудована крышным вентилятором TOD 400-4 производительностью 3300 м³/ч. Вторая вытяжная система оборудована крышным вентилятором TFD 560-6 производительностью 6800 м³/ч.

Анализ результатов обследования позволяет сделать вывод, что в целом в атриуме обеспечивается равномерное распределение воздуха. При этом по проекту расход приточного воздуха составляет 9215 м³/ч, по данным обследования – 7243 м³/ч. Расход приточного воздуха, подаваемого на площадки на отм. 3.300 и 9.900 меньше проектного.

На основании обобщения экспериментальных и аналитических исследований светопрозрачных конструкций и приточно-вытяжной системы вентиляции были разработаны рекомендации по нормализации микроклимата, которые сводились к следующему.

1. Светопрозрачные конструкции атриума следует выполнить из стеклопакетов с внешним солнцезащитным стеклом. Солнечный фактор стеклопакетов следует принимать в пределах $SF = 10 \dots 14\%$.

2. Сохранить приточную систему для подачи воздуха в помещение атриума при температуре наружного воздуха до $18 \dots 20^\circ\text{C}$, обеспечив расчетные его объемы.

3. Для обслуживания помещения атриума при более высоких температурах наружного воздуха дополнительно предусмотреть устройство сплит-систем с установкой внутренних блоков по обе стороны площадки на отм. 3.300.

Выполнение указанных рекомендаций позволят обеспечить в объеме атриума требуемые параметры микроклимата.

Приведенные примеры показывают сложность обеспечения микроклимата в помещениях с современными оконными заполнениями в случаях, когда одновременно с проектированием ограждений не учитываются требования по обеспечению воздухообменов в зданиях.

5.8 Выводы

1. В строящихся зданиях широко используются наружные ограждающие конструкции, у которых площадь остекления составляет $70 \dots 80\%$ от общей площади. Светопрозрачные ограждения являются наиболее слабым звеном в системе ограждающих конструкций зданий. Их сопротивление теплопередаче, на эксплуатируемых объектах строительства до 1980 г., лежит в пределах $R_T = 0,34 \dots 0,55 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

2. Нарушения микроклимата помещений, возникающие из-за дефектов светопрозрачных ограждений и оконных заполнений, определены по результатам натурных обследований эксплуатируемых зданий. Выявлены следующие нарушения:

- конденсация водяного пара на окнах;
- повышенная влажность воздуха в зимний период;
- повышенная температура воздуха в летний период;
- неудовлетворительное состояние систем вентиляции.

3. К основным дефектам оконных заполнений относятся:

- разрушение стеклопакета из-за термошока;
- разрушение стеклопакета из-за избыточно высокого или низкого давления в газовой прослойке;

- увеличение воздухопроницаемости притворов и монтажных швов;
- конденсация водяного пара в местах сопряжения стеклопакета с оконным блоком;

- конденсация водяного пара на откосах оконных проёмов.

4. Конструктивные решения по исключению дефектов оконных заполнений определены на основании анализа теплотехнических особенностей стеклопакетов и оконных блоков и формирования температурных полей в узлах сопряжения блоков с наружными стенами. К ним относится использование:

- двойных фасадов;
- окон с воздухопроницаемостью до $0,3 \dots 0,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
- широкопрофильных систем монтажной глубиной свыше 100 мм;
- стеклопакетов с энергосберегающими стеклами и заполнением камер инертными газами, имеющих сопротивление теплопередаче $R_T \approx 1,0 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$;
- многокамерных профилей оконных блоков с заполнением части камер теплоизоляционным материалом, имеющих сопротивление теплопередаче $R_T \approx 1,0 \text{ м}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

5. Установка оконных блоков в проёмах должна быть выполнена с исключением возможности появления мостиков холода. Энергоэффективными решениями являются:

- наружная теплоизоляция стен здания с обязательным утеплением оконных откосов;
- смещение оконного блока к середине стены с установкой теплоизоляционного вкладыша между блоком и четвертью, блоком и стеной;
- теплоизоляция внутренней поверхности откосов или устройство термовкладышей $\delta = 20 \dots 30 \text{ мм}$ вдоль внутренней поверхности откосов.

6. Выполнением вышеизложенных рекомендаций на обследованных объектах достигнута нормализация микроклимата помещений с обеспечением требуемых параметров.

Литература к главе 5

5.1 Умняков, П.Н. Теплоизоляция ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. / П.Н.Умняков, М.: Стройиздат, 1978.

5.2 Теория здания. Том 1. Здание – оболочка. Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2007. – 280 с.

5.3 ГОСТ 26602.1-99. Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче. Минск. 2002.

5.4 Гертис К. Стекланные двойные фасады. Имеют ли смысл с точки зрения строительной физики, новые разработки фасадов / К.Гертис // АВОК. 2003. – №7. – С. 10-17.

5.5 ТКП 45-2.04-43-2006. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования. – Минск: 2007. – 303 с.

5.6 СНБ 2.04.02-2000. Строительная климатология. Изменение №1. / Минск, 2007. – 33 с.

5.7 СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. Минск. 2005.–37 с.

5.8. Протасевич, А.М. Особенности тепловлажностного режима оконных заполнений жилых зданий./ А.М.Протасевич, А.Б.Крутилин, Е.С.Калиниченко. // Мастерская. Современное строительство. №3, 2009. – С.39-41.

5.9 Controlled Natural Ventilation / B.Knoll and W.Kornaat. – AIVC Conference Proceedings, 1991.

5.10 Шайтор В. Сегмент широкопрофильных оконных систем. Возможности и особенности их применения и эксплуатации / В.Шайтор. Мастерская. Оконный рынок. – №3, 2011.

5.11 Протасевич, А.М. Энергосбережение в системах теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха. / А.М.Протасевич. Учебное пособие. Мн.: Новое знание; М.: ИНФА-М, 2012. – 286 с.

5.12 Власенко, Д. Зима неизбежна. Из окон снова будет дуть. / Д.Власенко. Светопрозрачные конструкции. №4, 2009. – С.46-50.

5.13 Петров, Е.В. Влияние различных факторов на тепловые характеристики оконных заполнений. Автореферат дис. канд.техн.наук. Томск, 2000.

5.14 Измерение сопротивления теплопередаче стеклопакетов с использованием установки ИТС-3. / Л.В.Декума и др. Светопрозрачные конструкции. НИУПЦ «Межрегиональный институт окна. №1-2, 2010. – С.44-49.

5.15 Коваль, В. Новые оконные системы из полиуретана. / В.Коваль. Светопрозрачные конструкции. НИУПЦ «Межрегиональный институт окна. №5-6, 2010. – С.66-68.

5.16 Отчет НИР «Исследование тепловлажностного состояния наружных стен с заполнениями световых проемов стеклоалюминиевыми конструкциями марок ОАЗС 15-9 и БАЗС 22-7.5 жилого панельного дома, расположенного в г.Минске по ул. Могилевской, 16». Х/д №1431 от 9 апреля 2001 г. № г.р. 20011645. Рук. работы А.М.Протасевич.

5.17 Отчет НИР «Исследование микроклимата помещений с разработкой рекомендаций по его нормализации здания филиала ОАО «БПС-БАНК» в г.Минске по адресу пр. Машерова, 80». Х/д №2911/09с от 24.08.2009 г. Рук. работы А.М.Протасевич.

ГЛАВА 6. ОСОБЕННОСТИ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

6.1 Влагоперенос в строительных материалах и ограждающих конструкциях

Формирование тепловлажностного и воздушного режимов, долговечность и эксплуатационные качества возводимых и реконструируемых зданий и их ограждающих конструкций зависят от протекания сложных взаимосвязанных процессов тепло- и массопереноса (рис. 6.1).

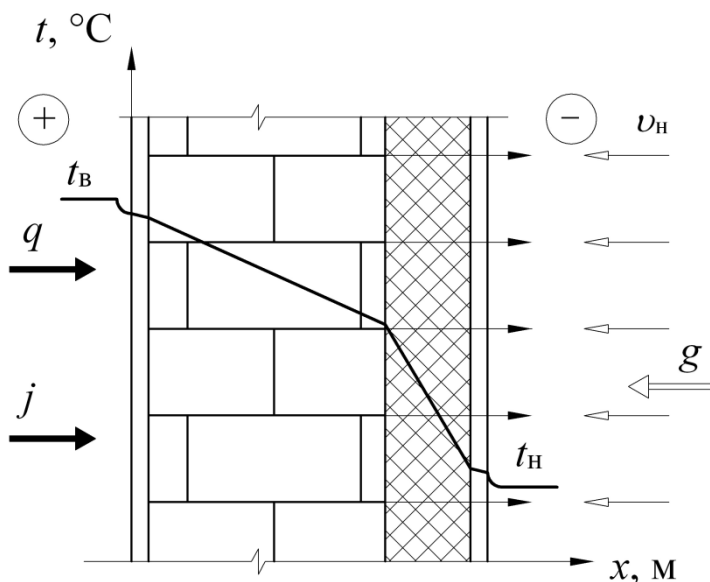


Рис. 6.1. Схема переноса теплоты и массы через наружную многослойную стену:

q – тепловой поток; j – суммарный поток влаги;
 g – фильтрационный поток воздуха

Перенос влаги в материалах и средах происходит в виде водяного пара и жидкости под действием различных потенциалов и силы тяжести [6.1, 6.2]. В капиллярно-пористых материалах, к которым

относится большинство строительных материалов, влагоперенос осуществляется несколькими механизмами. Если ее движение происходит под действием градиента общего давления, то интенсивность влагопереноса определяется коэффициентом молярной диффузии или бародиффузии. Под диффузией понимается перенос массы в результате передвижения молекул одного вещества среди молекул другого. В строительной теплофизике диффузией наиболее часто называют перемещение парообразной влаги под действием градиента концентрации в порах материала в зависимости от энергии связи с поверхностью. Кроме того, к диффузионным процессам относят и процессы пленочного и термopленочного движения жидкой влаги в капиллярно-пористом материале, эффузию (кнудсеновскую диффузию), перемещение влаги под действием капиллярного потенциала. Величина капиллярного потенциала, возникающего в материалах вследствие поверхностного натяжения жидкости, зависит от диаметра пор и капилляров. Чем меньше их диаметр, тем больше их потенциал.

В общем виде влагоперенос в ограждающих конструкциях описывают уравнением:

$$j_i = -\chi_i \text{grad} \theta_i, \quad (6.1)$$

где j_i – плотность потока влаги по « i » механизму влагопереноса;
 χ_i – коэффициент влагопереноса по « i » механизму;
 θ_i – « i » потенциал влагопереноса.

Для решения уравнения (6.1) необходимо знание величин коэффициентов влагопереноса. В настоящее время экспериментальное определение всех коэффициентов представляет сложную и часто технически невыполнимую задачу. Поэтому используется моделирование влагопереноса с объединением потоков влаги по градиентам отдельных потенциалов. Общий, суммарный, поток состоит из трех составляющих:

- потока, пропорционального градиенту парциального давления водяного пара с коэффициентом диффузии водяного пара;
- потока, пропорционального градиенту общего влагосодержания с коэффициентом влагопроводности;

– потока, пропорционального градиенту температуры с термодиффузионным коэффициентом.

При этом необходимо учитывать и возможное поступление и перенос влаги в ограждающие конструкции с потоком влажного воздуха при его фильтрации в процессе воздухопроницания.

В инженерной практике, ввиду сложности физического процесса переноса влаги в ограждающих конструкциях, разрабатываются методики расчета суммарной плотности потока влаги. Школой В.Н.Богословского [6.3, 6.4] предложена теория переноса влаги с использованием потенциала влажности, который учитывает все виды переноса:

$$j = \frac{\chi}{\delta} (\theta_1 - \theta_2) \quad , \quad (6.2)$$

где j – плотность потока влаги, кг/(м²·ч);

χ – коэффициент влагопереноса, кг/(м·°В·ч);

θ – потенциал влажности, °В/м.

За один градус потенциала влажности (°В) принимается одна сотая часть максимальной сорбционной влажности фильтровальной бумаги при 20°С.

Использование указанной теории ограничивается отсутствием данных по коэффициентам влагопереноса « χ » и потенциалов влажности « θ » для различных материалов.

Учитывая сложность физических процессов, в практических разделах строительной теплофизики расчеты переноса влаги в ограждающих конструкциях выполняются с использованием двух коэффициентов влагопереноса: коэффициента паропроницаемости « μ », мг/(м·ч·Па), и коэффициента влагопроводности « λ_m », кг/(м·ч·°М). В размерности коэффициента влагопроводности использован градус влажосодержания (°М), имеющий размерность кг/кг_{с.мат}.

Коэффициент паропроницаемости равен массе влаги, проходящей через единицу площади материала на единицу длины в единицу времени при перепаде парциального давления водяного пара в один Па.

Паропроницаемость зависит от физических свойств материала и отражает его способность пропускать диффундирующий водяной пар. Коэффициенты паропроницаемости строительных материалов определяются экспериментально и их расчетные значения приведены в справочных материалах [6.5, 6.6].

Поток влаги, перемещаемый через материал, в парообразной фазе определяется по выражению:

$$j_{\text{п}} = -\mu \cdot \nabla p, \quad (6.3)$$

где $j_{\text{п}}$ – плотность потока влаги, мг/(м²·ч);

∇p – градиент парциального давления, Па/м.

Уравнение (6.3) определяет изотермический влагоперенос в материалах при влажности ниже максимальной сорбционной. С повышением влажности материала выше максимальной сорбционной перенос жидкой влаги осуществляется влагопроводностью.

В теории влагопроводности [6.1] в качестве потенциала влажности принято влагосодержание материала. Плотность потока влаги прямо пропорциональна градиенту влагосодержания ∇u , равному одному кг влаги на один кг сухого материала и на единицу длины.

$$j_m = -\lambda_m \cdot \nabla u, \quad (6.4)$$

где j_m – плотность потока влаги, мг/(м²·ч);

λ_m – коэффициент влагопроводности, кг/(м·ч·°М);

∇u – градиент влагосодержания, кг/кг_{с.мат} /м, °М/м.

В инженерной практике, оценка влажностного состояния материалов ограждений выполняется с использованием коэффициента паропроницаемости.

6.2 Увлажнение и сушка материалов ограждающих конструкций

Диффузия влаги вызывается стремлением молекул водяного пара равномерно распределиться как в объеме помещения, так и на поверхности наружных ограждающих конструкций. Если парци-

альное давление водяных паров в наружном ограждении меньше, чем в воздухе помещения, то молекулы воды будут перемещаться внутрь ее до установления равновесия. При этом диффузия водяного пара через пористый материал совпадает с капиллярным перемещением влаги. Поэтому в инженерной практике перенос ее в парообразной и жидкой фазах принято рассматривать под действием градиента парциального давления водяного пара. Процесс переноса влаги через материал характеризуется его паропроницаемостью, а оценивается он коэффициентом паропроницаемости.

Влажностное состояние материалов в ограждающих конструкций зависит от взаимодействия с окружающим их влажным воздухом. При постоянной температуре и относительной влажности воздуха в материалах устанавливается равновесие с окружающей средой, при котором масса влаги неизменна. Данное влажностное состояние материалов называется равновесным. В состоянии равновесия с влажным воздухом температура тела равна температуре воздуха, а давление пара воды в материале (e_m) равно парциальному давлению пара в воздухе (e_n).

Гигроскопическое равновесное влагосодержание материала соответствует определенному состоянию воздушной среды, при котором прекращается переход молекул воды из воздуха в материал. При изменении температуры и относительной влажности воздуха оно изменяется и может быть большим или меньшим. Максимальной величины гигроскопическое равновесное влагосодержание достигает при $\varphi_b = 100\%$.

Процесс увлажнения сухого материала, помещенного в среду влажного воздуха, называется сорбцией, а процесс уменьшения влагосодержания влажного материала в воздушной среде – десорбцией.

Изменение равновесного влагосодержания материала в воздушной среде с постоянной температурой и возрастающей или убывающей относительной влажностью характеризуется изотермами сорбции и десорбции. На рис. 6.2 представлены изотермы сорбции и десорбции водяного пара строительных материалов.

По форме изотермы сорбции представляют кривые линии с изменяющейся кривизной и двумя или тремя точками перегиба. Начиная от нулевой точки она несколько вогнута, далее становится выпуклой по отношению к оси абсцисс и достигает своего макси-

му при $\varphi_b = 100\%$. Для вогнутой зоны преобладающими являются процессы адсорбции, а для выпуклой – процессы капиллярной конденсации.

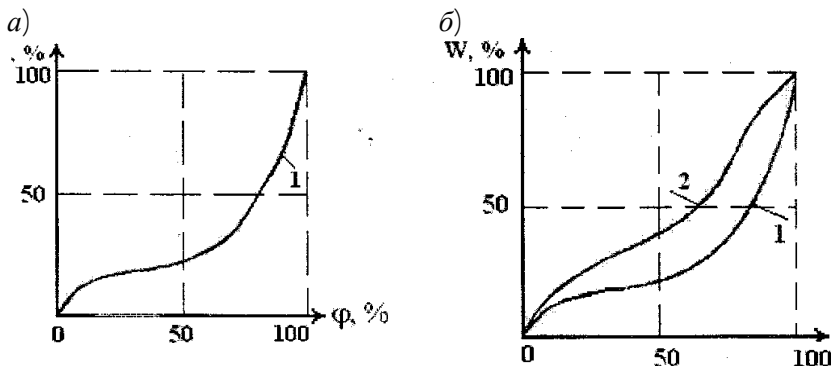


Рис. 6.2. Изотермы сорбции и десорбции водяного пара:
1 – изотермы сорбции; 2 – изотермы десорбции

Для некоторых строительных материалов, таких как минеральная вата, кирпич, песок и др. изотермы сорбции и десорбции совпадают (рисунок 6.2-а). Но для большинства материалов изотермы не совпадают (рисунок 6.2-б). Разность массовых влажностей строительного материала при одной и той же относительной влажности воздуха φ называется сорбционным гистерезисом. Наличие сорбционного гистерезиса объясняется наличием адсорбированного слоя воздуха и неполным смачиванием стенок капилляров. Вследствие этого в капиллярах образуются мениски жидкости различные при сорбции и десорбции. Увлажнение внутренней поверхности пор и капилляров материалов сопровождается образованием пленок адсорбированной влаги, состоящих из слоев молекул. При повышении влажности воздуха пленки влаги утолщаются и заполняют наиболее узкие участки тонких капилляров, образуя в смачиваемых материалах мениски с вогнутой поверхностью.

Образование таких менисков приводит к понижению над ними величины парциального давления водяного пара e_k . Это вызывает конденсацию влаги в незаполненных частях тонких капилляров, происходящую при относительной влажности окружающей среды,

не достигающей полного насыщения. Такое явление называется капиллярной конденсацией.

Капиллярное давление, возникающее над поверхностью жидкости, определяется по формуле Лапласа:

$$e_k = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{l}, \quad (6.5)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

θ – угол смачивания;

l – радиус кривизны мениска, м.

Отношение давлений пара над вогнутой поверхностью и над плоской поверхностью жидкости описывается известным уравнением Кельвина:

$$e_k / e_n = \exp \left(\frac{\sigma \cdot M_a}{\rho \cdot \mu R \cdot T} \cdot l \right), \quad (6.6)$$

где e_k и e_n – давление насыщенного пара над искривленной и плоской поверхностями жидкости соответственно, Па;

μR – универсальная газовая постоянная 8,314 кДж/(кмоль·К);

T – температура, К;

M_a – молекулярная масса адсорбата (для воды 18), кг/кмоль;

ρ – плотность адсорбата в жидком состоянии (для воды 1000), кг/м³.

Процесс капиллярной конденсации характерен для смачиваемых (гидрофильных) материалов, внутри которых имеется существенное количество мелких пор и очень тонких капилляров с радиусом равным или меньшим 10⁻⁵ см. В более крупных капиллярах понижение давления насыщенного пара над мениском мало, а потому при преобладании внутри материала таких капилляров явление капиллярной конденсации менее выражены. Например, капиллярная конденсация в кирпиче хорошего качества малозаметна, поскольку в таком материале тонких пор и капилляров содержится не более 10 %.

Капиллярная конденсация в порах различного диаметра создает условия для развития капиллярного потенциала в материалах вызывающего перемещение в них влаги.

Периодическое и много раз повторяющееся явление капиллярной конденсации связаны с постепенным разрушением поверхности тонких пор и капилляров. Исследования структуры строительных материалов, прослуживших долгие десятки лет в наружных стенах зданий, показывают, что их пористость возрастает, а размеры пор укрупняются за счет разрушения наиболее тонких и мелких.

Увлажнение ограждающих конструкций связано с проведением строительно-монтажных работ и эксплуатацией зданий. Причинами увлажнения являются.

1. Строительная влага, оставшаяся в конструкциях после выполнения технологических процессов с использованием воды. К ним относятся бетонирование, кладка штучных материалов, оштукатуривание стен и другие виды работ.

2. Грунтовая влага, поднимающаяся по капиллярам материалов фундаментов и стен при утрате непроницаемости их гидроизоляции или при ее отсутствии.

3. Атмосферная влага, проникающая в конструкции при косых дождях, протечках, осадении и таянии инея, туманах.

Следует отметить, что атмосферная влага может перемещаться как за счет только гравитационных сил, если отсутствует сдерживающие препятствия, например, паро- или гидроизоляция, так и за счет капиллярной теплопроводности.

4. Гигроскопическая влага, поступающая в ограждения вследствие сорбирования влаги из воздуха. Данный механизм увлажнения связан с поступлением наружного холодного воздуха через стыковые соединения и щели в ограждающих конструкциях и охлаждением их отдельных участков ниже точки росы внутреннего воздуха. В результате этого на них происходит конденсация водяного пара из воздуха и влага за счет теплопроводности поступает и перемещается в ограждениях.

Влага в ограждающие конструкции также попадает при конденсации водяного пара на холодных поверхностях или внутри пор материалов при использовании воды в открытых производственных, технологических процессах.

Интенсивность диффузионного переноса влаги в ограждениях относительно невелика и уступает интенсивности переноса ее за счет конвективного перемещения с влажным воздухом в пустотах, трещинах, щелях и полостях. Фильтрация влажного воздуха, сопровождаемая массообменом, увеличивает массу влаги в ограждениях.

В начальный период эксплуатации во вновь построенных зданиях в ограждающих конструкциях содержится влага, оставшаяся в процессе строительства. В ходе дальнейшей эксплуатации влажность материалов из года в год понижается до равновесной вследствие протекания процесса сушки.

Кроме того, в режиме годовой эксплуатации материал ограждающих конструкций увлажняется в осенне-зимний период года и высыхает в весенне-летний. Повышение температуры наружного воздуха в весенне-летний период года повышает температуру в поперечном сечении конструкции, а также давление насыщения пара по толщине конструкции. Летом давление насыщенного пара в любом сечении конструкции выше парциального давления водяного пара воздушной среды. Поэтому если в конструкции зимой образовался конденсат, то летом из зоны повышенной влажности происходит испарение под действием давления пара « e_n », соответствующего его давлению насыщения E . Это состояние существует до тех пор, пока вся накопленная вследствие образования конденсата влага не диффундирует наружу.

Из опыта естественной сушки ограждений зданий известно, что конструкции, периодически нагреваемые (обычно за счет солнечных лучей) и охлаждаемые, высыхают полнее и быстрее, чем подвергающиеся непрерывному и длительному нагреву. Иссушающий эффект прогрева в теории сушки капиллярно-пористых тел объясняется перемещением влаги в поверхностные слои тел, которые приобрели воздушно-сухое (равновесное) состояние в периоды прекращения их нагрева.

6.3 Оценка влажностного режима ограждающих конструкций

Расчет влажностных полей ограждающих конструкций зданий может быть выполнен путем решения задач стационарного или нестационарного влажностного режимов.

Стационарные задачи применяются для анализа конструктивных решений ограждений. К ним, в первую очередь, следует отнести методики К.Ф. Фокина [6.7], В.М. Ильинского [6.8], В.Н. Богословского [6.3, 6.4]. Указанные методики применимы для решения одномерных задач распределения массовой влажности по сечению ограждающих конструкций.

Расчеты нестационарных влажностных полей используются для анализа развития влажностного режима и оценки долговечности ограждающих конструкций. Наиболее распространенный метод, расчет последовательного увлажнения ограждающих конструкций, был разработан К.Ф. Фокиным [6.7].

Дифференциальное уравнение диффузии водяного пара через плоскую стенку составлено по аналогии с дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности и имеет вид:

$$\frac{\partial e}{\partial \tau} = \frac{\mu}{1000 \cdot \xi_0 \cdot \rho} \cdot E_t \cdot \frac{\partial^2 e}{\partial x^2}, \quad (6.7)$$

где e – парциальное давление водяного пара, Па;

μ – коэффициент паропроницаемости материала, мг/(м·ч·Па);

ξ_0 – относительная пароемкость материала, г/кг;

E_t – максимальная упругость водяного пара, соответствующая температуре t , Па.

Решение уравнения (6.7) с граничными условиями III-го рода выполняется по разностной схеме. Распределение температур по сечению ограждения в момент времени « τ » принимается постоянным.

Метод последовательного увлажнения был дополнен В.Г. Гагариным [6.9] учетом наличия пароизоляционных слоев, перемещения незамерзшей влаги и учетом увлажнения поверхностей ограждений жидкой влагой. Система дифференциальных уравнений, описывающая данную задачу, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \cdot w \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right] = 0 \quad (6.8)$$

$$10\rho \cdot \frac{\partial w}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\beta w \frac{\partial w}{\partial x} + \mu \frac{\partial E \cdot \varphi w}{\partial x} \right] \quad (6.9)$$

$$w = \frac{1000}{\rho} u$$

где u – полное влагосодержание материала в % по объему;
 w – влагосодержание материала в % по массе;
 μ – коэффициент паропроницаемости строительного материала, г/(м·ч·Па);
 $\beta(w)$ – коэффициент влагопроводности строительного материала, г/(м·ч·%);
 $\varphi(w)$ – относительная влажность воздуха, являющаяся функцией сорбционного влагосодержания, %.

Граничные условия III-го рода для одномерной задачи 6.8 и 6.9 определяются для наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции. Начальные условия распределения температур и парциальных давлений водяного пара стационарны для принятых временных интервалов.

Для многослойных конструкций условия сопряжения на границах слоев определены непрерывностью парциальных давлений водяных паров и непрерывностью потока капельной влаги.

Развитие теории и методик расчета влажностного режима ограждающих конструкций предложено в работах как российских ученых В.И. Лукьянова [6.12], А.Г. Перехоженцева [6.11], В.В. Козлова [6.13], так и зарубежных исследователей Н.М. Кюнцеля, Майера и др. В работах указанных авторов рассматриваются многофакторные задачи нестационарного тепло-массопереноса в ограждающих конструкциях. Их особенность – учет влияния всех факторов на формирование полей влаги на уровне проведения научных исследований. В то же время следует отметить, что широкое внедрение рекомендаций и методик расчета совместного тепло- и влагопереноса в инженерную практику сдерживается рядом обстоятельств. К ним относятся:

– отсутствие проведенных в соответствии с теорией влагопереноса экспериментальных исследований по определению характеристик влагопереноса в строительных материалах;

– отсутствие простых, удобных для практического использования методик расчета;

– отсутствие подготовленного для выполнения исследований инженерно-технического персонала.

В инженерной практике, в том числе и по требованиям нормативной документации, нашли применение более простые методы, основанные на расчетах стационарного влажностного режима ограждающих конструкций.

Влажностный режим ограждающих конструкций оценивается из условия недопустимости накопления влаги в годовом периоде эксплуатации. Выполняется оценка по условию, что средний за год поток влаги, поступающий в ограждающую конструкцию через внутреннюю поверхность, должен не превышать поток влаги, удаляемой через ее наружную поверхность. Данное требование положено в основу методик расчета, представленных в документах Республики Беларусь [6.5].

В нормах РФ дополнительно введено требование по ограничению накопления массы влаги в ограждающих конструкциях за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха [6.6].

В соответствии с [6.5], сопротивление паропрооницанию в пределах от внутренней поверхности конструкции до плоскости возможной конденсации ($R_{п.вн.}$), должно быть не менее требуемого сопротивления паропрооницанию ($R_{п.тр.}$), т.е. $R_{п.вн.} > R_{п.тр.}$.

Требуемое сопротивление паропрооницанию определяется по формуле:

$$R_{п.тр.} = R_{п.н.} \frac{e_{в} - E_{к}}{E_{к} - e_{н.от}} \quad (6.10)$$

где $R_{п.н.}$ – сопротивление паропрооницанию ограждающей конструкции в пределах от плоскости возможной конденсации до наружной поверхности ограждающей конструкции, $m^2 \cdot ч \cdot Па/мг$;

e_B – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха при его расчетных температуре и относительной влажности, Па;

E_K – максимальное давление водяного пара в плоскости возможной конденсации, Па;

$e_{н.от}$ – парциальное давление водяного пара наружного воздуха при его расчетных температуре и относительной влажности, принятых как средние величины за отопительный период года, Па.

При разработке данной методики введено понятие условной плоскости возможной конденсации ограждающей конструкции. В однослойной ограждающей конструкции плоскость возможной конденсации принимается на расстоянии $2/3$ ее толщины от внутренней поверхности. В многослойных конструкциях она совпадает с наружной поверхностью слоя теплоизоляции.

Представленные выше расчётные методики позволяют получить общую характеристику влажностного состояния ограждающих конструкций зданий. Конкретные данные распределения влаги по сечению конструкций могут быть получены путём проведения экспериментальных исследований в натуральных условиях на эксплуатируемых объектах.

6.4 Влажностный режим наружных стен жилых зданий, построенных до 1995 года

Климатические условия в Республике Беларусь характеризуются частыми оттепелями и переходами температуры через ноль градусов, мокрым снегом и дождями даже в зимний период года. Изменчивость погодных условий влияет на тепловлажностное состояние ограждающих конструкций, а, следовательно, и на влажность их материалов. Оценка влажностного режима ограждений, обусловленного переменными усредненными климатическими условиями, выполняется путем проведения натуральных исследований на эксплуатируемых зданиях. Экспериментальные исследования были проведены более чем на двухстах жилых зданиях типовых серий, возведенных с 1950 по 1995 годы в г. Минске и городах РБ. Их результаты дополняют обширный материал, представленный в ряде работ [6.14...6.16] и в других источниках.

Повышенные требования к уровню теплозащиты наружных ограждений, введенные в указанный период времени, вызвали конструктивные изменения наружных стен зданий. Однослойные стены из стеновых панелей из керамзитобетона и ячеистого бетона, из полнотелого и эффективного кирпича и других материалов были заменены многослойными ограждающими конструкциями с эффективными теплоизоляционными материалами из пенополистирола и минеральной ваты. Повышение теплозащитных качеств стен оказывает влияние и на влажностный режим конструкций, т.е. на повышение массовой влажности материалов. Причинами увлажнения ограждений могут быть как внешние дефекты самих конструкций, так и нарушения воздушного и влажностного режимов помещений, неудовлетворительная работа систем вентиляции.

Уточнение особенностей влажностного режима наружных ограждающих конструкций, расчетных коэффициентов теплопроводности их материалов, в соответствии с прогнозируемым режимом эксплуатации, является актуальной задачей. Решение ее возможно только путем определения действительных данных по влагосодержанию материалов конструкций на основании натурных исследований [6.17].

Наружные кирпичные стены жилых зданий постройки 1960 – 1990 годов на территории Республики Беларусь возводились из эффективного и сплошного обыкновенного глиняного кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной $\delta = 510$ мм с наружными и внутренними штукатурными слоями. Распределение массовой влажности по сечению наружных стен, выполненных из полнотелого кирпича, на конец отопительных периодов (по данным обследований 5-ти зданий) приведено на рис. 6.3.

Результаты натурных исследований указывают на различие массовой влажности наружного и внутреннего штукатурного слоев и самой кирпичной кладки. Диапазон величин массовой влажности материалов штукатурных слоев находится в пределах от 0,98 до 1,70 %, что меньше расчетных массовых отношений $W = 2 \dots 4$ %, принимаемых при проектировании стен. Массовая влажность обыкновенного глиняного кирпича кладок, определенная экспериментально, лежит в пределах 0,21...0,38 %. Эти величины ниже показателей максимальной сорбционной влажности кирпича ($W_S = 0,55 \dots 0,75$ %) и ниже расчетных массовых отношений влаги в

кирпичной кладке, принимаемых в зависимости от условий эксплуатации «А» или «Б» равными $W = 1,0$ и $2,0$ %.

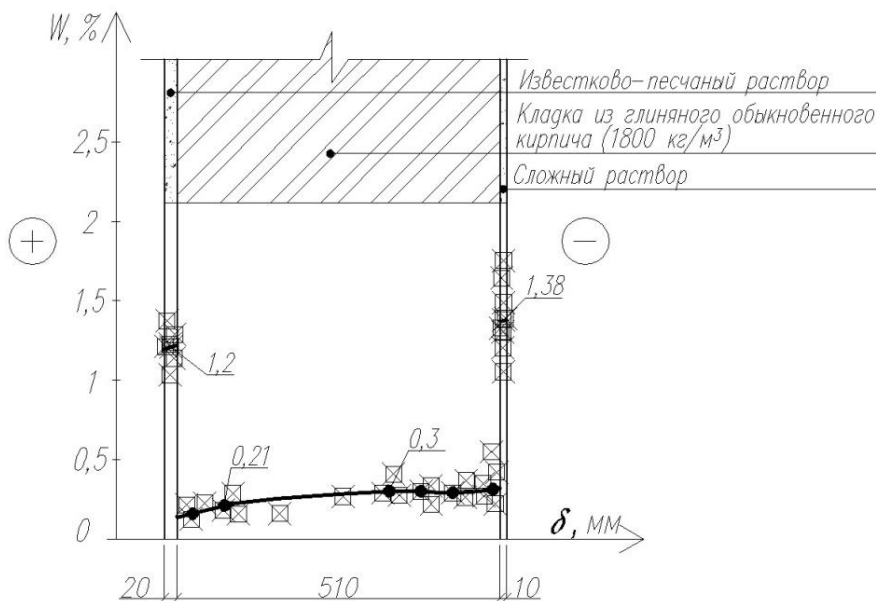


Рис. 6.3. Распределение массовой влажности по сечению наружной стены кладки из глиняного сплошного кирпича

Влажность глиняного полнотелого кирпича по толщине кладки меняется незначительно с некоторым увеличением у наружной поверхности стен. Распределение влаги по сечению стен не выделяется значительным увеличением ее в слоях, примыкающих к наружной поверхности, но наблюдается повышение влагонакопления в зоне на расстоянии приблизительно $2/3$ толщины стены от внутренней поверхности.

В наружных стенах на 1 м^3 кладки из полнотелого керамического кирпича приходится до $0,25 \text{ м}^3$ цементно-песчаного раствора. Максимальная величина сорбционного увлажнения раствора составляет $5 \dots 6$ % и значительно превышает эту величину для кирпича. Поэтому в процессе эксплуатации в кладке осуществляется перераспределение влаги за счет обмена между керамическим кирпи-

чом и раствором. В годовых циклах эксплуатации при внешних воздействиях в стенах происходит изменение полей влажности и, соответственно, коэффициентов теплопроводности кладки. При увеличении ее влагосодержания на 1 % коэффициент теплопроводности увеличивается на 7...9 %.

Здания с наружными стенами из керамзитобетонных панелей начали возводиться с 1960 г. Панели имеют наружный и внутренний слой из бетона, толщиной, соответственно, $\delta = 30$ и 15 мм и средний слой из керамзитобетона плотностью $\rho = 800...900 \text{ кг/м}^3$ и толщиной $\delta = 250...300$ мм. Начиная с 1980 г. при изготовлении панелей, для увеличения их теплозащитных качеств, в слое керамзитобетона стали размещать вкладыши из минеральной ваты на битумном связующем.

Следует отметить, что в поставляемых на строительную площадку стеновых панелях наблюдалось значительное колебание плотности керамзитобетона от 800 до 1200 кг/м^3 . Плотность отбираемых (при вскрытии стен) образцов керамзитобетона была близка к $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$.

По результатам определения массовой влажности проб бетонов и керамзитобетона, извлеченных при вскрытии наружных стен 13-ти жилых зданий, построено ее распределение по сечению стены (рис. 6.4). Отбор проб выполнялся в разные годы в зимний, весенний и осенний периоды. На графике приведены данные, полученные на конец годовых отопительных сезонов.

Натурные эксперименты показывают значительный разброс в величинах массовой влажности по слоям керамзитобетона наружных стен различных объектов. Средняя по сечению стен влажность керамзитобетона равна $W_{\text{ср}} = 3,62$ %, максимальная по сечению – $W_{\text{макс}} = 5,53$ %. Массовые влажности керамзитобетона образцов значительно меньше расчетного массового отношения $W_B = 10$ %, приведенного в ТКП 45-2.04-43 [6.5] и близки к показателю, соответствующему условиям эксплуатации материалов ограждений «А».

Массовая влажность бетонов укрывных слоев стеновых панелей в пределах $W = 1,1...1,82$ %, что ниже расчетных массовых отношений влаги, равных $W_A = 2$ % при условиях эксплуатации «А».

Кривая распределения массовой влажности керамзитобетона по сечению стены показывает, что максимум массовой влажности расположен на расстоянии $\sqcup 2/3$ от внутренней поверхности панелей.

Значительный разброс результатов исследований массовой влажности керамзитобетона в основном определен структурой материала, в частности, видом мелкого заполнителя и условиями эксплуатации помещений зданий. На обследуемых объектах были зафиксированы как «недотопы» в зимний период года, так и увеличение относительной влажности воздуха в помещениях до 70 %.

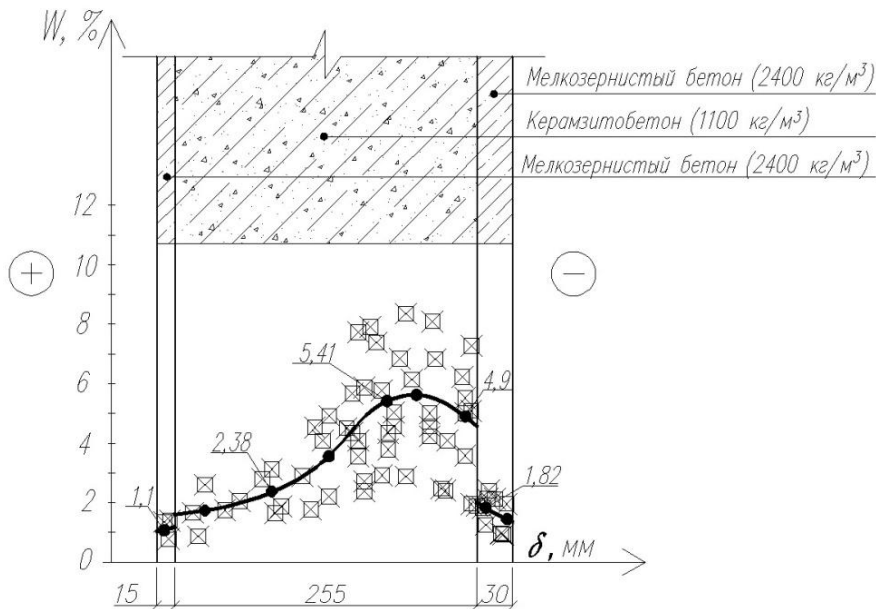


Рис. 6.4. Распределение массовой влажности по сечению наружной стены из керамзитобетонных панелей

С 1960 г. в панельном домостроении стали использоваться многослойные стеновые панели толщиной $\delta = 250$ мм со средним теплоизоляционным слоем из минераловатных плит на битумном связующем. Для защиты теплоизоляции от влаги минераловатные плиты обертывали в пергамин. Наиболее используемыми были панели с толщиной наружного и внутреннего железобетонных слоев, соответственно, $\delta = 50$ и 80 мм, а среднего теплоизоляционного — $\delta = 120$ мм. Распределение массовой влажности по сечению стен из

указанных панелей по результатам обследований 7 объектов показано на рис. 6.5.

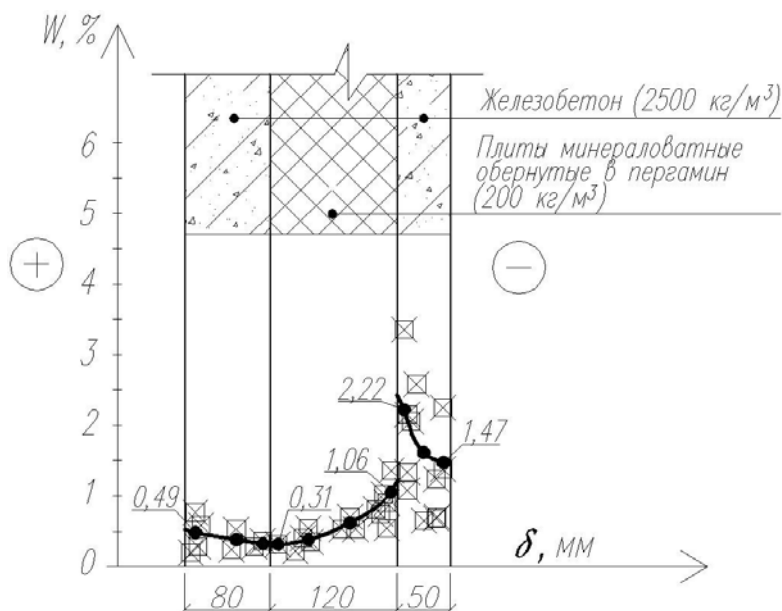


Рис. 6.5. Распределение массовой влажности по сечению стен из панелей с утеплителем из минераловатных плит

Максимальные величины массовой влажности минеральной ваты определены в слоях, примыкающих к наружному железобетонному слою панелей и не превышают $W = 1,5\%$ по массе. Средняя массовая влажность железобетонного наружного слоя составляет $W = 1,7\%$, внутреннего — $W = 0,4\%$, минераловатных плит на битумном связующем — $W = 0,6\%$. Следует отметить, что измеренные влажности образцов минеральной ваты значительно меньше расчетных массовых отношений влаги, приведенных в ТКП 45-2.04-43-2006.

Результаты обследования показали, что влажностный режим наружных стен из многослойных панелей с минераловатным утеплителем является в условиях РБ удовлетворительным. При эксплуатации зданий значительных дефектов, за исключением разрушения отдельных стыковых соединений панелей, не выявлено. Возникаю-

щие нарушения эксплуатации помещений зданий, в основном, вызваны разрушением уплотнительных элементов и теплоизоляции стыков.

Стеновые панели толщиной $\delta = 300 \dots 320$ мм со слоем теплоизоляции из пенополистирольных плит поступили на строительные площадки в 1985 году. Панели изготавливали как с «ребрами» жесткости, так и на «гибких» связях. Они имели толщину слоя теплоизоляции в пределах $\delta = 140 \dots 160$ мм.

Обследования стен выявили наличие в панелях дефектов, связанных как с технологией их изготовления, так и с эксплуатацией зданий. Наиболее часто встречающиеся дефекты вызваны затеканием тяжелого бетона в местах стыков плит теплоизоляции и расположения «гибких» связей. По результатам отбора проб на 12 объектах на рис. 6.6 показано распределение массовой влажности материалов по сечению стен из трехслойных стеновых панелей.

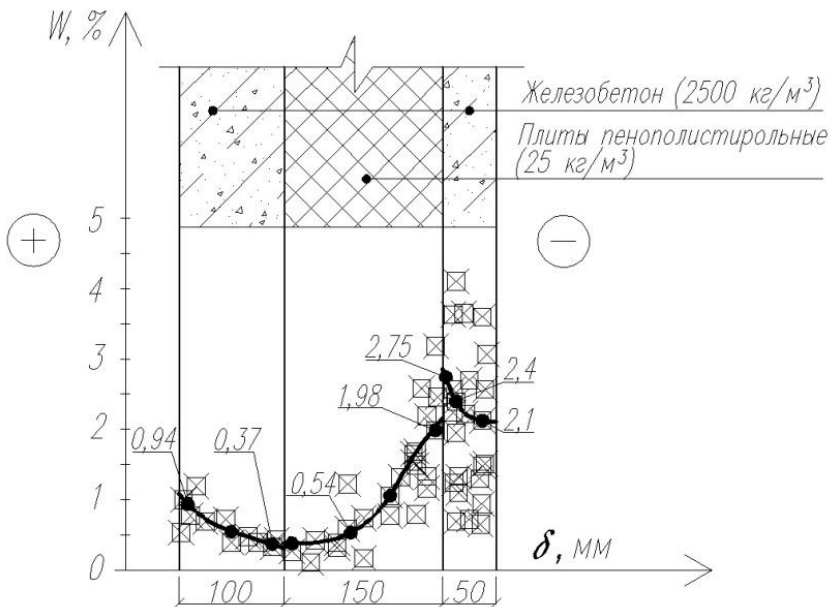


Рис. 6.6. Распределение массовой влажности по сечению стены из панелей с утеплителем из пенополистирольных плит

Экспериментальные исследования выявили разброс точек, характеризующих массовую влажность в наружном слое железобетона и в слое теплоизоляции, примыкающем к бетону. По сечению слоя пенополистирола характерно увеличение массовой влажности на границе с наружным железобетонным слоем. Это вызвано наличием на данном участке стены зоны конденсации водяного пара. Максимальная величина массовой влажности пенополистирола равна $\square W = 2 \%$, а средняя – $W_{\text{ср}} = 0,88 \%$ по массе, что намного меньше расчетного массового отношения для условий эксплуатации «Б», приведенного в ТКП 45-2.04-43 [6.5]. Максимальная сорбционная влажность пенополистирола $W_s = 1,82 \%$.

Тяжелый бетон наружного слоя панелей имеет среднюю массовую влажность $W_{\text{ср}} = 2,4 \%$, что близко к нормативным показателям расчетных массовых отношений влаги для условий эксплуатации «А» и «Б». Максимальная сорбционная влажность железобетона $W_s = 1,2 \%$.

Широкий диапазон изменения массовой влажности бетона и пенополистирола связан с условиями эксплуатации объектов и состоянием поверхностного слоя железобетона, подвергающегося атмосферным воздействиям.

Эксплуатационные качества стен из указанных панелей определяются состоянием стыковых соединений. Разрушение швов приводит к охлаждению внутренней поверхности стен и конденсации на ней водяного пара.

Анализ распределения массовой влажности по сечению трехслойных панелей, представленных на рис. 6.6, аналогичен кривым массовой влажности, полученным расчетным путем и представленным в работах В.В. Козлова. Аналитические расчеты проведены по методикам последовательного увлажнения [6.9] и стационарного увлажнения [6.13]. На поверхностях рассматриваемых стеновых конструкций приняты граничные условия влагообмена III рода, при стационарных среднемесячных значениях температуры и относительной влажности воздуха (для января месяца) $t_{\text{н}} = -10,2^{\circ}\text{C}$ и $\varphi_{\text{в}} = 55 \%$.

Результаты расчетов показаны на рис. 6.7 в виде ломаных линий.

Сравнение линий распределения массовой влажности по сечению стен на рис. 6.6 и 6.7 указывает на их идентичность.

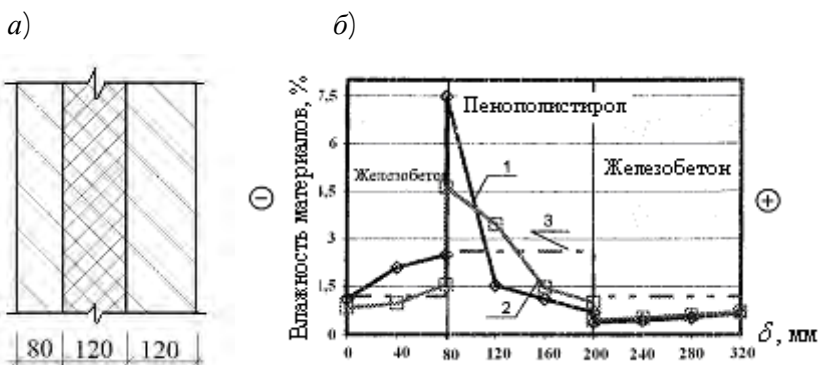


Рис. 6.7. Распределение массовой влажности по сечению трехслойной стеновой панели:

а) наружная стена; б) графики массовой влажности;

1 – по стационарной методике; 2 – по методике последовательного увлажнения; 3 – максимального сорбционного увлажнения

Максимальная массовая влажность материалов определена в зоне контакта наружного слоя железобетона и пенополистирола. В плоскости контакта внутреннего слоя железобетона и пенополистирола на обоих графиках указаны минимальные величины массовой влажности. Значительная часть стены на обоих графиках находится при сверхсорбционной влажности материалов.

Основное отличие в сравниваемых графиках в абсолютных величинах массовой влажности материалов. Это связано с различными задачами и условиями проведения исследований. Кроме того, аналитические методы дают различные величины массовой влажности в одних и тех же плоскостях стены.

Строительство и эксплуатация зданий с наружными стенами из газобетонных блоков в Республике Беларусь интенсивно началось с 1997 г. Газобетонные блоки плотностью $\rho = 300 \dots 500 \text{ кг/м}^3$ изготавливают по технологии с использованием автоклавного твердения. Вследствие особенности капиллярно-пористой структуры материала, наружные стены из газобетона могут подвергаться неблагоприятным воздействиям окружающей среды и уважняться. Накопление влаги и последующее размораживание бетона снижает долговечность конструкций и часто приводит к их разрушению.

Натурные исследования зданий, стены которых выполнены из газобетонных блоков, показали, что наиболее распространенным их дефектом является образование трещин и микротрещин на участках фасадов. А причиной их появления служит высокая массовая влажность материала, приобретенная в процессе строительства или эксплуатации объектов.

На рис. 6.8 представлены результаты экспериментального определения массовой влажности газобетона полученные на пробах, взятых на объектах наружный слой стен которых подвергался разрушению [6.18].

Размораживание ячеистого бетона массовой влажности $W \geq 40\%$ объясняется значительным превышением ее над величиной максимальной сорбционной влажности $W_s \approx 20\%$. Накопление же влаги в слоях газобетона, прилегающих к наружному штукатурному полимерцементному слою вызвано ее перераспределением по сечению стены вследствие наличия перепада температур в зимний период эксплуатации.

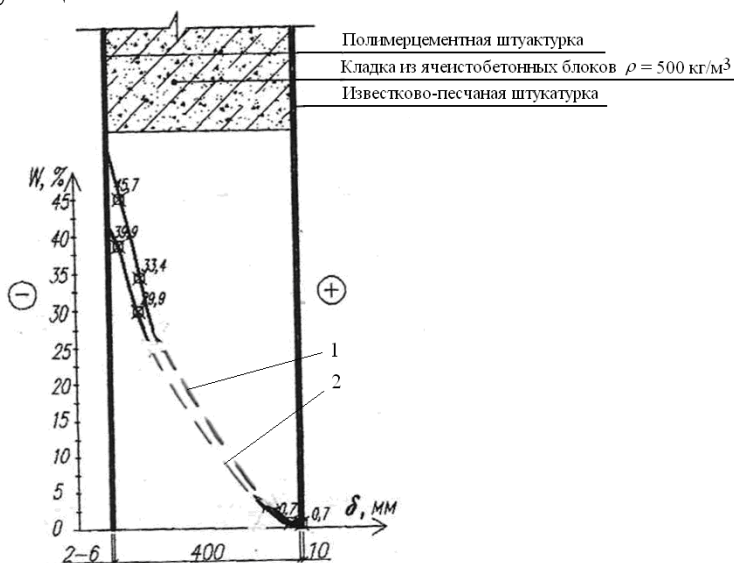


Рис. 6.8. Распределение массовой влажности по сечению наружной стены жилого дома в конце отопительного периода по данным натурального обследования:
 1 – для наружной стены, ориентированной на север;
 2 – для наружной стены, ориентированной на юг

Повышенная влажность материала в процессе эксплуатации объясняется применением плотных (с низкими коэффициентами паропроницаемости) наружных отделочных слоев, способствующих накоплению влаги и, как следствие, преждевременному разрушению стен. Такими слоями могут быть не только штукатурные и окрасочные, но и облицовочные слои из кирпича, декоративных блоков, плиток и т.п. Например, если коэффициент паропроницаемости газобетона $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ равен $\mu = 0,23 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$, то укрывного полимерцементного слоя – в десять раз меньше и равен $\mu = 0,022 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

Следует подчеркнуть, что особенностью газобетона и его разновидностей, как высокопористых материалов является высокая паропроницаемость ($\mu = 0,12 \dots 0,26 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$) и значительное водопоглощение $\sim 40 \%$ по массе за 24 часа.

Приведенные ниже результаты обследований получены на объекте, имеющем дефекты ограждающих конструкций и нарушение микроклимата помещений. В нормальных условиях эксплуатации однослойные стены из газобетона хорошо поддаются сушке.

Защиту стен из газобетона от увлажнения и накопления влаги следует обеспечивать применением для наружной отделки материалов с паропроницаемостью выше $\mu = 0,1 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$ или пароизоляцией внутренней поверхности стен со стороны помещений.

Результаты натурных исследований распределения массовой влажности по сечению стены из газобетона сравнивались с данными, полученными аналитическими методами [6.13]. На рис. 6.9 показаны кривые распределения массовой влажности газобетона, полученные по разным расчетным методикам. Однослойная стена из газобетона $\rho = 450 \text{ кг/м}^3$ и толщиной 400 мм оштукатурена с наружной и внутренней стороны цементно-песчаным раствором толщиной 20 мм. Анализ влажностного состояния стены по результатам расчета по методике последовательного увлажнения показал, что область максимального увлажнения в ней находится у наружной поверхности, так как и на графике рис. 6.8. По результатам расчета стационарным методом (линия 1) основная часть стены находится в области сверхсорбционной влажности газобетона. Метод последовательного увлажнения дал распределение влажности заметно от-

личающееся от линии 1. Только максимум влажности близок по расположению и величине.

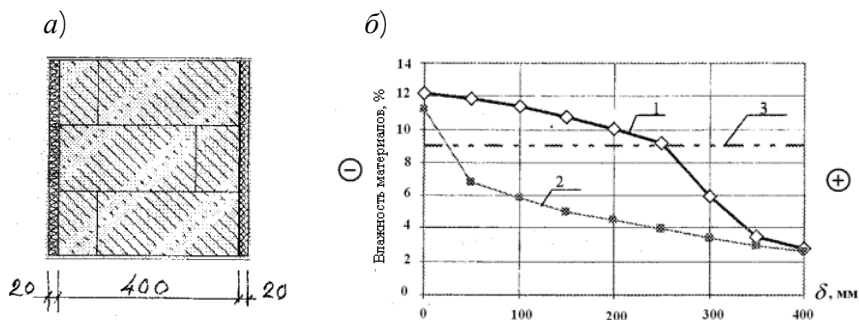


Рис. 6.9. Распределение массовой влажности по сечению стены из газобетона $\rho = 450 \text{ кг/м}^3$
a – наружная стена; *б* – графики массовой влажности;
 1 – по стационарной методике; 2 – по методике последовательного увлажнения; 3 – максимального сорбционного увлажнения

Сравнение хода линий массовой влажности на рисунках 6.8 и 6.9 показывает идентичность линии, полученной по методу последовательного увлажнения с кривой, построенной по результатам натуральных исследований.

Результаты натуральных исследований по определению массовой влажности материалов наружных стен эксплуатируемых зданий сведены в табл. 6.1.

В табл. 6.1 сведены результаты исследований, как представленные на рисунках 6.3...6.9, так и не представленные графически.

Из таблицы видно, что массовая влажность бетона многослойных наружных стен зависит от места их расположения. Так, бетонные слои стеновых панелей, расположенные у внутренней поверхности стен, имеют массовую влажность в области их сорбционного увлажнения, и на их величины главным образом влияют условия микроклимата в помещениях квартир. Наружные бетонные слои увлажняются как при воздействии атмосферных осадков, так и за счет процессов диффузии влаги. Разброс в значениях массовой влажности также связан с воздействием на них ветра и солнца.

Таблица 6.1

Массовые влажности материалов наружных стен зданий

Наименование материала	Расположение слоя в конструкции стены	Средняя по слою массовая влажность, $W_{\text{ср}}$, %	Максимальная по слою массовая влажность, $W_{\text{макс}}$, %	Сорбционная влажность материала при относительной влажности воздуха, $\phi = 97\%$	Расчетное массовое отношение влаги в материале по условиям эксплуатации, «Б», [6.5]
1	2	3	4	5	6
Железобетон	внутренний	0,75	1,2	1,2	3
Железобетон	наружный	1,95	3,8	1,2	3
Керамзитобетон (1100 кг/м ³)	средний	3,62	5,5	10,5	10
Аглопоритобетон (1800 кг/м ³)	внутренний	1,35	1,5	4,96	8
Аглопоритобетон (1800 кг/м ³)	наружный	2,70	4,3	4,96	8
Фибролит (400 кг/м ³)	средний	6,54	10,1	26,5	15
Минеральная вата на битумном связующем (200 кг/м ³)	средний	0,59	0,78	1,7	5
Пенополистирол (25 кг/м ³)	средний	0,88	1,02	1,82	10
Кирпич полнотелый керамический (1700 кг/м ³)	средний	0,26	0,38	0,75	2
Газобетон (500 кг/м ³)	средний	20	45,7	20,0	5

Средние влажности материалов однослойных стен и теплоизоляционных слоев в конструкциях наружных стеновых панелей получены значительно ниже расчетных массовых отношений для условий эксплуатации «Б». Исключение составляют характеристики газобетона.

Обследование влажностного состояния наружных стен из штучных изделий и стеновых панелей производства 1950...1995 гг. показало их удовлетворительное влажностное состояние за исключением однослойных стен из газобетона $\rho = 400...500 \text{ кг/м}^3$.

В то же время следует отметить наличие в эксплуатации жилых зданий с нарушениями микроклимата помещений и дефектами наружных стен, вызванными увлажнением.

6.5 Влажностный режим наружных стен зданий с дополнительной теплоизоляцией

При проведении капитальных ремонтов, реконструкции и тепловой модернизации зданий, ограждающие конструкции дополнительно теплоизолируют с целью повышения их сопротивления теплопередаче до требуемых (нормативных) величин. Наличие дополнительного слоя теплоизоляции приводит к перестройке температурного поля и перераспределению влаги по слоям ограждений, тем самым влияя на их влажностный режим.

Дополнительная теплоизоляция может выполняться «сухим» и «мокрым» способами. К «сухим» способам теплоизоляции относится устройство систем называемых «вентилируемый фасад». Укрытие слоя дополнительной теплоизоляции выполняется облицовочными плитами «на отnose» с устройством вентилируемой воздушной прослойки. «Мокрые» технологии – это в первую очередь система «термошуба» в различных вариантах, система ПСЛ, торкретирование полистиролбетоном и др.

Одна из наиболее часто используемых «мокрых» систем утепления – лёгкая штукатурная система (ЛШС). Теплоизоляционный материал – пенополистирольные или минераловатные плиты крепятся клеем и дюбелями на наружной поверхности стены, после чего по нему укладывают защитно-декоративный слой из полимерцементных составов, наносимых по стеклотканевой сетке. Используются также так называемые тяжёлые штукатурные системы (ТШС), отличающиеся от вышеуказанных тем, что в них применяют стальные армирующие сетки и обычные сложные растворы для укрывного слоя толщиной 20...30 мм.

При натурных обследованиях стен зданий утеплённых с применением ЛШС часто фиксируются трещины на поверхности штукатурки.

Трещины появляются в углах оконных поёмов, в зонах напротив перекрытий и перегородок, а также в местах стыков плит утеплителя и расположения дюбелей крепления теплоизоляции. В ходе обследования выявлены также такие дефекты систем утепления, как отслоение декоративного отделочного слоя. В числе причин их появления – перестройка влажностного режима ограждений и процессы влагопереноса, зависящие от физических свойств материалов.

Особенности систем дополнительной теплоизоляции и её влияние на влажностный режим основной конструкции (подосновы) и ограждения в целом определены на основании результатов натурных экспериментальных исследований на эксплуатируемых зданиях.

Слой дополнительной теплоизоляции укладывается на подоснову, в качестве которой служит кирпичная кладка из керамического или силикатного кирпича, однослойные стеновые панели из керамзитобетона, многослойные панели со средним слоем из минеральной ваты или пенополистирола, блоки из пенно и газобетона и других материалов. Для изучения особенностей перестройки влажностного режима теплоизолированных ограждений были выбраны здания с различной конструкцией наружных стен.

На кирпичном жилом доме наружная теплоизоляция была выполнена с целью исправления выявленных дефектов при приведении микроклимата помещений и ограждающих конструкций к условиям эксплуатации соответствующим нормативным требованиям. Наружные стены дома, кладкой из керамического и облицовкой из силикатного кирпича с внутренним штукатурным слоем, теплоизолированы плитами из каменной ваты плотностью $\rho = 130 \text{ кг/м}^3$ и толщиной $\delta = 50 \text{ мм}$ и укрыты полимерцементной штукатуркой. Работы выполнены в весенний период года.

Изъятие проб материалов и определение их массовой влажности проведено после года эксплуатации теплоизолированного дома в условиях г. Минска. Распределение влаги по сечению наружной стены представлено на рис. 6.10.

Результаты, полученные при вскрытии ограждения, показывают наличие скачков массовой влажности на границах слоёв, что определено различием в механизме паро – и влагопроводности материалов и условиям годовой эксплуатации.

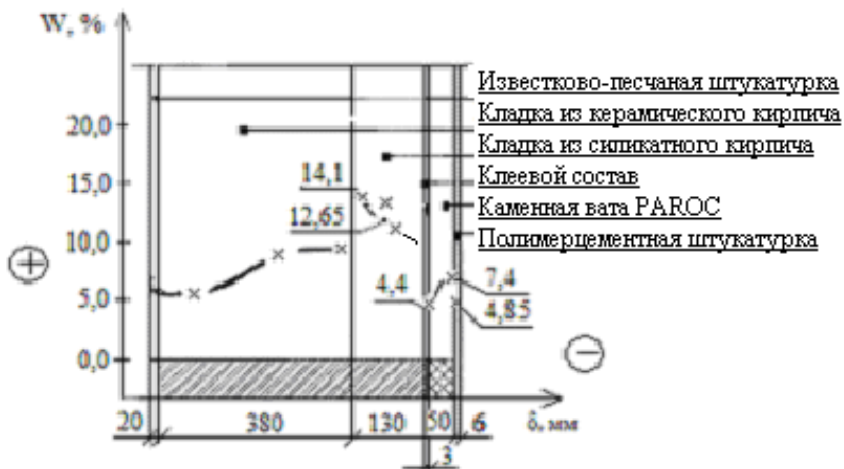


Рис. 6.10. Распределение массовой влажности по сечению теплоизолированной кирпичной стены из керамического и силикатного кирпича

Кирпичная кладка как с обыкновенного глиняного кирпича, имеющего расчётное массовое отношение влаги $W_B = 2\%$, так и силикатного с $W_B = 4\%$, за год эксплуатации с наружной теплоизоляцией осталась увлажнённой. Массовая влажность каменной ваты ($W_B = 2\%$) повысилась в 2...3 раза. Одна из причин в наличии штукатурного слоя из полимерцементного раствора, препятствующего оттоку влаги удаляемой через стену. Коэффициент паропрооницаемости полимерцементной штукатурки $\mu = 0,022 \text{ мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$. Для данного объекта укрывной слой по теплоизоляции следовало бы выполнить из цементно-песчаного раствора или укрыть теплоизоляцию экраном на отnose.

На зданиях, которые эксплуатируются без нарушений микроклимата, использование дополнительной теплоизоляции способствует стабилизации влажностного режима стен, снижая массовую влажность кирпича ниже максимальной сорбционной влажности $W_s = 0,75\%$. Подтверждением служат результаты обследований ограждающих конструкций жилого 5-ти этажного здания.

На рис. 6.11 представлено распределение влаги по сечению кирпичной стены с наружной теплоизоляцией из каменной ваты укрытой полимерцементной штукатуркой (ЛПС).

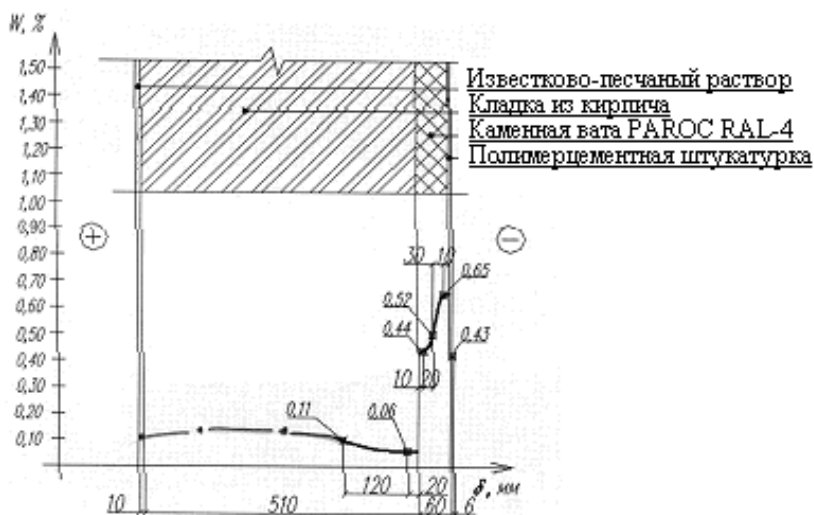


Рис. 6.11. Распределение влаги по сечению кирпичной стены с наружным слоем теплоизоляции из каменной ваты

Анализ влажностного состояния рассматриваемой конструкции показывает, что массовая влажность материалов ниже как расчётных массовых отношений для условий эксплуатации А и Б, так и величин их максимальной сорбционной влажности. Область максимального увлажнения каменной ваты находится перед слоем полимерцементной штукатурки.

Обследование зданий с наружными стенами из керамзитобетона выполнялись на объектах эксплуатируемых после выполнения дополнительной теплоизоляции от 3 до 8-ми лет.

Обобщённые результаты распределения влаги по сечению наружных стен из однослойных керамзитобетонных панелей, после выполнения дополнительной теплоизоляции, представлены на рис. 6.12. Исследования проводились на 6-ти жилых зданиях, расположенных в городах Республики Беларусь в зимний, весенний и летний периоды года.

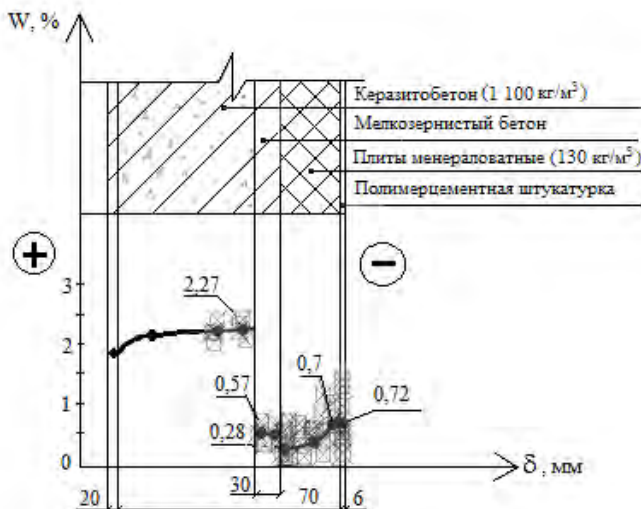


Рис. 6.12. Распределение массовой влажности по сечению наружной стены из керамзитобетонных панелей с наружной дополнительной теплоизоляцией

В процессе эксплуатации зданий после их утепления влажностный режим подосновы стен менялся со снижением массовой влажности в пределах от внутренней поверхности до слоя минеральной ваты. Средняя массовая влажность керамзитобетона экспериментально определена равной $W = 2,1 \dots 2,2 \%$, что значительно ниже расчётного массового отношения влаги равного $W_B = 8 \dots 10 \%$. Минеральная вата, имеющая высокую влагу – и паропроницаемость, способствует удалению влаги из керамзитобетона.

Укрывной слой из полимерцементной штукатурки, имеющей высокое сопротивление потоку влаги, при длительной эксплуатации ограждений, процессу сушки существенно не препятствует.

Влияние на влажностный режим наружных стен зданий с дополнительной теплоизоляцией и с панельно-лучистой системой отопления исследовалось на жилых домах серии 1-464А.

Наружные стены дома — трёхслойные железобетонные панели с минераловатными вкладышами. Во внутреннем слое панелей замоничены регистры и трубопроводы системы панельного отопления. Общая толщина панелей $\delta = 250$ мм.

Теплоизоляция стен первого этажа выполнена плитами из полистирольного пенопласта ПСБ-С. Утеплитель укрыт тяжёлой штукатуркой, уложенной по сетке «рябиза». Толщина слоя пенополистирольных плит $\delta = 60$ мм (плотность $\rho = 35$ кг/м³), цементно-песчаной штукатурки — $\delta = 20$ мм (ТШС).

Теплоизоляция стен второго и вышележащих этажей выполнена слоем каменной ваты с лёгкой полимерцементной штукатуркой по ней. Толщина слоя каменной ваты $\delta = 50$ мм, а слоя полимерцементной штукатурки $\delta = 4$ мм (ЛШС).

Отбор проб материалов дополнительной теплоизоляции из полистирольного пенопласта был произведен из торцевой стены на уровне первого этажа. По результатам определения массовой влажности материалов выполнено графическое построение распределения влаги по сечению стены, рис. 6.13.

Полученные результаты показывают несколько повышенную массовую влажность пенопласта на глубине 45...60 мм от наружной поверхности стены. Объяснение данной картины распределения влаги следует искать в характеристиках интенсивности её переноса через различные материалы. Так, коэффициенты паропроницаемости цементно-песчаного раствора укрывного слоя ($\mu = 0,083$ мг/(м·ч·Па)) и полистирольного пенопласта ($\mu = 0,044...0,050$ мг/(м·ч·Па)) отличаются по абсолютной величине в два раза.

Выполнить анализ характера распределения влаги по сечению стены удобно представив его величинами объёмной влажности (рис. 6.13б). Распределение объёмной влажности по сечению стены значительно отличается от распределения массовой. Это связано с тем, что объёмная влажность железобетона и цементно-песчаного раствора значительно больше объёмной влажности пенопласта. Содержание влаги на м³ материала составляет: в слое цементно-песчаного раствора — 68,4 кг, в слое полистирола на глубине $\delta = 20-45$ мм — 3,37 кг, в слое полистирола на глубине $\delta = 45-60$ мм — 4,0 кг.

Следует отметить, что массовая влажность полистирольного пенопласта по всему слою выше его сорбционной влажности $W_S = 2,7$ % при $\phi = 97$ %. Т.е. слой пенопласта преграждает диффундирующему потоку водяного пара выход из стены, одновременно накапливая в себе влагу. В то же время анализ распределения объём-

ной влажности подтверждает, что слой цементно-песчаного раствора также является препятствием удалению влаги из утеплителя.

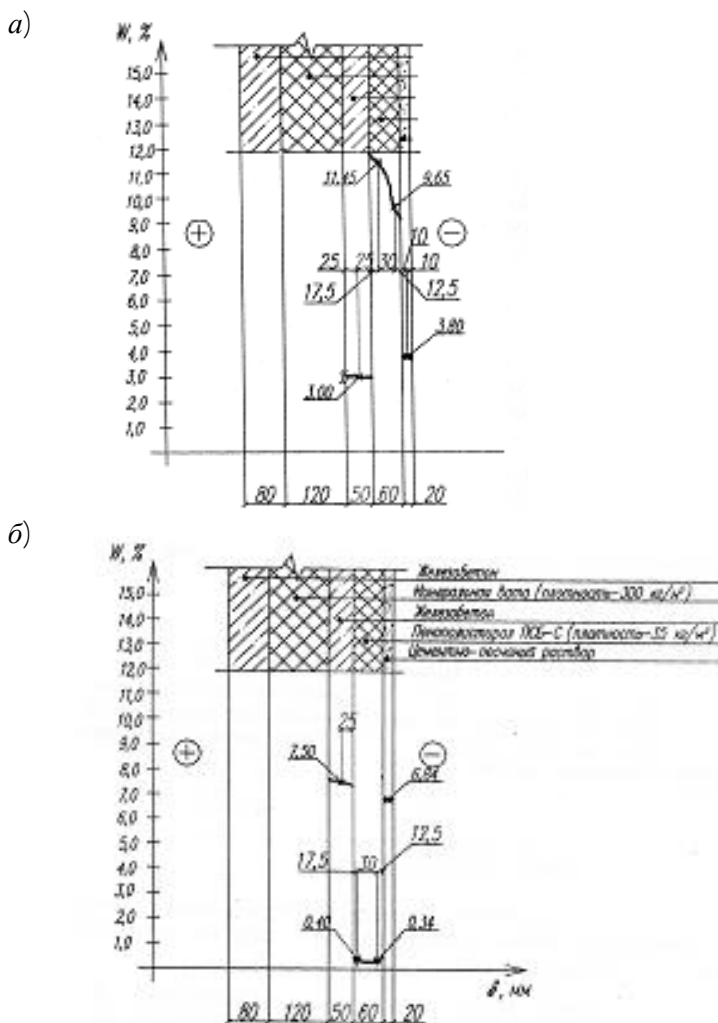
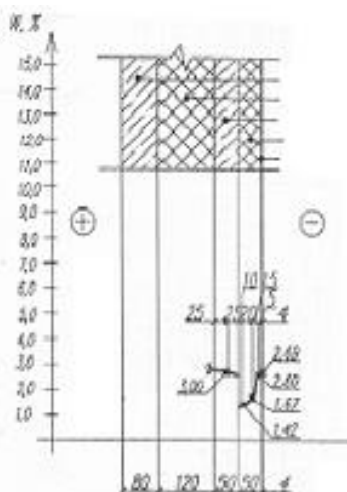


Рис. 6.13. Распределение влаги по сечению стены с наружной теплоизоляцией плитами пенополистирольными ПСБ-С:
 а – массовая влажность; б – объемная влажность

Пробы материалов теплоизоляции из каменной ваты отобраны из стены на уровне второго этажа. Результаты определения массовой влажности материалов по сечению стены представлены на рис. 6.14а.

а)



б)

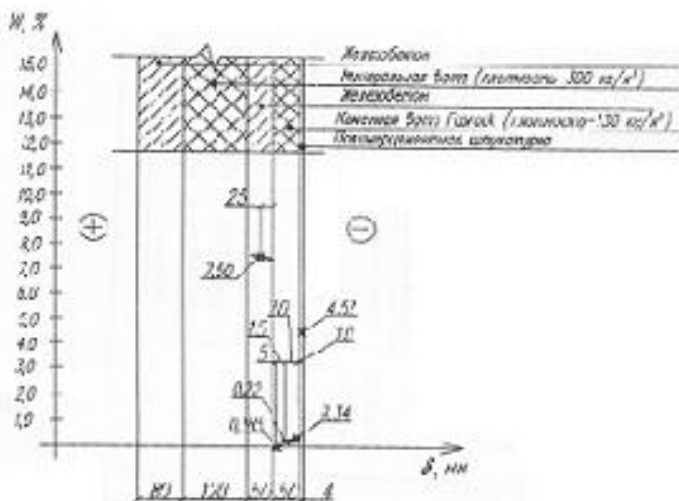


Рис. 6.14. Распределение влаги по сечению стены с наружной теплоизоляцией каменной ватой:
а – массовая влажность; б – объёмная влажность

Анализ результатов исследований показывает, что в слое каменной ваты толщиной 50 мм, примыкающем к укывному слою, происходит накопление влаги. Причина накопления повышенное сопротивление её переносу полимерцементной штукатурки. Минеральная вата имеет коэффициент паропроницаемости $\mu = 0,37 \text{ мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$, что на порядок выше, чем коэффициент паропроницаемости укывного слоя $\mu = 0,022 \text{ мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$.

Распределение объёмной влажности по сечению дополнительной теплоизоляции наружной стены показано на рисунке 6.14б.

Анализ распределения указывает на значительную концентрацию влаги у защитного слоя и относительно небольшую по толщине слоя каменной ваты. Определение массы влаги из расчёта на м^3 материала для рассматриваемой конструкции стены показало следующее. В защитном слое – 45 кг, в слое каменной ваты $\delta = 4\text{-}20 \text{ мм}$ – 3,38 кг, в слое каменной ваты $\delta = 20\text{-}40 \text{ мм}$ – 2,17 кг, в слое каменной ваты $\delta = 40\text{-}50 \text{ мм}$ – 1,85 кг. Т.е. концентрация влаги в слое каменной ваты уменьшается по мере удаления от слоя штукатурки.

Для сравнения полей распределения влаги по сечению дополнительной теплоизоляции наружных стен из железобетонных панелей в зданиях с панельно-лучистой (рис.6.14) и с конвективной (н.п. – радиаторы) системами отопления проведены исследования, результаты которых представлены ниже. Объектом исследований служил 5-ти этажный жилой дом из трёхслойных панелей толщиной 300 мм. Средний слой панелей из полистирольного пенопласта толщиной $\delta = 140 \text{ мм}$ и плотностью $\rho = 25 \text{ кг}/\text{м}^3$. Дополнительная теплоизоляция выполнена из каменной ваты «Fasrock» плотностью $\rho = 150 \text{ кг}/\text{м}^3$ и пенополистирольных плит «STYROPEX» плотностью $\rho = 15 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Отбор проб для лабораторных исследований производился из торцевой стены и стены главного фасада. По результатам определения влажности материалов дополнительной теплоизоляции построены кривые распределения влаги по сечению теплоизоляции.

На рисунке 6.15а показаны величины массовой влажности по слоям теплоизоляции.

Анализ показывает, что пенополистирольный пенопласт имеет влажность до 3 % по массе, а полимерцементная штукатурка – 2,3 %.

Масса влаги в перерасчёте на 1 м^3 материала составляет в системе утепления пенопластом: в слое штукатурки – 41,4 кг, в слое полистирола $\delta = 0\text{-}20 \text{ мм}$ – 0,45 кг, в слое полистирола $\delta = 20\text{-}50 \text{ мм}$ – 0,345 кг.

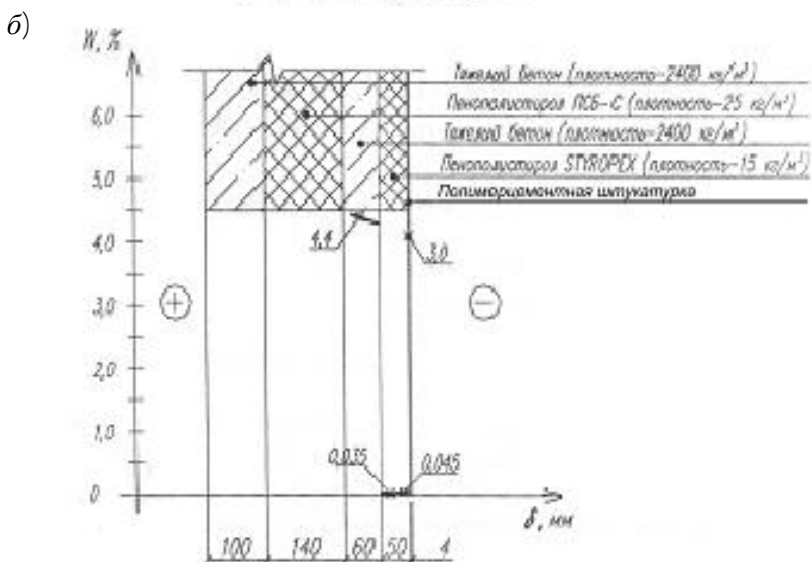
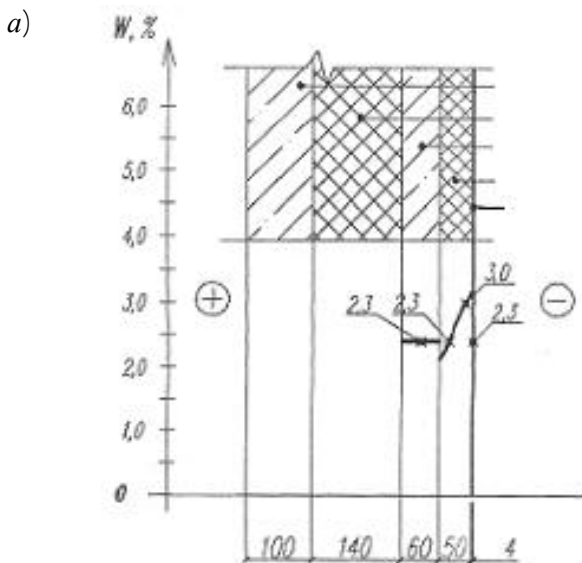


Рис. 6.15. Распределение массовой влажности по сечению стены с наружной теплоизоляцией полистирольными плитами:
 а – массовая влажность; б – объёмная влажность

Распределение объёмной влажности по сечению дополнительной теплоизоляции представлено на рис. 6.15б.

Характер распределения объёмной влажности отличается от распределения массовой влажности. Общим является небольшое увеличение процентного содержания влаги у декоративно-защитного слоя по отношению к слою утеплителя. Одинаковый характер распределения объёмной и массовой влажности указывает на превышение её у укрывного слоя, являющегося препятствием переносу.

Полистирольный пенопласт, имеющий коэффициент паропроницаемости одного порядка с тяжёлым бетоном, всё же является препятствием для миграции влаги в жидкой фазе. Именно этим можно объяснить полученное распределение влаги по сечению стены.

Распределение влаги по сечению стены с дополнительной теплоизоляции из каменной ваты дано на рис. 6.16а.

Каменная вата имеет влажность от 0,4 до 0,85 %, а укрывной слой — 2,92 %.

Характер распределения влаги по сечению слоя утеплителя из каменной ваты значительно отличается от распределения по сечению пенопласта. Каменная вата практически не является препятствием для диффузии влаги, поэтому массовая влажность её значительно меньше, чем штукатурного слоя и слоя бетона. Массовая влажность каменной ваты в наружной теплоизоляции меньше сорбционной.

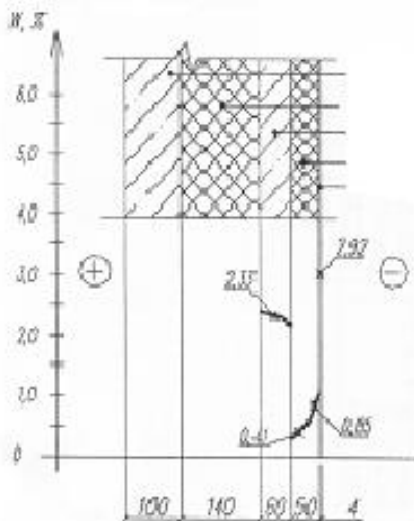
В системе утепления с каменной ватой масса влаги в пересчёте на м³ составляет: в слое штукатурки— 52 кг, а в слое каменной ваты $\delta = 0-20$ мм – 1,62 кг, слое каменной ваты $\delta = 20-50$ мм – 0,78 кг, в бетоне панели – 55,9 кг.

Результаты определения объёмной влажности по сечению дополнительной теплоизоляции из каменной ваты показаны на рис. 6.16б.

Характер распределения объёмной влажности по сечению теплоизоляции такой же, как и массовой. Каменная вата имеет объёмную влажность значительно меньшую, чем защитно-декоративный слой и слой из тяжёлого бетона. Увлажнение защитно-декоративного слоя вызвано сопротивлением переносу влаги в газообразной и жидкой фазах.

Анализируя результаты исследований, следует отметить, что влажность бетона панели под слоями различной по составу дополнительной теплоизоляции оказалась одинаковой и равной $W \approx 2,3$ %.

а)



б+

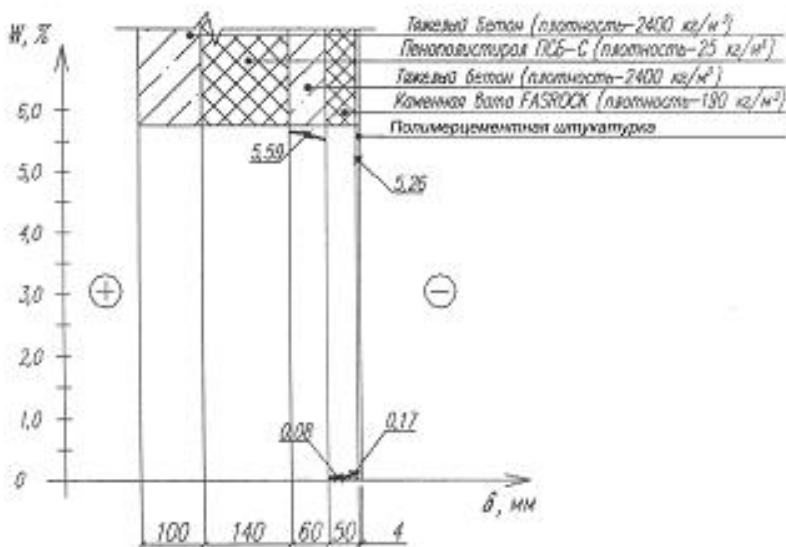


Рис. 6.16. Распределение массовой влажности по сечению стены с наружной теплоизоляцией каменной ватой:
 а – массовая влажность; б – объёмная влажность

Сравнение полей влажности дополнительной теплоизоляции стеновых панелей с разными системами отопления зданий показало, что различие в распространении влаги в слоях теплоизоляционных материалов в основном связано с использованием на исследуемых объектах различных систем дополнительной теплоизоляции — «ЛШС» и «ТШС».

Характер распределения массовой влажности с различными материалами теплоизоляции подтверждает разную роль каменной ваты и полистирольного пенопласта в формировании влажностного режима стены. Если каменная вата, имеющая пористую структуру и относительно высокий коэффициент паропроницаемости, не препятствует прохождению влаги, то пенопласт уменьшает поток влаги из-за плотной структуры и относительно низких коэффициентов паропроницаемости и влагопроводности.

6.6 Влажностный режим теплоизолированных наружных стен зданий из газосиликатобетона

Исследования проведены на экспериментальном объекте – двухэтажном общественном здании с цокольным и мансардным этажами. Наружные стены здания выполнены из ячеистого бетона плотностью $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ и толщиной кладки $\delta = 380 \text{ мм}$.

Наружная стена, ориентированная на юг, выложена из газосиликатных блоков с наружной теплоизоляцией пенополистирольными плитами, плотностью $\rho = 35 \text{ кг/м}^3$ и укрыта лёгкой штукатурной системой (ЛШС). А наружные стены, ориентированные на север и восток, выложены из газосиликатных блоков с наружной теплоизоляцией из каменной ваты, плотностью $\rho = 130 \text{ кг/м}^3$ и так же укрыты лёгкой штукатурной системой.

С внутренней стороны стены отштукатурены известково-песчаным раствором с толщиной слоя $\delta = 10 \text{ мм}$.

Особенностью газосиликата, как пористого материала с высокой паропроницаемостью и значительным водопоглощением, является создание при контакте с разными теплоизоляционными материалами условий для формирования отличных друг от друга влажностных полей. Ниже представлены результаты натурных исследований влажностных полей дополнительной теплоизоляции стен здания после двух лет эксплуатации.

Для определения массовой влажности материалов наружной стены с дополнительной теплоизоляцией из каменной ваты выполнено её вскрытие с отбором проб. По результатам исследований построено распределение массовой влажности по сечению стены (рис. 6.17), из которого видно, что массовая влажность газосиликата в пределах $W = 6 \%$. Эта величина превышает величину расчётного массового отношения $W_A = 4,0 \%$ для данного материала.

Каменная вата в течение эксплуатации имеет массовую влажность в пределах $W = 0,76 \dots 1,10 \%$, что так же выше как расчётной влажности $W_A = 0,6 \%$, так и максимальной сорбционной при $\phi = 97 \%$. Величина влажности полимерцементной штукатурки по массе равна $W = 2,03 \%$.

Анализ результатов натурных исследований выполнен расчётом по методике К.Ф. Фокина [6.7], для стационарных условий эксплуатации ограждений. Он показывает, что конденсация водяного пара происходит в 10-15 мм слое каменной ваты, примыкающим к наружному штукатурному слою. Основной причиной повышения влажности материалов служит наличие полимерцементного слоя штукатурки, имеющего повышенное сопротивление паропрооницанию и препятствующего диффузии влаги наружу.

На рисунке 6.17б представлена кривая распределения объёмной влажности по сечению стены. Сравнение кривых распределения влаги на рисунках 6.17а и 6.17б показывают их идентичность. В тоже время на кривой объёмного распределения видно повышенное содержание влаги в штукатурном слое по сравнению с остальными слоями дополнительной теплоизоляции. Масса влаги из расчёта на m^3 материала составляет в штукатурном слое – 34 кг, в слое каменной ваты толщиной 4-25 мм – 1,39 кг, в слое каменной ваты 25-50 мм – 0,99 кг, в слое газосиликата толщиной 40 мм – 30 кг.

Характер распределения массовой и объёмной влажности по сечению стены указывает на накопление влаги в каменной вате, прилегающей к укрывному слою.

Основные теплотехнические характеристики исследуемой стены следующие: приведенное сопротивление теплопередаче равно $R_T^{пр} = 3,47 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$; сопротивление паропрооницанию $R_{п} = 2,52 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$, при этом сопротивление паропрооницанию от

внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации составляет $R_{ПВ} = 2,22 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$.

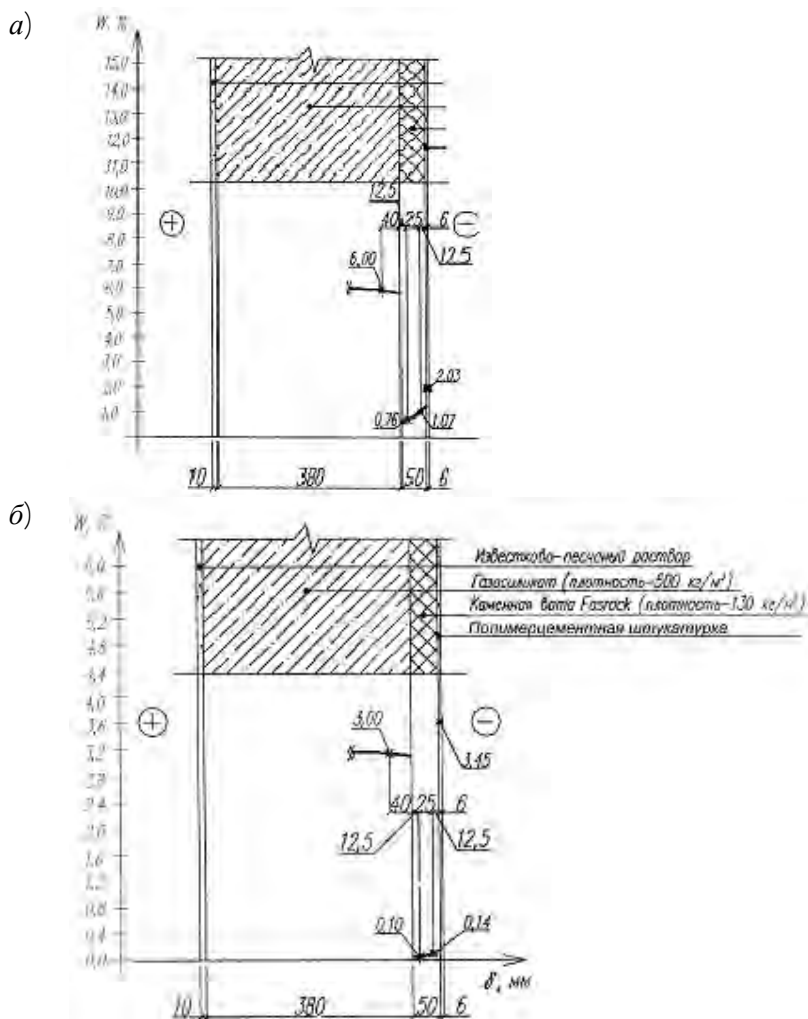


Рис. 6.17. Распределение массовой и объёмной влажности по сечению стены с наружной теплоизоляцией каменной ватой:
 а – массовая влажность; б – объёмная влажность

Наружная стена, ориентированная на север, из газосиликатных блоков толщиной слоя $\delta = 380$ мм, имеет наружную теплоизоляцию из пенополистирольных плит плотностью $\rho = 35$ кг/м³ и толщиной слоя $\delta = 50$ мм, а также полимерцементную штукатурку по ней.

Приведенное сопротивление теплопередаче данной стены, с учётом элементов крепления полистирольных плит, равно $R_{\Gamma}^{\text{пр}} = 3,68$ м²·°С/Вт.

Определение массовой влажности материалов стены выполнено на образцах, изъятых при её вскрытии. По результатам экспериментального определения массовой и объёмной влажности материалов по сечению стены построены кривые её распределения (рис. 6.18).

Характер распределения массовой влажности по сечению стены, представленный на рис. 6.18а отличается от ранее рассмотренного на рис. 6.17а. Отсутствует увеличение концентрации влаги перед отделочно-защитным слоем. Объясняется это очень близкими по порядку величин коэффициентами паропроницаемости защитно-декоративного слоя ($\mu = 0,022$ мг/(м·ч·Па)) и полистирольного пенопласта $\rho = 35$ кг/м³ ($\mu = 0,044$ мг/(м·ч·Па)) и как следствие отсутствием преграды диффузии влаги по сечению стены.

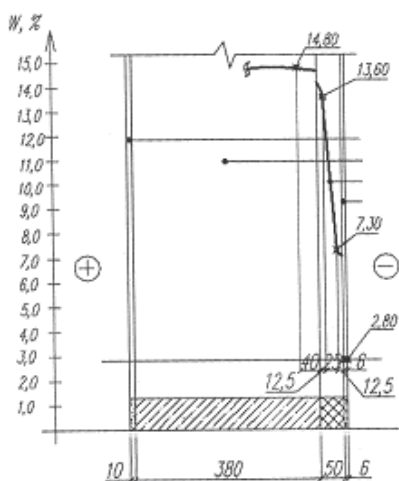
В то же время массовое содержание влаги в слое полистирольного пенопласта в несколько раз превышает сорбционную влажность при $\varphi = 97$ % равную $W_s = 2,7$ % для плотности $\rho = 35$ кг/м³. Это говорит о том, что слой полистирольного пенопласта «закрывает» влагу в несущем слое стены и одновременно накапливает её в себе.

Зоной, в которой наиболее интенсивно происходит процесс конденсации водяного пара, является зона, примыкающая к плоскости стыка материалов «газосиликат/пенополистирол». Сравнение коэффициентов влагопроводности материалов стены показывает, что для газосиликата $\rho = 500$ кг/м³ коэффициент влагопроводности изменяется в зависимости от массы влаги в порах от $\lambda_m \approx 0,04$ г/(м·ч·°М) в сторону увеличения, а у пенополистирола $\rho = 35$ кг/м³ коэффициент влагопроводности изменяется в сторону увеличения от $\lambda_m \approx 0,005$ г/(м·ч·°М), т.е. различие в начальных величинах коэффициентов примерно в 10 раз.

Из сравнения следует, что при накоплении на границе слоёв материалов «газосиликат/пенополистирол» влаги в капельном состоянии направление её движения за счёт градиента влажности будет

происходить в сторону газосиликата на порядок интенсивнее, чем в слой пенополистирола.

а)



б)

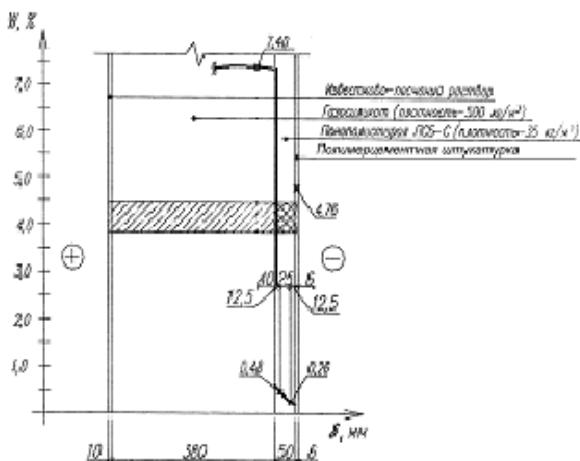


Рис. 6.18. Распределение массовой и объёмной влажности по сечению стены из газосиликатобетона с наружной теплоизоляцией плитами пенополистирольными:

а – массовая влажность; б – объёмная влажность

Этим объясняется высокая влажность газосиликата. Из характера распределения массовой влажности можно предположить, что в рассматриваемом случае штукатурный слой не является препятствием для удаления влаги из ограждающей конструкции. Но распределение объёмной влажности по сечению стены (рис. 6.18б) имеет иной характер и показывает на более высокое объёмное содержание влаги в слое штукатурки.

Масса влаги из расчёта на м^3 материала для рассматриваемой конструкции стены равна в штукатурном слое — 47 кг, в слое пенополистирола толщиной 4–2 мм — 2,55 кг, в слое пенополистирола толщиной 25–50 — 4,76 кг, в слое газосиликата толщиной 40 мм — 74 кг.

Результаты проведенных исследований показывают, что при использовании газосиликатобетона в многослойных конструкциях необходимо создать условия для установления и поддержания его равновесной влажности в пределах $W_p = 5 \dots 6 \%$. При этом следует учитывать, что отпускная массовая влажность газосиликата после производства $W \approx 30\%$ и он контактирует с теплоизоляционными и укрывными слоями, имеющими различные физические характеристики, отличающиеся от характеристик подосновы. Теплоизоляционные материалы, каменная вата и полистирольный пенопласт по-разному ведут себя в контакте с газосиликатом.

Каменная вата, имеющая коэффициент паропроницаемости ($\mu = 0,37 \text{ мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$), более высокий, чем у газосиликата ($\mu = 0,20 \text{ мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$), не является препятствием диффузии влаги к укрывному слою. Поэтому газосиликат незначительно превышает по массовой влажности величину расчётного отношения. Массовая влажность слоя каменной ваты, примыкающего к наружному штукатурному слою, составляет $W = 1,07 \%$, что превышает расчётный показатель для условий эксплуатации «А» $W_A = 0,6 \%$. Основная причина – неблагоприятный влажностный режим всей конструкции стены.

Полистирольный пенопласт менее проницаем для диффундирующей влаги, чем газосиликат и является преградой для её потока. Его коэффициент паропроницаемости $\mu = 0,044 \text{ мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$. Поэтому слой пенополистирола имеет массовую влажность, значительно превышающую расчётное массовое отношение для условий эксплуатации «А» $W_A = 2,0 \%$ и близкую к расчётному массовому отношению для условий эксплуатации «Б» $W_B = 10,0 \%$.

Слой газосиликата толщиной 40 мм, расположенный перед слоем пенополистирола, имеет влажность $W = 14,8 \%$ по массе, превышающую расчётное массовое отношение для условий эксплуатации «А» более чем в 3 раза и для условий эксплуатации «Б» более чем в 2 раза. Одна из причин – наличие остаточной технологической влаги газосиликата, а также как и для конструкции с наружным слоем теплоизоляции из каменной ваты, – неблагоприятный влажностный режим конструкции.

6.7 Выводы

1. Расчёт влажностных полей наружных ограждающих конструкций выполняется решением задач стационарного и нестационарного переноса. При проектировании наружных стен рассматривается стационарный режим переноса, который рассчитывается из условия недопустимости накопления влаги в годовом периоде эксплуатации.

2. Перенос влаги в материалах ограждающих конструкций в парообразной и жидкой фазах определяется двумя коэффициентами: паропроницаемости « μ », $\text{мг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па})$ и влагопроницаемости « λ », $\text{г}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{М})$. В инженерных расчётах оценка влагопереноса при влажности ниже максимальной сорбционной выполняется с использованием коэффициента паропроницаемости.

3. Расчётные методики позволяют получить общую характеристику влажностного состояния ограждающих конструкций. Конкретные данные получают при проведении экспериментальных исследований в натуральных условиях на эксплуатируемых объектах.

4. Результаты натуральных исследований показывают, что в однослойных наружных стенах зданий из кирпича и керамзитобетона, массовые влажности материалов ниже расчётных массовых соотношений соответствующих условиям эксплуатации «А» и «Б». Максимум массовой влажности расположен на расстоянии $\sim 2/3$ от внутренней поверхности стен.

В стенах из газосиликата, подверженных разрушению, массовая влажность бетона превышает расчётное массовое отношение для условий эксплуатации «А» и «Б». Область максимального увлажнения находится у наружной поверхности стен.

5. В многослойных стеновых панелях, со средним теплоизоляционным слоем величины массовой влажности материалов зависят от физических характеристик утеплителя.

Если теплоизоляционный слой из минераловатных плит находится в контакте с наружным слоем из железобетона, то максимальная массовая влажность материалов изменяется $W = 0,8 \dots 2,2$ % по массе.

При использовании в качестве теплоизоляции плит из пенополистирола, область максимальной влажности располагается там же, но массовая влажность равна $W = 1,8 \dots 2,75$ %.

6. Экспериментальные и аналитические исследования распределения влаги по сечению ограждающих конструкций, имеющих наружную дополнительную теплоизоляцию из минеральной ваты или пенополистирола, указывают на наличие скачков массовой влажности в плоскости контакта «основание стены – слой теплоизоляции», «слой теплоизоляции – укрывной слой».

При использовании в качестве теплоизоляции минеральной ваты накопление влаги происходит у укрывного слоя.

При использовании в качестве теплоизоляции плит из пенополистирола максимум массовой влажности находится в слое пенопласта, примыкающем к основанию стены.

Характер распределения массовой влажности подтверждает различную роль минеральной ваты и полистирольного пенопласта в формировании влажностного режима стены. Если минвата, имеющая пористую структуру и высокий коэффициент паропроницаемости, не препятствует прохождению влаги, то пенопласт уменьшает поток влаги из-за плотной структуры и низких коэффициентов паропроницаемости и влагопроводности.

Литература к главе 6

6.1. Лыков, А.В. Теоретические основы строительной теплофизики // А.В. Лыков, Минск: Из-во АН БССР, 1961. – 520 с.

6.2. Чураев, Н.В. Физико-химия процессов массопереноса в пористых телах // Н.В. Чураев, М., 1990.

6.3. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика // В.Н. Богословский / М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.

6.4. Богословский, В.Н. Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки здания // В.Н.Богословский / М.: Из-во МГСУ, 2013. – 103 с.

6.5. ТКП 45-2.04-43-2006. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования. – Минск. – 2007.

6.6. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М. – 2006.

6.7. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий // К.Ф. Фокин / М.: Стройиздат, 1973. – 285 с.

6.8. Ильинский, В.М. Строительная теплофизика // В.М. Ильинский // М.: Высшая школа, 1974. – 318 с.

6.9. Гагарин, В.Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий // В.Г. Гагарин. Автореферат диссертации д.т.н. – М., 2000. – 47 с.

6.10. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. – М.: Стройиздат, 1984. – 165 с.

6.11. Перехоженцев, А.Г. Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций // А.Г. Перехоженцев / Волгоград, 1997. – 272 с.

6.12. Лукьянов, В.И. Метод расчета влажностного состояния наружных ограждений с вентилируемой воздушной прослойкой для производственных зданий // Сб. «Исследования теплозащиты зданий». – М., 1983. – С. 84 – 93.

6.13. Козлов, В.В. Метод инженерной оценки влажностного состояния современных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты при учете паропроницаемости, влагопроводности и фильтрации воздуха // В.В. Козлов. Автореферат диссертации к.т.н. – М., 2004. – 23 с.

6.14. Васильев, Б.Ф. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий / Б.Ф. Васильев. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1957. – 212 с.

6.15. Васьковский, А.П. Микроклимат и температурно-влажностный режим ограждающих конструкций зданий на Севере / А.П. Васьковский. – Л.: Стройиздат, 1986. – 164 с.

6.16. Ушков, Ф.В. Теплотехнические свойства крупнопанельных стен // Ф.В. Ушков. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1956. – 104 с.

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

6.18. Рыхленок, Ю.А. Особенности эксплуатации и причины снижения долговечности наружных стен из ячеистых блоков автоклавного твердения // Ю.А. Рыхленок, А.Б. Крутилин. В сб. научных трудов «Проблемы современного бетона и железобетона». Минск, 2012 г. – С.107 – 109.

6.19. Протасевич А.М. Натурные исследования тепловлажностного режима стен и помещений жилых зданий, в ограждениях которых использованы в качестве наружной теплоизоляции изделия из каменной ваты и пенополистирола//А.М. Протасевич и др./Заключительный отчет по научно-исследовательской работе. № г.р. 2004161. – Минск, 2005 – 184 п.л.

ГЛАВА 7. ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

7.1 Общие сведения

Для достижения необходимого уровня тепловой защиты зданий в наружных конструкциях используются эффективные теплоизоляционные материалы. К наиболее распространённым теплоизоляторам относятся:

- изделия из пенополистирола;
- изделия из минеральной ваты.

Кроме перечисленных материалов на строительных объектах применяют пенополиуретан, пеностекло, эковату, полистиролбетон и другие теплоизоляторы.

Современные теплоизоляционные материалы в условиях эксплуатации должны эффективно влиять на формирование теплового и влажностного режимов ограждений, обеспечивающих нормативные условия микроклимата помещений. Но различия в природе и структуре теплоизоляционных материалов определяют их особенности, которые следует учитывать как при проектировании, так и при эксплуатации ограждений.

7.2 Пенополистирол. Тепломассообменные характеристики

Производство пенополистирольных изделий осуществляется по прессовому, по беспрессовому методам или экструзионным способом. В строительстве находит использование два вида пенополистирола: беспрессовый вспененный и экструдированный.

Плиты вспененные теплоизоляционные марок ПСБ-С выпускают с антипиреном, а ПСБ без него. Плотность пенополистирола $\rho = 15, 25, 35$ и 50 кг/м^3 . Он не гигроскопичен, трудновоспламеняем, прочен, используется в качестве среднего слоя ограждающих конструкций при температурах не выше 70°C .

Экструзионный пенополистирол имеет закрытую однородную ячеистую структуру. Плотность его $\rho = 35$ и 45 кг/м^3 . Максимальная температура эксплуатации 75°C .

Технические характеристики экструзионного пенополистирола значительно стабильнее, чем вспененного. Водопоглощение плит

«пеноплекс» из экструзионного пенополистирола, как в условиях погружения в воду, так и в паровоздушной среде в 5-10 раз ниже, чем плит ПСБ. Это обеспечивает сохранение высоких теплоизоляционных качеств при эксплуатации в условиях повышенной влажности, однако чрезмерно высокое сопротивление паропроонианию ограничивает применение экструзионного пенополистирола в наружных системах теплоизоляции. Различие в физических характеристиках различных видов пенополистирола иллюстрирует представленная на рис. 7.1 зависимость коэффициента теплопроводности от массовой влажности для экструзионного и вспененного материалов [7.1].

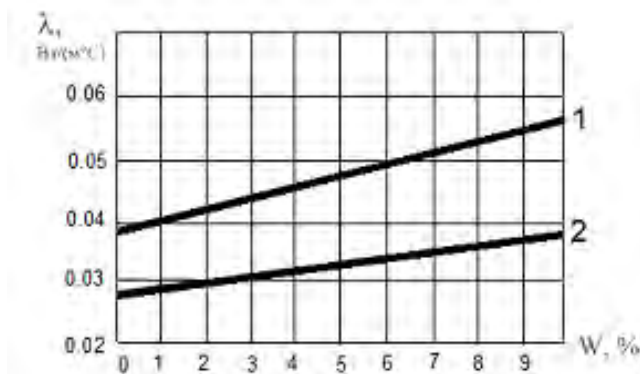


Рис. 7.1. Зависимость коэффициента теплопроводности пенополистирола от массовой влажности
1 – вспененный ПСБ-С; 2 – пеноплекс

Сорбционная влажность полистирольного пенопласта для наиболее часто встречающихся плотностей изделий, по результатам исследований авторов работы [7.1] представлена в табл. 7.1.

В строительстве пенополистирольные пенопласты применяются:

- в качестве утеплителя в многослойных стеновых панелях заводского изготовления;
- в лёгких алюминиевых панелях на основе стальных и алюминиевых листов в качестве утеплителя;
- в качестве дополнительных утепляющих слоёв в строительных конструкциях;

- для утепления стыковых соединений между панелями, дверными и оконными блоками;
- дополнительной теплоизоляции стен;
- теплоизоляции покрытий и перекрытий зданий.

Таблица 7.1

Значения сорбционных влажностей пенополистирола при температуре 20 °С.

Плотность пенополистирола, кг/м ³	Массовая влажность пенополистирола (W _s , %) при относительной влажности воздуха в %						
	40	50	60	70	80	90	100
15	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,3
20	0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,3	1,7
25	0,8	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	2,2
30	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,6
35	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,3	3,0
40	1,3	1,6	1,9	2,1	2,4	2,7	3,5

В процессе эксплуатации полимерные теплоизоляционные материалы стареют в связи с деструкцией, вызванной разрывом основной молекулярной цепи, что и приводит к растрескиванию и разрушению утеплителя и выделению в окружающую среду продуктов деструкции – химически вредных веществ [7.2]. Деструкцию полимерного утеплителя вызывает влага, поступающая из воздуха в период влагонакопления, когда утеплитель набухает, а ингредиенты его выщелачиваются.

Следует отметить, что существует противоположная точка зрения на влияние продуктов мигрирующих из пенополистирола на окружающую среду. Исследования эмиссии вредных веществ из пенополистирольных плит при температурах до 80 °С показали наличие их в воздухе в пределах от 3,8...178,5 нг/см³. В пересчёте на единый уровень насыщенности это составляет 6,3·10⁻⁹ г/см³ при ПДК 2·10⁻⁶ г/см³, т.е. в 3000 раз ниже нормы [7.3], и они не оказывают вредного воздействия на человека.

Поведение пенополистирола при контакте с водой можно оценить с учётом двух основных факторов: водопоглощения и паро-

проницаемости. Пенополистирол не гигроскопичен, однако количество воды, которое может проникнуть в него, зависит от количества и объёма промежутков между гранулами, т.е. от наличия закрытой и открытой пористости.

В работе [7.4] описываются исследования по изменению в процессе эксплуатации водопоглощательной способности пенополистирола, изготовленного различными методами. Рассматриваются беспрессовый и прессовый методы изготовления и метод экструзии (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Сравнение образцов пенополистирола
по характеристикам сорбционной влажности

Наименование образцов пенополистирольных плит	Максимальная сорбционная влажность образцов по массе, %		
	До проведения испытаний на водопоглощение и морозостойкость	Образцов, прошедших испытание на водопоглощение (2 года)	Образцов, прошедших испытание на морозостойкость (110 циклов)
Пенополистирол, изготовленный беспрессовым методом, $\rho_0 = 17 \text{ кг/м}^3$	0,9	1,50	1,60
Пенополистирол, изготовленный прессовым методом, $\rho_0 = 32 \text{ кг/м}^3$	0,7	0,90	0,97
Пенополистирол, изготовленный методом экструзии, $\rho_0 = 35 \text{ кг/м}^3$	0,6	1,07	1,15

Представленные результаты указывают на изменение максимальной сорбционной влажности образцов пенополистирола в зависимости от вида прошедших испытаний. Увеличение максимальной сорбционной влажности более заметно на образцах, прошедших цикл испытаний на морозостойкость. Следует подчеркнуть, что любой вид воздействия «вдoпоглощение – сушка» или «замораживание – оттаивание» влияет на изменение структуры пенопласта. Многократные изменения тепловлажностного состояния пенополи-

стирола в процессе эксплуатации ограждающих конструкций зданий оказывают влияние на его физические свойства.

Для оценки теплообменных характеристик пенополистирола отечественного производства были выполнены исследования на образцах, отбираемых на предприятиях, строительных площадках из наружной теплоизоляции стен зданий.

Результаты теплофизических лабораторных исследований характеристик пенопласта, в том числе и водопоглощения, как отечественного производства, так и поставляемых в Республике Беларусь, сведены в табл. 7.3. Анализ полученных данных показал большой разброс результатов определения теплофизических характеристик.

Плиты полистирольные плотностью $\rho \approx 15 \dots 20 \text{ кг/м}^3$ имеют водопоглощение в пределах 1,3...4,3 % по объёму. Более высокое водопоглощение относится к изделиям ООО «Анастан» – $W = 4,3 \%$ и «Эузарис» – $W = 2,08 \%$. Меньшее водопоглощение к изделиям Слуцкого строительного комбината – $W = 1,5 \%$ и к изделиям ППТ -15 Н-А производства ООО «Сармат» – $W = 1,3 \%$.

Плитные изделия плотностью $\rho = 20\text{-}30 \text{ кг/м}^3$ имеют водопоглощение в пределах $W = 0,1 \dots 1,5 \%$ по объёму, а изделия из полистирольного пенопласта $\rho = 34 \text{ кг/м}^3$, извлечённые из наружной теплоизоляции стен зданий, имеют водопоглощение по объёму равное $W = 1,0 \dots 1,7 \%$.

Пенопласт из экструзионного пенополистирола $\rho = 34 \text{ кг/м}^3$, производства Великобритании имеет водопоглощение $W = 1,0 \%$, вместо рекламируемых в зарубежных изданиях $W = 0,1 \%$.

Оценивая результаты исследований, следует отметить, что испытанные материалы удовлетворяют требованиям СТБ 1437-2004, но в тоже время могут поглощать влагу по массе до 50 % в зависимости от плотности пенопласта.

Выполненные исследования водопоглощательной способности пенополистирольных изделий показали, что полистирол, изготовленный беспрессовым методом, обладает относительно большей способностью набирать влагу по сравнению с изготовленным прессовым и экструзионным способами. Полученные экспериментальные данные нельзя автоматически переносить на всю продукцию, выпускаемую многочисленными отечественными производителями, но следует более тщательно подходить к оценке продукции, поступающей на строительные площадки и предприятия стройиндустрии.

Таблица 7.3

Тепломассообменные характеристики полистирольного пенопласта, используемого в строительстве на территории РБ

№ п/п	Наименование производителя	Образцы получены или изъяты на объектах	ρ , кг/м ³	Водопоглощение, % по объёму	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Массовая влажность W, %		Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)
						Сорбиционная влажность, %		
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Плиты из экструдированного пенополистирола фирмы «Евробик систем лимитед» Великобритания, ГОСТ 15588-86	Образцы материала	34,0	1,0 (за 24 ч)	0,033			0,02
2	Натурные образцы	Жилой дом	34,8	1,7	0,037...0,039	7,3...13,6		0,044...0,022
3	Натурные образцы	Жилой дом	14,9		0,07	9,6...11,6		0,059...0,083
4	Натурные образцы	Жилой дом	64,7	1,5 (за 24 ч)	0,041	0,18		0,046
5	Плиты пенополистирольные ГОСТ 15588-86 производства «Еухарис»	Образцы материала	14,7	2,08 (за 24 ч) (139,8 % по массе за 24 ч)	0,043 (при естественной влажности)/0,042 (в сухом состоянии)		1,2/0,09 (за 72 ч)	0,070

Продолжение табл. 7.3

1	2	3	4	5	6	7	8
6	Плиты пенополистирольные ГОСТ 15588-86 производства КСИ	Образцы мате-риала	27,7	1,59 (за 24 ч) (55,4 % по массе за 24 ч)	0,036 (при естественной влажности)/ 0,035 (в сухом состоянии)	0,9/0,04 (за 24 ч)	0,059
7	Плиты пенополистирольные теплоизоляционные, СТБ 1437-2004 производства ООО «Анастан»	Образцы мате-риала	17,1	4,3 (за 24 ч)	0,041	0,2	0,067
8	Плиты пенополистирольные ПСБ-С-25, ГОСТ 15588-86 пр-ва «Слуцкий строительный комбинат»	Образцы мате-риала	19,1	1,5 (за 24 ч)	0,039	0,3	0,036
9	Плиты пенополистирольные ПСБ-С-35, ГОСТ 15588-86 пр-ва «Слуцкий строительный комбинат»	Образцы мате-риала	26,5	0,1 (за 24 ч)	0,037	0,3	0,039
10	Плиты пенополистирольные ПСБ-С (партия №1), СТБ 1437-2004 пр-ва «Слуцкий строительный комбинат»	Образцы мате-риала	19,0	1,5 (за 24 ч)	0,039	0,3	0,036

Окончание табл. 7.3

1	2	3	4	5	6	7	8
11	Плиты пенополистирольные ПСБ-С (партия №2), СТБ 1437-2004 пр-ва «Слуцкий строительный комбинат»	Образцы мате-риала	26,5	0,1 (за 24 ч)	0,037	0,3	0,039
12	Плиты пенополистирольные ППП-15Н-А 1437-2004 производство ООО «Сармат»	Образцы мате-риала	16,3 ... 18,2	1,3 (за 24 ч)	0,0417... 0,0436	0,2/1,0 (φ = 75 %) 2,5 (φ = 90 %)	0,025

Коэффициент паропроницаемости пенопласта является наиболее ответственной характеристикой утеплителя, определяющей его поведение в многослойных строительных конструкциях. Анализ результатов определения паропроницаемости плитных изделий из пенополистирола показывает, что коэффициент для изделий различной плотности получен в среднем $\mu = 0,036$ мг/(м·ч·Па). И только для экструзионного пенопласта он примерно в два раза меньше и равен $\mu = 0,02$ мг/(м·ч·Па). Т.е. экспериментальные результаты ниже коэффициентов паропроницаемости, приведенных в ТКП 45-2.04-43-2006.

7.3 Минеральная вата. Теплообменные характеристики

Минеральную вату получают из силикатных расплавов горных пород, металлургических шлаков и их смеси, стеклобоя и других материалов. Из расплавов горных пород изготавливают каменную вату. По своей структуре она представляет хаотично переплетённые стекловидные волокна диаметром около 15 мкм и длиной 30-40 мм. Сырьём для её производства служат базальты, габбро и диабазы, фенолформальдегидные смолы (связующее) и гидрофобизирующие добавки. Содержание органических веществ в каменной вате в пределах 3 – 4 %.

В основе её высокой теплоизоляционной способности лежит низкая теплопроводность воздуха, заполняющего пространство между волокнами, в неподвижном состоянии равная при $t = 10$ °С, $\lambda = 0,026$ Вт/(м·°С). Коэффициент теплопроводности каменной ваты в эксплуатационном состоянии составляет примерно 0,040...0,050 Вт/(м·°С). Плотность изделий из неё колеблется в диапазоне – от 30 до 230 кг/м³. Т.к. по своему химическому составу базальтовое волокно не отличается от горной породы, вата, сделанная из него, выдерживает высокие температуры, не теряя своих пожарозащитных свойств. Базальтовое волокно обладает также высокой химической стойкостью и не гниёт. Срок службы изделий из каменной ваты – несколько десятилетий.

На эксплуатационные качества каменной ваты значительную роль оказывают её свойства проводить теплоту и влагу. Ниже представлены результаты экспериментальных исследований теплообменных характеристик для наиболее используемых плитных материалов, выпускаемых компанией PAROC [7.5].

Таблица 7.4

**Коэффициент паропроницаемости каменной ваты
в зависимости от плотности**

Марка плит	Фактическая плотность образцов в сухом состоянии, кг/м ³	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)
KKL	226	0,21
VL	118	0,48
AKL	105	0,45
RAL-4	136	0,44
LAM	53	0,60
LAM-Ф	87	0,59
IL	34	0,56
EL	85	0,50
SV	59	0,45

Сорбционная влажность этих же материалов приведена в табл. 7.5.

Таблица 7.5

Сорбционная влажность каменной ваты

Марка плит	Плотность в сухом состоянии, кг/м ³		Сорбционная влажность, % по массе, по ГОСТ 24816 при относительной влажности воздуха			
	номинальная	фактическая	40 %	60 %	80 %	97 %
KKL	230	238	0,23	0,49	0,96	1,02
VL	100	125	0,22	0,30	0,41	0,80
AKL	110	95	0,27	0,68	0,94	1,24
RAL-4	130	125	0,23	0,32	0,68	0,71
LAM	50	58	0,27	0,80	0,93	1,10
LAM-Ф	80	85	0,20	0,54	0,58	0,64
IL	30	29	0,02	0,23	0,53	0,66
EL	90	76	0,16	0,24	0,27	0,35
SV	80	55	0,19	0,25	0,28	0,35

Коэффициенты теплопроводности при различных эксплуатационных состояниях ваты по результатам экспериментальных исследований сведены в табл. 7.6.

Анализ коэффициентов теплопроводности образцов каменной ваты в сухом состоянии указывает на их изменение в пределах $\lambda_0 = 0,037...0,044$ Вт/(м·°С). При этом различие в коэффициентах теплопроводности каменной ваты изделий одной плотности составляет до 9 %. Объяснить такое расхождение можно различием в структуре каменной ваты, получаемых в процессе их изготовления.

Таблица 7.6

Коэффициенты теплопроводности каменной ваты

Марка плит	Плотность в сухом состоянии, кг/м ³		Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии Вт/(м·°С)		Влажность, % по массе, при условиях эксплуатации		Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), при условиях эксплуатации	
	номинальная	фактическая	по данным изготовителя при +10 °С	экспериментальное значение при +25 °С	А	Б	А	Б
KKL	230	238	0,038	0,038	0,6	1,0	0,042	0,045
VL	100	120	0,034	0,037	0,6	1,0	0,040	0,042
AKL	110	119	0,035	0,039	0,6	1,0	0,041	0,043
RAL-4	130	141	0,035	0,040	0,6	1,0	0,042	0,043
LAM	50	48	0,039	0,044	0,3	0,5	0,046	0,048
LAM-Ф	80	87	0,039	0,042	0,3	0,5	0,044	0,046
IL	30	36	0,036	0,038	0,3	0,5	0,040	0,043
EL	90	76	0,034	0,036	0,3	0,5	0,038	0,040
SV	80	51	0,035	0,037	0,3	0,5	0,038	0,039

Сопоставление результатов исследований паропроницаемости и сорбционной влажности каменной ваты также указывает на их зависимость от вида и структуры изделий. Каменная вата в образцах практически равной плотности имеет разные по величине массообменные характеристики.

На основании базальтового минераловатного волокна осуществляется изготовление плит «Ламели». Фасадная «Ламель» представляет негорючие гидрофобизированные тепло-, звукоизоляционные плиты на синтетическом связующем, изготовленные из минеральной ваты на основе горных пород базальтовой группы. Волокна в «Ламели» расположены перпендикулярно изолируемой поверхности. Благодаря такой ориентации волокон ламели имеют высокую гибкость, что облегчает изоляцию криволинейных поверхностей.

Плиты «Ламели» имеют плотность $\rho \approx 80 \dots 90 \text{ кг/м}^3$, коэффициент теплопроводности не более $\lambda = 0,044 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, влажность по массе не более 0,5 %, паропроницаемость в пределах $\mu = 0,3 \dots 0,6 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

Шлаковата. Производится на основе использования отходов металлургического производства (доменные, мартеновские и др. плавки). Она имеет неустойчивый минералогический состав, и её волокна самопроизвольно распадаются в результате химических реакций, особенно, при взаимодействии с водой. Разрушение шлаковаты происходит и при частых переходах температуры через 0 °C . В шлаках могут присутствовать тяжёлые металлы и токсические химические соединения. Использование шлаковаты нежелательно в зданиях постоянного пребывания людей.

В системах утепления могут применяться – плиты шлаковатные, в составе которых присутствует базальт, это негорючие изделия марок 75, 125 и 175, изготавливаемые по ТУ РБ 400051892.255-2001.

Теплопроводность шлаковой ваты при плотности $170 \dots 200 \text{ кг/м}^3$, в зависимости от температуры определяется по формуле

$$\lambda_t = 0,06 + 0,000145 \cdot t, \quad (7.1)$$

где λ_t – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Третий вид минеральной ваты – стекловата. Для её получения используются те же компоненты, что и при изготовлении обычного стекла, а также стеклобой. В результате получается вата из хаотично переплетённых стеклянных волокон средним диаметром 6 мкм и длиной 150-200 мм. А изделия из стекловаты имеют плотность порядка $110-130 \text{ кг/м}^3$. Благодаря эластичности и упругости стекловата сжимаема без потери эксплуатационных характеристик, её отличает низкое содержание неволоконистых включений и высокая виб-

ростойкость, а также повышенные акустические свойства, биологическая и химическая стойкость. Теплопроводность стекловаты сравнима с теплопроводностью каменной ваты но, у неё низкая водоотталкивающая способность. Стекловолоконистые изделия обладают большей гигроскопичностью, чем минеральные, и, с увеличением плотности гигроскопичность изделия возрастает.

В строительной отрасли в основном используются изделия из каменной ваты.

В процессе выполнения теплотехнических исследований наружной теплоизоляции зданий были выполнены исследования тепло-массообменных характеристик минеральной ваты. Образцы для исследований извлекались из наружных стен или были представлены предприятиями. В табл. 7.7 сведены тепло-массообменные характеристики каменной и шлаковаты. Анализ характеристик показывает, что водопоглощение по массе каменной ваты составляет $W_m = 4,5...13$ %, что соответствует объёмному водопоглощению $W_o = 0,63...1,29$ %, коэффициент паропроницаемости пределах $\mu = 0,299...0,47$ мг/(м·ч·Па).

Характеристики шлаковаты (№6 и 8) по водопоглощению значительно выше, чем каменной ваты. Водопоглощение по массе составляет $W_m = 12,4...15,8$ %, что соответствует объёмному водопоглощению $W_o = 1,55...1,84$ %. Коэффициент паропроницаемости шлаковаты равен $\mu = 0,42...0,46$ мг/(м·ч·Па).

Сравнение характеристик по массовой влажности каменной ваты, полученные в результате натурных обследований систем утепления зданий, представлены в табл. 7.8.

Экспериментально определённая массовая влажность образцов каменной ваты, взятых на двух объектах, отличается от максимальной сорбционной влажности на $\pm 25-30$ %. И только в одном случае в слое каменной ваты системы утепления жилого дома экспериментально определённая массовая влажность в три раза выше максимальной сорбционной.

При использовании каменной ваты в климатических условиях Республики Беларусь очень важным является влагопоглощение и водоудаление в естественных условия проведения работ по теплоизоляции зданий. С целью оценки влажностного режима каменной ваты, закреплённой на стене здания, до нанесения на него защитного и отделочного слоёв были проведены натурные исследования.

Таблица 7.7

Тепломассовые характеристики минеральной ваты в изделиях, используемых в строительстве

№ п/п	Наименование производителя	Образцы получены или изъяты на объектах	ρ , кг/м ³	Водопоглощение, % по объёму	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Массовая влажность W, %	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	«Ратос» ГОСТ 9573-96	ПТЧУП «Сармат спецстрой»	127	13,8	0,038		0,319
2	Натурные образцы (каменная вата FAS-4, PAROC)	Жилой дом	134	-1,4/-	0,04...0,038	0,44	0,337
3	Натурные образцы/каменная вата Paroc/покрытые/весь образец	Жилой дом	156	9,2	0,04...0,049	2,2...1,8	0,47
4	Фрагменты дополнительной теплоизоляции стен жилого 10-ти этажного здания (каменная вата Rockwool в условиях эксплуатации/утеплитель в сухом состоянии)	Жилой дом	127	8,7	0,038	0,51	0,299
5	Натурные образцы с утеплителем из минеральной ваты фирмы Rockwool (каменная вата/защитно-отделочное покрытие/весь образец)	Общественное здание	134	5,6/-	0,041...0,046	—	0,37

Окончание таблицы 7.7

1	2	3	4	5	6	7	8
6	Натурные образцы с утеплителем из минеральной ваты фирмы ОАО «Гомельстройматериалы» (минеральная вата)	Общественное здание	125	15,8	0,047...0,053	—	0,46
7	Натурные образцы с утеплителем из минеральной ваты фирмы Рагос (каменная вата)	Жиллой дом	145	4,5	0,038...0,042	—	0,379
8	Натурные образцы с утеплителем из минеральной ваты фирмы ОАО «Гомельстройматериалы» (минеральная вата)	Жиллой дом	149	12,4	0,04	—	0,42

Таблица 7.8

Характеристики каменной ваты по массовой влажности

Объект, производитель минваты	Плотность ρ , кг/м ³	Срок эксплуатации утеплителя, лет	Экспериментально определённая массовая влажность утеплителя, W , %	Массовая влажность по условиям эксплуатации «А» и «Б», W , %	Массовая сорбционная влажность при $\phi = 97\%$, W_s , %
Административное здание, Fasrock	130	3	0,76-1,07	0,6	0,71
Жилой дом, Paroc, RAL-4	130	3	1,42-2,60	1,0	0,71
Жилой дом Fasrock	190	7	0,41-0,85	1,0	1,01

Определение массовой влажности каменной ваты было выполнено на образцах, извлечённых из дополнительной теплоизоляции стены 20-ти этажного жилого здания. Здание расположено на возвышенности в открытой местности. Материал утеплителя – плиты из каменной ваты «FASROCK» и «Изоляция». Крепление плит к стенам здания при температуре наружного воздуха $t_n > 5^\circ\text{C}$ осуществлялось клеящим составом «Сармалеп».

Метеорологические условия до и во время извлечения образцов из стены в ноябре месяце характеризовались температурой $t = +2\dots6^\circ\text{C}$, юго-восточным и южным ветрами со скоростью $v = 2\dots10$ м/с, отсутствием осадков, но наличием тумана.

В процессе проведения натурного эксперимента каменная вата на юго-западной стене дома на уровне первого этажа дополнительно искусственно дождалась.

Отбор проб производился из теплоизоляции юго-западной стены на уровнях 1 –го, 3-его и 13-го этажей. Образцы №5 и №6 были взя-

ты из плит утеплителя предварительно снятых с участка стены. Образцы №7 и №8 извлечены из участка теплоизоляции стены 1-го этажа, прошедшего искусственное дождевание к моменту отбора проб, а образцы №9 и №9' из этого же участка через сутки после дождевания. Образцы №10 и №10' вырезаны из плит минеральной ваты взятых из фабричной упаковки на строительной площадке.

Размеры образцов минеральной ваты 200×200×50 мм. После изъятия образцы упаковывались в герметичные полиэтиленовые мешки и направлялись в лабораторию, для определения массовой влажности.

Одновременно с отбором проб минераловатного утеплителя из этих же мест отбирались пробы клеевого материала в бюксы.

Выемка образцов после их выпиливания из слоя утеплителя сопровождалась приложением значительных усилий, что свидетельствует о хорошем сцеплении минеральной ваты с клеевым слоем и клеевого слоя со стеной здания. После выемки образцов отмечена неравномерность толщины клеевого слоя, т.е. имеют место зазоры между минеральной плитой и стеной здания. Величина зазоров не превышает 6 мм.

Результаты определения массовой влажности представлены в табл. 7.9.

Анализ результатов, представленных в табл. 7.9, показывает, что образцы минеральной ваты, изъятые со стены имеют массовую влажность до 1 %, при нормативной величине 5 %. Образцы №7 и №8, имеющие после дождевания массовую влажность 23,5 % и 30,1 % соответственно, через сутки после увлажнения имели массовую влажность не превышающую 1 %. Следует иметь в виду, что водопоглощение и насыщение водой в результате дождевания имеют различный механизм. Образцы минеральной ваты №5 и №6, находившиеся вне изоляции в течение 16 часов, имели массовую влажность 3,97 % и 3,86 % соответственно, что объясняется прямым воздействием атмосферных осадков. На строительную площадку поступают минераловатные плиты в заводской упаковке с массовой влажностью 0,35...0,42 %.

Клей «Сармалеп», пробы которого были взяты одновременно с пробами минеральной ваты, имеет массовую влажность 1,58...11,7 %.

Таблица 7.9

Массовая влажность каменной ваты, использованной для тепловой изоляции наружных стен

№ образца	Место отбора проб	Материал	Влажность массовая, %	Плотность ρ , кг/м ³	Влажность массовая при условиях эксплуатации «Б», W_v , %
1	2	3	4	5	6
1	1-й этаж	Минеральная вата «FASROCK»; клей «Сармалеп»	0,97 2,85	122,5	5 —
2	3-й этаж	Минеральная вата «FASROCK»; клей	0,36 1,58	180,0	5 —
3	13-й этаж	Минеральная вата «Изоляция»; клей	0,84 8,67	157,0	5 —
4	13-й этаж	Минеральная вата «Изоляция»; клей	1,1 11,7	184,0	5 —
5	13-й этаж	Минеральная вата «Изоляция»; клей	3,97 11,5	208,0	5 —

Продолжение таблицы 7.9

1	2	3	4	5	6
6	13-й этаж	Минеральная вата «Изоляция»; клей	3,86	215,0	5
7	1-й этаж после дождевания	Минеральная вата «FASROCK»; клей	23,5 9,48	119,0	5 —
8	1-й этаж после дождевания	Минеральная вата «FASROCK»; клей	30,1 13,1	120,0	5 —
9	1-й этаж через сутки после дождевания	Минеральная вата «FASROCK»; клей	0,61 3,2	124,0	5 —
10	1-й этаж через сутки после дождевания	Минеральная вата «FASROCK»; клей	0,93 7,4	128,0	5 —

Окончание таблицы 7.9

1	2	3	4	5	6
11	из заводской упаковки	Минеральная вата	0,35	130,0	1,0 по техническим условиям
12	из заводской упаковки	Минеральная вата	0,42	128,0	1,0 по техническим условиям

Натурные исследования каменной ваты, закреплённой на стене дома, и открытой для атмосферных воздействий показали:

1. Массовая влажность образцов минераловатных плит дополнительной тепловой изоляции 20-ти этажного жилого здания, закреплённых на стене, не оштукатуренных и, следовательно, открытых для непосредственного воздействия атмосферных осадков не превышает $W = 4 \%$.

2. Насыщенные водой на стене здания до 30-ти процентной массовой влажности образцы минераловатных плит дополнительной тепловой изоляции через сутки после увлажнения имели массовую влажность 0,61-0,93 %, т.е. незначительно отличающуюся от массовой влажности поступающих на строительную площадку минераловатных плит в заводской упаковке (0,35-0,42 %) и образцов, снятых со стены.

Это объясняется в частности и благоприятно сложившихся на момент отбора проб условиями: ночное похолодание и сильный, порывистый ветер, что способствовало интенсивной просушке материала.

Каменная вата интенсивно поглощает, но и хорошо отдаёт влагу, находясь в естественных условиях контакта с окружающей средой.

7.4 Пенополиуретан, эковата и другие теплоизоляционные материалы

Кроме широко применяемых теплоизоляционных материалов из пенополистирола и минеральной ваты, в ограждающих конструкциях зданий используют пенополиуретан, эковату, пеностекло и другие материалы. Ниже приведены характеристики указанных материалов.

Пенополиуретан является термореактивной пластмассой с ячеистой структурой. До 95 % его объёма занимают замкнутые поры. Нанесение полиуретана осуществляется методом напыления или заливки. Материал биологически и химически стоек, долговечен, обладает высокой адгезией к другим материалам. Основной недостаток – горючесть.

Пенопласты из пенополиуретана имеют плотность от 30 до 200 кг/м³. Их коэффициент теплопроводности лежит в пределах от 0,019 до 0,050 Вт/(м·°С), а паропроницаемости в пределах $\mu = 0,015 \dots 0,05$

мг/(м·ч·Па). Водопоглощение пенополиуретана не превышает 1...8 % по объёму за 24 часа. Расчётное массовое отношение влаги при условиях эксплуатации «А» и «Б» соответственно, составляет 2 и 5 %.

Пенополиуретановые пенопласты в ограждающих конструкциях необходимо защищать от воздействия ультрафиолетового излучения и атмосферной влагой.

Эковата – рыхлый, лёгкий теплоизоляционный материал, состоящий на 81 % из отработанной целлюлозы, а также антипирена и антисептиков. Она наносится или укладывается путём напыления или распыления, образуя плотный и бесшовный слой теплоизоляции. Теплоизолирующие свойства эковаты, имеющей плотность $\rho = 30...85 \text{ кг/м}^3$, связаны с высокой теплоизолирующей способностью целлюлозного волокна и воздуха, заполняющего промежутки между волокнами. Коэффициент теплопроводности эковаты в пределах $\lambda = 0,036...0,046 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$.

Эковата обладает значительной гигроскопичностью, которая может достигнуть 34 % при $\phi = 97$ %. Основная масса сорбируемой влаги поглощается эковатой при $\phi > 80$ %, что объясняется капиллярным механизмом сорбции. Коэффициент паропроницаемости эковаты в пределах $0,3...0,67 \text{ мг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$.

Оценку влажностного состояния эковаты плотностью $\rho = 65...75 \text{ кг/м}^3$, применённой в наружных стенах из кирпичной кладки в качестве среднего слоя, выполнили в институте «Термоизоляция» г. Вильнюс [7.6]. В обследованных стенах жилых зданий средняя массовая влажность эковаты изменялась в течение 1,5 лет в пределах $W = 11,5...13,2$ %, при равновесной максимальной влажности $W_s \approx 33$ %. Исследования показывают, что в слое эковаты влага не накапливается, а удаляется из стен через кирпичную подоснову и облицовку.

Пеностекло – ячеистый материал с равномерно распределёнными порами диаметром 0,1...5 мм, разделёнными тонкими стенками. При плотности от 100 до 500 кг/м³ пеностекло самый прочный и водо- и пароницаемый материал из теплоэффективных изоляторов. Коэффициент теплопроводности пеностекло $\lambda = 0,040...0,093 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$, а водопоглощение по объёму не более $W = 0,5$ %.

Плиты и блоки из пеностекла устойчивы к химическим и биологическим воздействиям, полностью негорючи. Они могут быть использованы для теплоизоляции полов, кровель, фундаментов, хозяйственных построек.

Полистиролбетон представляет материал на цементном вяжущем, в котором в качестве заполнителя используются гранулы из вспененного пенополистирола. Плотность теплоизоляционного полистиролбетона $\rho = 150 \dots 300 \text{ кг/м}^3$. Его коэффициент теплопроводности в условиях эксплуатации «А» и «Б» равен $\lambda = 0,057 \dots 0,0105 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$. Полистиролбетон указанной плотности имеют коэффициент паропроницаемости в пределах $\mu = 0,135 \dots 0,100 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$, расчётное массовое отношение влаги при условиях эксплуатации «А» и «Б» соответственно 4 и 8 %.

Теплофизические свойства полистиролбетона позволяют использовать его (в частности) для наружной теплоизоляции стен и кровель.

7.5 Засыпки из сыпучих материалов

Для теплоизоляции совмещённых покрытий, чердачных перекрытий, полых стен эксплуатируемых зданий при выполнении ремонтных работ, деревянных каркасных конструкций применяются засыпки из керамзитового и аглопоритового гравия, перлитового песка, вспученного вермикулита, шлаков и др. сыпучих материалов. Наиболее часто теплоизоляция из засыпок применяется в совмещённых покрытиях и в перекрытиях холодных чердаков и подвалов (рис. 7.2).

Керамзит – экологически чистый, сыпучий, пористый, лёгкий строительный материал. Преимущественное отличие керамзита состоит в использовании в качестве исходного сырья специальных пород глины с содержанием около 30 % кварца. Получают его путём быстрого обжига легкоплавких пород глины, способных вспучиваться при нагревании до $1050 \dots 1300 \text{ °С}$. В результате нагрева образуются округлые гранулы с оплавленной поверхностью.

В зависимости от формы и величины гранул различают несколько его разновидностей:

– гравий получают в виде гранул округлой формы размером $5 \dots 40 \text{ мм}$ с пористой сердцевинкой и плотной спекшейся оболочкой. Насыпная плотность керамзита $\rho = 250 \dots 800 \text{ кг/м}^3$;

–щебень получают размельчением крупных фракций спечённого сырья. По размерам такой же, как и гравий, но имеет произвольную угловатую форму;

– песок получают дроблением некондиционных зёрен гравия или путём обжига сырья во взвешенном состоянии.



Рис. 7.2 Вскрытие совмещённого покрытия со слоем теплоизоляции из керамзитового гравия толщиной $\delta = 140$ мм и $\rho = 600$ кг/м³

Засыпки из керамзита отличаются хорошей тепло- и звукоизоляцией, долговечностью, морозостойкостью.

Теплопроводность засыпок из керамзитового гравия характеризуется коэффициентом, лежащим в пределах $\lambda = 0,08 \dots 0,18$ Вт/(м·°С) (рис. 7.3).

Коэффициент паропроницаемости керамзитового гравия в зависимости от плотности равен $\mu = 0,23 \dots 0,26$ мг/(м·ч·Па).

Благодаря замкнутой пористости водопоглощение керамзитового гравия в пределах до 10 %, а морозостойкость может достигать 25...50 циклов.

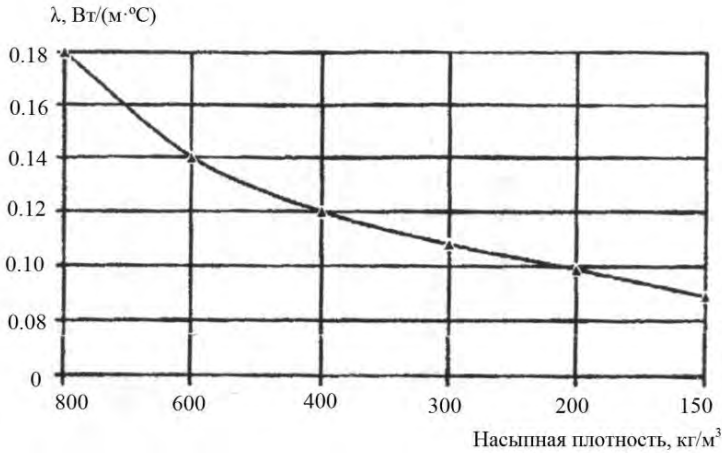


Рис. 7.3. Зависимость коэффициента теплопроводности от плотности керамзита

Перлитовый щебень и песок – лёгкие пористые материалы минерального происхождения. Получают его путём вспучивания при температурах 950...1100 °С водосодержащей алюмосиликатной перлитовой породы вулканического происхождения.

Используется вспученный перлит двух видов: перлитовый песок размером частиц до 5 мм и перлитовый щебень размером от 5 до 20 мм. Перлитовый щебень, в основном, применяется в качестве лёгкого заполнителя при производстве бетонов.

Вспученный перлитовый песок используется для теплоизоляции стен, перекрытий и покрытий. Обработка перлита негорючим гидрофобизатором значительно улучшают его водоотталкивающие свойства. Он огнестоек, биостоек, химически инертен. Его коэффициент теплопроводности в зависимости от насыпной плотности изменяется от 0,047 до 0,093 Вт/(м·°С) (табл. 7.10).

Наиболее существенное влияние на теплопроводность перлитового песка оказывает влажность. Теплопроводность при влажности 10 % увеличивается в 2 раза, а при 80 % – 3...4 раза. Следует также отметить, что увлажнённый перлитовый песок трудно подвергается сушке, процесс этот длителен и требует значительных затрат теплоты. Поэтому в

условиях эксплуатации теплоизоляцию из вспученного перлита необходимо защищать от увлажнения.

Таблица 7.10

Коэффициенты теплопроводности перлитового песка

№ п/п	Марка песка	Теплопроводность при $t = (25 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$, Вт/(м·°C)
1	75	0,047
2	100	0,052
3	150	0,058
4	200	0,064
5	250	0,070
6	300	0,076
7	400	0,081
8	500	0,093

Коэффициент паропроницаемости щебня и песка из перлита вспученного в пределах $\mu = 0,26 \dots 0,34 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

Вспученный вермикулит – обожжённый (зернистый) теплоизоляционный материал, получаемый путём дробления и обжига гидратированной слюды – вермикулита.

Вермикулит обожжённый применяется в качестве сырья для теплоизоляционной засыпки в конструкции печей и оборудования с температурой изолируемой поверхности до $1100 \text{ }^\circ\text{C}$.

В зависимости от объёмного веса вермикулит обожжённый зернистый бывает двух марок – 125 и 150.

Предельная величина зерна, обожжённого вермикулита 12 мм, остаток на сите размером ячейки 5 мм – не менее 50 %. Содержание частиц размером менее 1 мм до 5 %.

Вермикулит обожжённый удовлетворяет следующим показателям (табл 7.11).

Таблица 7.11

Характеристики вермикулита

Показатели	Марка	
	125	150
Объёмная масса сухом состоянии, кг/м ³ , не более	125	150
Коэффициент теплопроводности в сухом состоянии, Вт/(м·°С), не более:		
при средней температуре 30 °С	0,07	0,075
100 °С	0,085	0,09
Влажность, %, не более	3	3
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,3	0,26

Аглопорит в виде пористого щебня, гравия или песка получают спеканием (агломерацией) сырьевой шихты из глинистых пород, топливных зол или шлаков с добавкой 8...10 % топлива (каменного угля) или топливосодержащих отходов. Высокая температура при сгорании угля, приводит к спеканию шихты, а образующиеся газы вспучивают массу, что способствует получению пористого материала. Полученный корж разламывают, охлаждают до температуры 80...120 °С, дробят и сортируют на щебень и песок. Средняя плотность аглопоритового щебня от 500 до 900 кг/м³, песка от 600 до 1100 кг/м³.

Коэффициент теплопроводности щебня в зависимости от плотности и условий эксплуатации лежит в пределах $\lambda = 0,14...0,30$ Вт/(м·°С), а коэффициент паропроницаемости $\mu = 0,21...0,24$ мг/(м·ч·Па).

Топливные шлаки – образуются в топках котлов при спекании и частичном вспучивании неорганических примесей, содержащихся в угле. Этот материал характеризуется значительной неоднородностью свойств, что ограничивает его применение. В качестве крупного заполнителя в засыпках могут использоваться шлаки с ограниченным содержанием частиц негоревшего топлива и других примесей.

Плотность шлаков котельных в пределах $\rho = 700...1000$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,186...0,29$ Вт/(м·°С), а коэффициент паропроницаемости $\mu = 0,21$ мг/(м·ч·Па).

7.6 Выводы

1. Для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий наиболее часто используются изделия из пенополистирола и минеральной ваты.

Кроме них на строительных объектах применяются изделия из пенополиуретана, пеностекла, полистиролбетона и других теплоизоляторов, а также засыпки из сыпучих материалов.

2. Исследования теплофизических характеристик пенополистирола, как отечественного производства, так и поставляемого в Республику Беларусь, выполнены на образцах, отбираемых на предприятиях и из наружной теплоизоляции стен зданий. Результаты исследований указывают на разброс величин коэффициента теплопроводности пенопласта в пределах $\lambda = 0,033 \dots 0,07$ Вт/(м·°С). Определение паропроницаемости плитных изделий из пенополистирола показало, что коэффициент для изделий различной плотности в среднем $\mu = 0,036$ мг/(м·ч·Па). И только для экструзионного пенопласта он равен $\mu = 0,02$ мг/(м·ч·Па). Экспериментальные результаты ниже коэффициентов паропроницаемости, приведенных в нормативных документах.

3. Исследования теплофизических характеристик каменной ваты показали, что коэффициент теплопроводности образцов в сухом состоянии изменяется в пределах $\lambda_0 = 0,037 \dots 0,044$ Вт/(м·°С), а в условиях эксплуатации $\lambda = 0,038 \dots 0,053$ Вт/(м·°С).

4. Массовая влажность образцов минераловатных плит дополнительной тепловой изоляции 20-ти этажного жилого здания, закреплённых на стене, не оштукатуренных и открытых для непосредственного воздействия атмосферных осадков не превышает $W = 4$ %.

Насыщенные водой на стене здания до 30-ти процентной влажности образцы минераловатных плит тепловой изоляции через сутки после увлажнения имели массовую влажность 0,61–0,93 %. Массовая влажность поступающих на строительную площадку изделий в заводской упаковке $W = 0,35–0,42$ %.

Каменная вата интенсивно поглощает, но и хорошо отдаёт влагу, находясь в естественных условиях контакта с окружающей средой.

Литература к главе 7

7.1. Хлевчук В.Р. Определение теплопроводности эффективной теплоизоляции в конструкциях с учётом влажности.//В.Р.Хлевчук и др. в сборнике докладов VI научно-практической конференции «Проблемы строительной теплофизики, системы обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях. – М. 2001.

7.2. Попова Ю.К. Состояние атмосферного воздуха и экология жилища в промышленном городе.// Ю.К. Попова в сборнике докладов VI научно-практической конференции «Проблемы строительной теплофизики, системы обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях – М. 1999. –С.89-91.

7.3. Стаховская Н.Э. Пенополистирол в качестве теплоизоляции// Н.Э. Стаховская. Мастерская. №7. 2007. – С.52-54.

7.4. Ананьев А.А. Долговечность и теплозащитные качества ограждающих конструкций, утеплённых пенополистиролом.// А.А. Ананьев, Т.И. Горячева, А.И. Ананьев. В сборнике докладов III научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительной теплофизики». – М. 2002.

7.5. Юрков О.И. Определение теплотехнических показаний теплоизоляционных материалов компании «Paroc Export OyAb»// О.И.Юрков, Г.С. Гарнашевич, В.И.Гирдюк. Научно-технический отчёт для подготовки проекта внесения изменений в СНБ 2.04.01-97 «Строительная теплотехника». – Минск. 1999.

7.6. Вялис С.А. Обследование влажности эковаты с нормальным тепловлажностным режимом.// С.А.Вялис, И.Я. Гнип, В.И. Кершулис./Строительные материалы. №7. 2001. – С.19-21.

ГЛАВА 8. ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

8.1 Общие положения

Эксплуатируемые здания подвергаются воздействию перемещающихся воздушных потоков. К ним относятся внешние воздушные потоки, внутренние потоки воздуха, перетекающие между помещениями и по каналам систем вентиляции, фильтрующийся через ограждение воздух и т.д. Общий процесс обмена воздуха между помещениями, наружным воздухом и помещениями составляет воздушный режим здания.

Движение воздуха в здании связано с наличием перепада давлений, вызываемого гравитационными силами, ветром, работой систем вентиляции.

При торможении потока воздуха на наветренном фасаде здания возникает избыточное по отношению к атмосферному давление. На заветренной стороне его, в зоне вихреобразования, давление оказывается ниже атмосферного. По закону сохранения энергии, давление внутри здания при одинаковой воздухопроницаемости ограждений будет равно среднему между повышенным с наветренной и пониженным с заветренной сторон.

Абсолютная величина избыточного ветрового давления равна

$$|\Delta P_v| = \frac{c_1 - c_2}{2} \cdot \frac{v_n^2}{2} \rho_n, \quad (8.1)$$

где c_1 и c_2 – аэродинамические коэффициенты соответственно с наветренной и заветренной сторон здания;

$v_n^2/2 \cdot \rho_n$ – динамическое давление набегающего на здание потока воздуха, Па.

Таким образом, ветровое давление P_v , в зависимости от направления ветра на поверхностях здания будет различным, что в расчётах учитывается **аэродинамическим коэффициентом «с»**, показывающим какую долю динамического давления ветра составляет статическое давление на наветренном, боковом и заветренном фа-

садах. Избыточное ветровое статическое давление на здание пропорционально динамическому давлению ветра.

При отсутствии ветра $t_b > t_n$, $v = 0$ на поверхности наружных стен будет действовать разной величины гравитационное давление. По закону сохранения энергии среднее давление по высоте внутри и снаружи здания одинаково. Относительно центральной плоскости в нижней части здания давление столба тёплого внутреннего воздуха будет меньше, чем давление столба холодного наружного воздуха с внешней поверхности стены.

Величины ΔP_t избыточного гравитационного давления на произвольном уровне « h » по отношению нейтральной плоскости стены равны

$$\Delta P_t = \pm hg \cdot \rho_n - \rho_b . \quad (8.2)$$

Совместное воздействие ветрового и гравитационного давлений способствует фильтрации наружного и внутреннего воздуха через неплотности и открытые проёмы ограждающих конструкций, влияя на воздушный режим здания.

Воздушный режим связан с тепловым режимом здания. Фильтрация наружного воздуха приводит к дополнительным затратам теплоты на его подогрев, а фильтрация влажного внутреннего воздуха увлажняет и снижает теплозащитные свойства ограждений. Положение и размеры зоны фильтрации в здании зависят от геометрии, конструктивных особенностей, режима вентилирования здания, а также района строительства, времени года и параметров климата.

Оценка влияния фильтрации воздуха через ограждающие конструкции зданий на их теплозащитные качества связана с определением характеристик воздухопроницаемости. основополагающие исследования по воздухопроницаемости строительных материалов в СССР проведены в ЦНИПСе в период после 1935 г. Их авторами были Р.Е. Брилинг и Б.Ф. Васильев. В работах указанных авторов представлены результаты исследований воздухопроницаемости большинства строительных материалов и конструкций, применяемых в строительстве. Исследования по изучению воздухопроницаемости строительных материалов и конструкций проводились и проводятся до и в настоящее время.

8.2 Воздухопроницаемость материалов

Строительные материалы имеют капиллярно-пористую или пористую структуры. Воздух в них перемещается с небольшими скоростями по порам и капиллярам.

При ламинарном движении в порах материала количество воздуха, проникающего через 1 м^2 слоя материала в течение 1 ч, рассчитывается по формуле Ланга

$$G = i \cdot \frac{\Delta p}{\delta}, \quad (8.3)$$

где G – масса воздуха, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
 i – коэффициент воздухопроницания материала, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$;
 Δp – разность давлений воздуха, Па;
 δ – толщина слоя материала, м.

При турбулентном движении воздуха в порах материала прямой зависимости между G и Δp нет. Для практических расчётов турбулентного режима формулу (8.3) можно использовать, но при этом принимать $\Delta p = \Delta p^n$. Значение показателя режима фильтрации « n » может быть в пределах от 0,5 до 1.

Коэффициент воздухопроницания материала показывает величину численно равную потоку воздуха в кг, проходящему сквозь 1 м^2 площади, перпендикулярной направлению потока, при градиенте давления равном $1 \text{ Па}/\text{м}$.

Размеры и структура пор и капилляров у различных материалов неодинакова, поэтому и воздухопроницаемость их различна. Например, для минеральной ваты $i \approx 0,05 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, для пенобетона – $i \approx 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, для тяжёлого бетона – $i \approx 5,1 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$. Кроме того, воздухопроницаемость зависит от ряда факторов, таких как влажность материалов и их температура.

Влияние температуры на воздухопроницаемость строительных материалов незначительно и связано с изменением вязкости воздуха и размеров пор и капилляров при её колебаниях. Влажность же материалов оказывает существенное влияние на его воздухопрони-

цаемость. При заполнении пор и капилляров материалов влагой их воздухопроницаемость практически равна нулю.

Зависимость между воздухопроницаемостью и объёмной влажностью материала в общем виде записывается как

$$V_w = c \frac{\Delta p^n}{\delta} (1 - W_0) , \quad (8.4)$$

где V_w – часовой расход воздуха через влажный материал, м³/ч;

W_0 – объёмная влажность материала в долях единицы;

c и n – коэффициенты, численные значения которых следует определять для каждого материала экспериментально.

Формула (8.4) справедлива при давлениях $\Delta P = 40 \dots 70$ Па.

Плотные материалы с очень мелкими порами, однородной структурой, без трещин практически не пропускают молекул воздуха при умеренной разности давлений. Поэтому для плотной керамики, пластифицированных растворов бетонов и других плотных материалов, не имеющих трещин и проницаемых сопряжений, коэффициент воздухопроницаения в пределах разности давлений до 5 Па, практически равен нулю. Такие же данные получают и при экспериментальных исследованиях влажных материалов, поры которых заполнены влагой, удерживаемой силами адгезии и капиллярного давления.

Информационные данные по сопротивлению воздухопроницанию различных материалов и конструкций приведены в СП 50.13330:2012. «Тепловая защита зданий», являющейся актуализированной редакцией СНиП 23-02-2003, Москва, 2012 г.

Среди строительных материалов особую группу составляют теплоизоляционные волокнистые минераловатные материалы. Их воздухопроницаемость определяется многими факторами, но важнейшим является влажность. Волокнистые материалы обладают гидрофобностью, зависящей от физических свойств исходных материалов и структуры изделий. Гидрофобность каменной ваты, основной составляющей которой служит базальт, формируется под действием электростатических сил, отталкивающих с поверхности волокон воду. Естественно, что чем больше площадь поверхности волокон,

тем выше водоотталкивающие свойств изделий при прочих равных условиях и выше воздухопроницаемость.

Если гидрофобность волокнистых материалов понижена, как у шлаковой ваты, то влияние влаги на их характеристики воздухопроницаемости будут иными.

Представленные в литературе данные по воздухопроводности минераловатных материалов малы и не конкретны.

В работах Франчука А.У. [8.1] для шлаковой ваты, без указания плотности, коэффициенты воздухопроницаемости даны в пределах $i = 0,27 \cdot 10^{-6} \dots 12 \cdot 10^{-6}$ кг/(м с Па).

Р.Е. Брилинг [8.2] представил коэффициенты воздухопроницаемости минеральной ваты для разности давлений $\Delta P = 10$ Па, но без указания плотности. Полученная им величина равна $i = 12 \cdot 10^{-6}$ кг/(м с Па).

Наиболее конкретные данные приведены в работе [8.3] для минеральной ваты плотности $\rho = 22 \dots 58$ кг/м³. Экспериментальные исследования были выполнены в соответствии с требованиями, определяемыми ISO 9053, когда воздушные потоки были направлены перпендикулярно и параллельно ориентации волокон. По результатам исследований построены зависимости коэффициентов воздухопроницаемости от плотности и от ориентации волокон относительно потока воздуха. Величины коэффициентов воздухопроницаемости приведены к размерности в соответствии с отечественной нормативной литературой (рис. 8.1).

Представленные результаты указывают на зависимость коэффициентов воздухопроницаемости, как от плотности минеральной ваты, так и от ориентации волокон относительно потока воздуха. При этом данные зависимости не являются линейными.

Веселовацкой Е.В. [8.4] были выполнены определения коэффициентов воздухопроницаемости минеральной ваты при разности давлений потока воздуха $\Delta P = 4 \dots 10$ Па. По их результатам сделан вывод, что для образцов плотностью $\rho = 70$ и 100 кг/м³ коэффициент воздухопроницаемости постоянен при $\Delta P > 4$ Па.

Обширные экспериментальные исследования воздухопроницаемости минераловатных изделий плотностью $\rho = 35 \dots 185$ кг/м³, изготовленных разными предприятиями, выполнены Садчиковым А.В. [8.5].

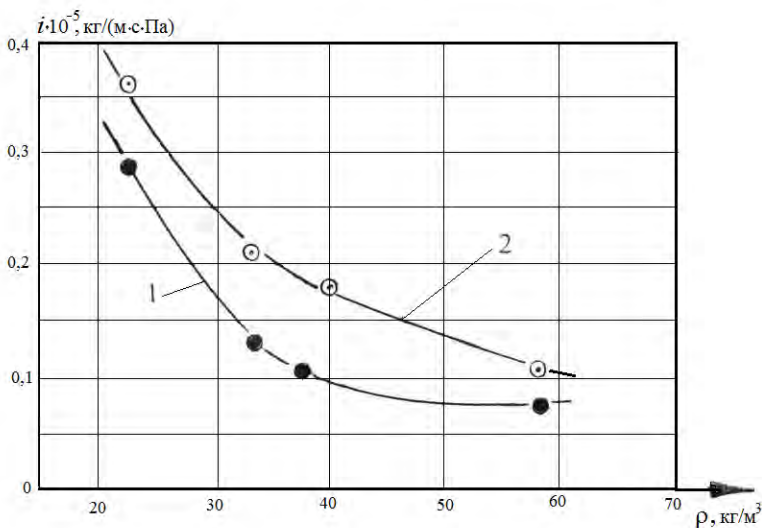


Рис. 8.1. Зависимость коэффициента воздухопроницаемости минеральной ваты от плотности:

- 1 – воздушный поток перпендикулярен ориентации волокон;
 2 – воздушный поток параллелен ориентации волокон

По результатам исследований определено, что показатель режима фильтрации воздуха « λ » имеет среднее значение 1,0014 и его с достаточной степенью точности следует принимать равным единице. Коэффициенты воздухопроницаемости минеральной ваты при направлении воздушного потока перпендикулярно плоскости образца и разности давлений $\Delta P = 10$ Па равны для $\rho = 35$ кг/м³ – $i = 0,529$ кг/(м·ч·Па), $\rho = 90$ кг/м³ – $i = 0,1495$ кг/(м·ч·Па), $\rho = 185$ кг/м³ – $i = 0,0463$ кг/(м·ч·Па).

Представленные ниже результаты исследований воздухопроницаемости минеральной ваты ограничены и не охватывают всю номенклатуру изделий широко применяемых в строительстве. Это указывает на необходимость дополнительных исследований воздухопроницаемости современных теплоизоляционных материалов из минеральной ваты.

8.3 Экспериментальные исследования воздухопроницаемости теплоизоляционных материалов

Характер воздухопроницаемости материалов определяется по кривым расхода воздуха, получаемым экспериментально в зависимости от перепада давлений. Для проведения исследований был создан экспериментальный стенд (рис. 8.2).

Стенд изготовлен в соответствии с рекомендациями ГОСТ 25891-83. Он позволяет проводить исследования на образцах размером по площади 1000×1000 мм и различной толщины. Основным элементом стенда – камера, с пятью жесткими металлическими стенками, соединенная с воздуходувкой. Для установки образцов по контуру камеры размещена рамка из металлического уголка 50×50 мм. По опорным полкам уголка уложена прокладка из резины для герметизации места соединения образца и камеры. Уплотнение места соединения образца с опорными полками выполняется деревянной рамкой с помощью прижимных винтов, укрепленных по контуру камеры.

Подача или удаление воздуха из камеры производится воздуходувкой с расходом до $70 \text{ м}^3/\text{ч}$. Регулирование расхода осуществляется воздушной заслонкой. Воздуходувка соединена с камерой через измерительный участок со встроенным расходомером.

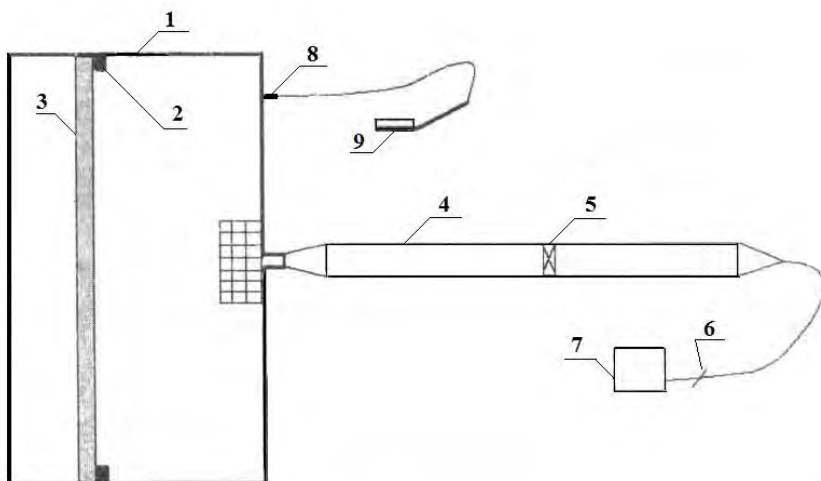
Измерение избыточного или пониженного давления в камере выполняется микроманометром ММН. Погрешность при измерении перепада давлений воздуха ± 1 %. Стенд укомплектован приборами для измерения давления и температуры.

Исследования образцов теплоизоляции проводились при подключении воздушного насоса сначала по схеме нагнетания, а затем по схеме разряжения.

Разность давлений по сторонам образца регулировалась воздушной заслонкой, начиная с $\Delta P = 10$ Па. Толщины образцов $\delta = 30, 50, 80, 100$ и 150 мм.

Учитывая отсутствие достаточного количества данных по воздухопроницаемости материалов из минеральной ваты и пенополистирола, были проведены исследования на образцах каменной ваты ОАО «Paroc», образцах минеральной ваты ОАО «Гомельстройматериалы» и полистирольного пенопласта ОАО «МАПИД».

а)



б)

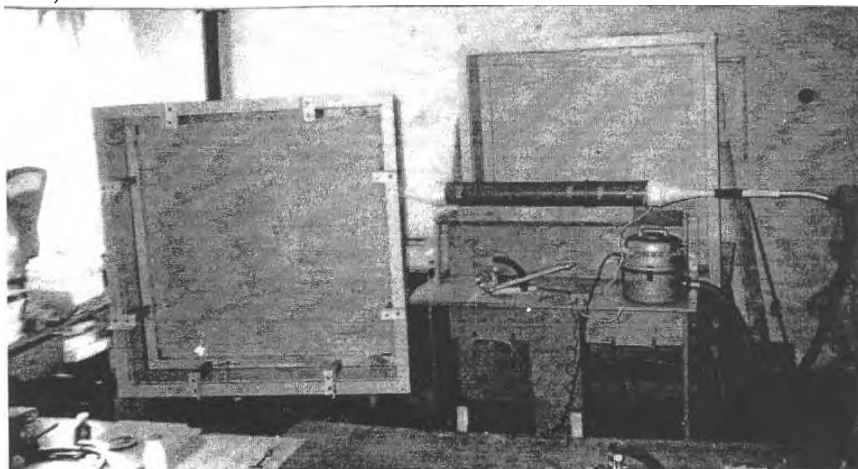


Рис. 8.2 Экспериментальный стенд:

а – принципиальная схема; б – общий вид;

1 – камера; 2 – рамка; 3 – образец; 4 – измерительный участок; 5 – расходомер;
6 – воздушная заслонка; 7 – воздуходувка; 8 – штуцер; 9 – микроманометр

Результаты определения воздухопроницаемости каменной ваты «Paroc IL» плотностью $\rho = 30 \text{ кг/м}^3$ показаны на рис. (8.3).

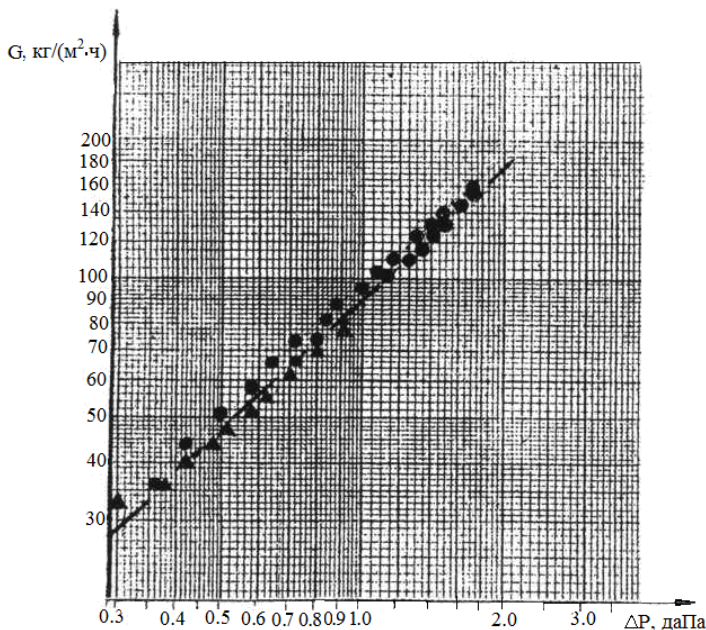


Рис. 8.3. Зависимость воздухопроницаемости плит от разности давлений для образцов 1000×1000 мм

Полученные экспериментальные данные на четырёх образцах имеют хорошую сходимость и описываются уравнением

$$G = 90 \cdot \Delta P^{0,96}, \quad (8.5)$$

где G – воздухопроницаемость образцов, кг/(м²·ч);
 ΔP – разность давлений, даПа.

На рис. 8.4 представлены результаты определения воздухопроницаемости изделий из каменной ваты «Paroc WAS 25t» плотностью $\rho = 90 \text{ кг/м}^3$ кашированных стеклохолстом.

При построении в логарифмических координатах зависимости $\lg G = f(\lg \Delta P)$ наблюдается её разделение на прямолинейные и криволинейные участки. Граница раздела $\Delta P = 1$ даПа.

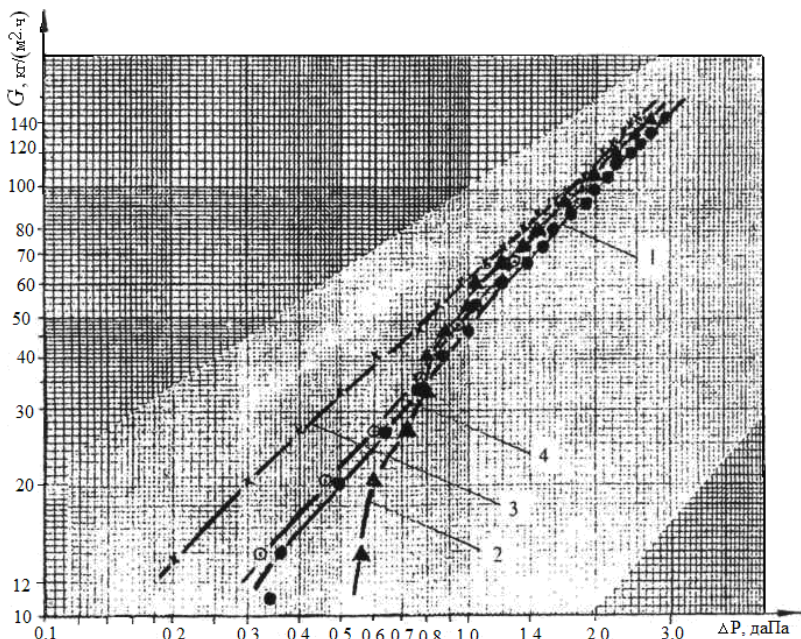


Рис. 8.4. Зависимость воздухопроницаемости плит «Paroc WAS 25t» $\rho = 90 \text{ кг/м}^3$ от разности давлений для образцов $1000 \times 1000 \times 30 \text{ мм}$:
 1 – кашированная стеклохолстом поверхность образца обращена к камере пониженного давления; 2, 3 – кашированная стеклохолстом поверхность образца обращена в помещение; 4 – образец без каширующего слоя

Характер кривых на рисунке указывает на возможность возникновения турбулентного движения воздуха в образцах минеральной ваты при малых значениях разности давлений, что присуще материалам, имеющим поры различного размера.

Результаты, полученные на образцах, обращённых каширующим слоем к камере пониженного давления и на образцах, со снятым каширующим слоем, при разности давлений $\Delta P < 1,0 \text{ даПа}$ имеют значительный разброс, что указывает на влияние каширующего слоя на результаты испытаний.

Кроме того, анализ полученных экспериментальных результатов подтверждает влияние каширующего слоя, воспринимающего нагнетаемый (3) или отсасываемый (2) поток на характер движения воздуха в толще каменной ваты.

На рис. 8.5 представлены зависимости воздухопроницаемости образцов плит из минеральной ваты «Paroc IL» – кривая 1, «Paroc - WAS 25t» – кривые 2, 3 и теплоизоляционного слоя, из плит «Paroc IL» и «Paroc - WAS 25t» – кривые 4 и 5.

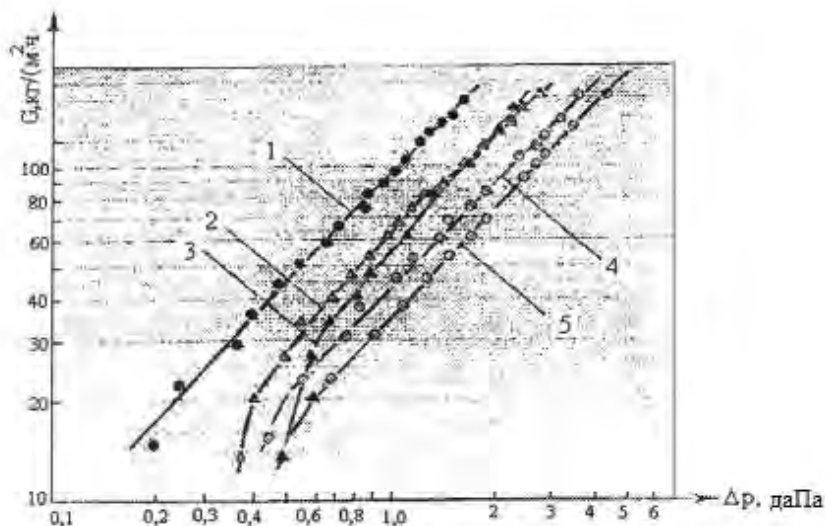


Рис. 8.5. Зависимость воздухопроницаемости минераловатных теплоизоляционных плит от разности давлений:

1 – «Paroc IL» $\rho = 30 \text{ кг/м}^3$, $\delta = 100 \text{ мм}$;

2,3 – «Paroc - WAS 25t» $\rho = 90 \text{ кг/м}^3$, $\delta = 30 \text{ мм}$;

4,5 – «Paroc IL» $\rho = 30 \text{ кг/м}^3$, $\delta = 100 \text{ мм}$ + «Paroc - WAS 25t» $\rho = 90 \text{ кг/м}^3$, $\delta = 30 \text{ мм}$

При разности давлений $\Delta P \leq 0,8-0,9 \text{ даПа}$ линии 2, 3 для плит «Paroc - WAS 25t» имеют излом, что говорит об изменении характера движения воздуха с повышением разности давлений. Эти данные согласуются с результатами, представленными на рис. 8.4.

Сопоставление результатов, представленных на рис. 8.5, показывает, что воздухопроницаемость двухслойной теплоизоляции (кривые 4 и 5) значительно меньше воздухопроницаемости составляющих её слоёв (кривые 1, 2 и 3).

Для сравнения воздухопроницаемости теплоизоляционного слоя, составленного из двух плит «Paroc IL» + «Paroc - WAS 25t», выполнено определение воздухопроницаемости для двухслойной тепло-

изоляции, состоящей из лёгкого утеплителя «Paroc IL» $\rho = 30 \text{ кг/м}^3$ и жёсткого плитного утеплителя «Fasrock» $\rho \approx 130 \text{ кг/м}^3$.

Результаты исследований показали, что воздухопроницаемость двухслойной теплоизоляции «Paroc IL» + «Paroc – WAS 25t» равна $G = 60 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$ при $\Delta P = 1,0 \text{ даПа}$, что выше чем для композиции утеплителя «Paroc+Fasrock» $G = 40 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$ при той же разности давлений. Размещение плотного слоя каменной ваты снижает воздухопроницаемость двухслойной теплоизоляции.

В табл. 8.1 сведены результаты определения воздухопроницания изделий из каменной ваты.

Таблица 8.1

Показатели воздухопроницания каменной ваты

№ п/п	Изделия из минеральной ваты	Плотность ρ , кг/м^3	Толщина δ , мм	ΔP , Па	G , $\text{кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ даПа	R_i , $\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ даПа/кг	i , $\text{кг/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па)}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Paroc IL	30	100	10	90	0,011	0,00250
2	Paroc – WAS 25t	90	30	10	55	0,018	0,000045
3	Paroc IL+ Paroc – WAS 25t		130	10	38	0,026	0,000130
4	Paroc IL+ FAS-4		123	10	35	0,028	0,000120

Представленные в табл.8.1 величины воздухопроницания, коэффициенты воздухопроницания и величины сопротивления воздухопроницанию определены при разности давлений $\Delta P = 10 \text{ Па}$.

Сопоставление результатов показывает, что сопротивление воздухопроницанию однослойных изделий из минеральной ваты зависит от плотности и структуры материала и лежит в пределах $R_i = 0,011 \dots 0,018 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{даПа/кг}$. Воздухопроницаемость изделий «Paroc – WAS 25t», кашированных стеклохолстом и имеющих плотность $\rho = 90 \text{ кг/м}^3$, равна $i = 0,000045 \text{ кг/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па)}$, а сопротивление воздухопроницанию $R_i = 0,018 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{даПа/кг}$.

Величины сопротивления воздухопроницанию двухслойной теплоизоляции различного сочетания изделий лежат в пределах $R_i = 0,026 \dots 0,028 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{даПа/кг}$.

Экспериментальные исследования воздухопроницаемости минераловатных изделий ОАО «Гомельстройматериалы» выполнены на образцах размером $1000 \times 1000 \times 60$ мм и плотностью от 70 до 170 кг/м^3 .

Результаты определения воздухопроницаемости образцов из минеральной ваты марки 75 и плотностью $\rho = 69 \text{ кг/м}^3$ представлены на рис. 8.6.

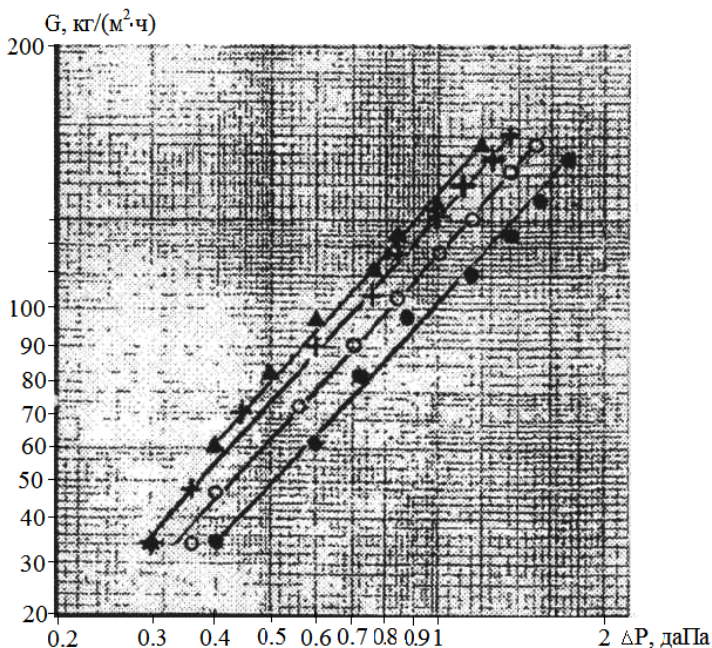


Рис. 8.6. Зависимость воздухопроницаемости минеральной ваты ОАО «Гомельстройматериалы» $\rho = 69 \text{ кг/м}^3$ в зависимости от разности давлений

Экспериментальные данные получены при подключении воздухоудовки по схемам нагнетания и разряжения. Величины воздухопроницаемости имеют большой разброс при фиксированном значении разности давлений для образцов одной партии минеральной ваты. Связано это с неравномерной, как по толщине, так и по площади образцов, структурой материала.

Результаты определения воздухопроницаемости образцов минеральной ваты марки 175 показаны на рисунке 8.7. Образцы действительной плотности $\rho = 170 \text{ кг/м}^3$ имеют расхождение по величинам воздухопроницаемости при равных величинах разности давлений ΔP .

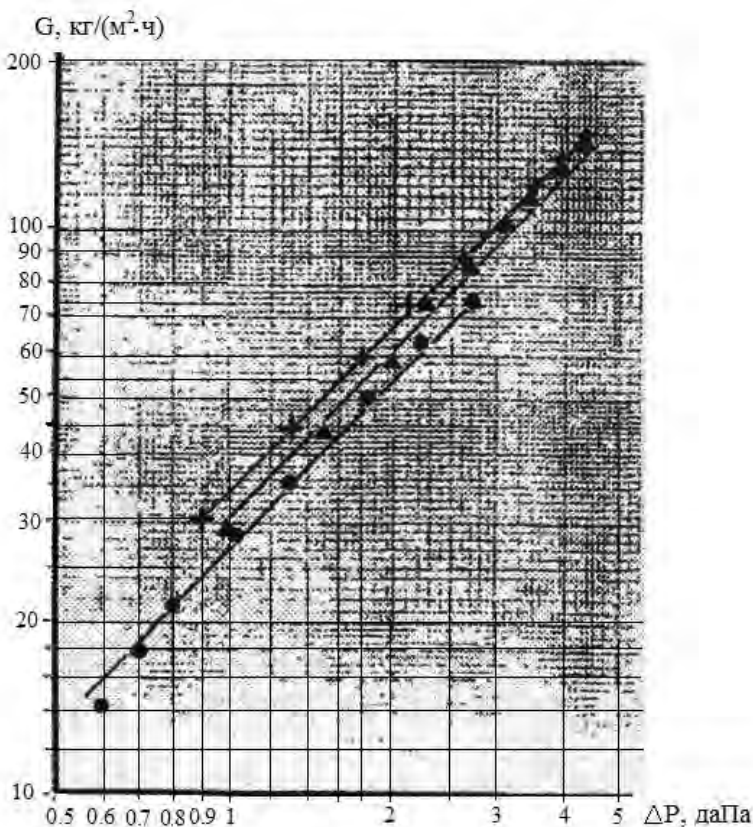


Рис. 8.7. Зависимость воздухопроницаемости минеральной ваты ОАО «Гомельстройматериалы» $\rho = 170 \text{ кг/м}^3$ в зависимости от разности давлений

Одновременно выполнена экспериментальная оценка сопротивления воздухопроницаемости образцов теплоизоляции, составленных из минераловатных изделий разной плотности и назначения.

Результаты экспериментальных исследований величин сопротивлений и коэффициентов воздухопроницаемости образцов минераловатных изделий сведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Характеристики воздухопроницаемости минераловатных изделий

Минеральная вата	Плотность ρ , кг/м ³	Толщина δ , мм	R_i м ² ·ч·даПа/кг	\bar{j}_i кг/(м·с·Па)
Parock IL	0,1	30	0,011	0,00025
Paroc – WAS 25t	0,03	90	0,018	0,000046
Ventirock $\delta = 80$ мм	0,08	102	0,031	0,000071
Ventirock $\delta = 50$ мм	0,05	103	0,030	0,000045
Fasrock	0,023	135	0,021	0,000031
ОАО «Гомельстройматериалы»-1	0,059	69	0,011	0,00015
ОАО «Гомельстройматериалы»-2	0,060	120	0,023	0,000071
ОАО «Гомельстройматериалы»-3	0,061	166	0,030	0,000056
ОАО «Гомельстройматериалы»-4	0,065	170	0,033	0,000055
Parock IL+ Paroc – WAS 25t	0,130	—	0,030	0,00014
Parock IL+ Fasrock	0,123	—	0,030	0,00012
Г1+ Paroc – WAS 25t	0,089	—	0,025	0,000102
Г2+ Paroc – WAS 25t	0,090	—	0,036	0,000069
Г3+ Paroc – WAS 25t	0,091	—	0,045	0,000056
Г4+ Paroc – WAS 25t	0,095	—	0,051	0,000051

Погрешность определения по разбросу точек характеристик воздухопроницаемости изделий из каменной ваты равна $\xi = 11,6 \%$ [8.6], а изделий ОАО «Гомельстройматериалы» $\xi = 25 \%$ [8.7].

8.4 Воздухопроницаемость ограждающих конструкций

Воздухопроницаемость многослойных ограждающих конструкций не всегда соответствует воздухопроницаемости составляющих их материалов. Неоднородные конструкции, имеющие сплошные участки, стыковые соединения, щели, мелкие отверстия и поры, пропускают через себя фильтрующийся воздух. Проникновение воздуха снаружи внутрь помещений называется инфильтрацией, а из помещения наружу – эксфильтрацией.

Кроме *поперечной фильтрации*, при которой воздух проходит через ограждение в направлении перпендикулярном поверхности ограждения, существует ещё два вида фильтрации – *продольная и внутренняя*.

Продольная фильтрация возникает при недостаточной защите наружной поверхности от поступления воздуха внутрь ограждений. В нижней части стены холодный воздух проникает в стену, а в верхней части уходит из неё. Продольная фильтрация может возникнуть и при отсутствии ветра под влиянием теплового напора. При продольной фильтрации холодный наружный воздух, проникающий через поверхность в толщу ограждения вызывает дополнительные потери теплоты и охлаждение помещений.

В ограждающих конструкциях, выполненных из воздухопроницаемых материалов или имеющих проницаемые для воздуха швы кладки, даже при защите наружной и внутренней поверхностей, может возникнуть внутренняя фильтрация. В толще конструкций под влиянием разности температур возникают конвективные токи воздуха, аналогичные конвективным токам в воздушных прослойках. При применении крупнопористых воздухопроницаемых материалов или засыпок влияние внутренней фильтрации на теплозащитные свойства ограждения приводит к повышению коэффициента теплопередачи на 5...10 %.

Поступление воздуха внутрь ограждений и его фильтрация увеличивает перенос теплоты через стены. Возникающий конвективный теплообмен присутствует как в материалах слоёв, так и в воз-

душных зазорах между слоями, оказывая влияние на температурное поле ограждений. Перестройка температурного поля наружной стены при инфильтрации холодного воздуха через неё представлена на рис. 8.8. Холодный воздух изменяет линейное распределение температуры по сечению стены на криволинейное с понижением температуры во всех точках.

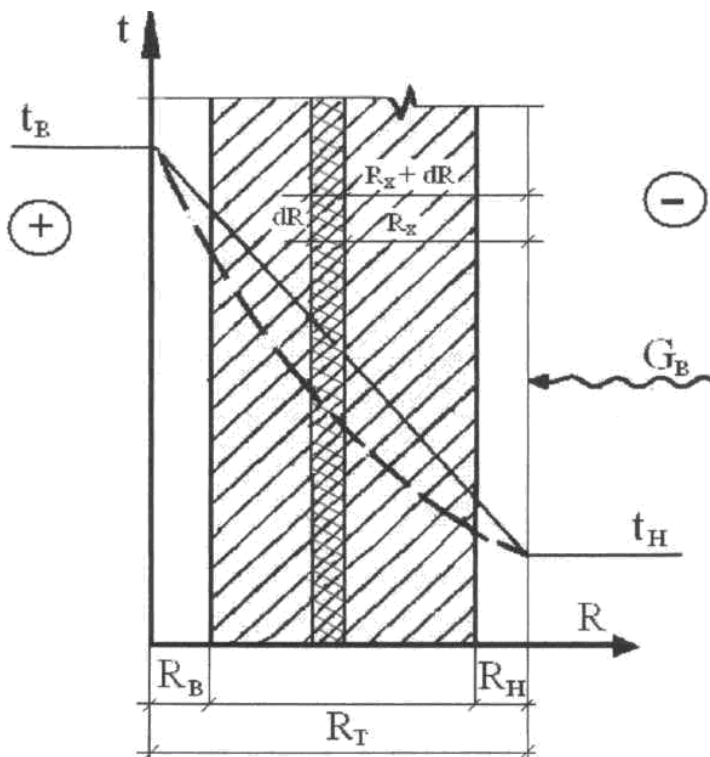


Рис. 8.8. Схема перестройки температурного поля стены при инфильтрации воздуха

Дифференциальное уравнение стационарного температурного поля плоского ограждения при фильтрации воздуха записывается как

$$\lambda \frac{d^2 t}{dx^2} - Gc \frac{dt}{dx} = 0, \quad (8.6)$$

где G – масса воздуха, проходящего через ограждение, кг/(м²·ч);
 c – удельная теплоёмкость воздуха, кДж/(кг·°С);
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С).

Решение уравнения (8.6) получено Ф.В. Ушковым в виде [8.8]

$$t_x = t_n + t_b - t_n \frac{e^{cGR_x} - 1}{e^{cGR_T} - 1}, \quad (8.7)$$

где t_x – температура в любой плоскости ограждения при инфильтрации воздуха, °С;

t_b и t_n – температуры внутреннего и наружного воздуха, °С;

R_x – термическое сопротивление ограждения на участке от наружного воздуха до рассматриваемой плоскости при отсутствии инфильтрации воздуха, м²·°С/Вт;

R_T – сопротивление теплопередаче всего ограждения при отсутствии инфильтрации воздуха, м²·°С/Вт.

Коэффициент теплопередачи ограждения с учётом инфильтрации воздуха рассчитывается по формуле

$$k = \frac{cGe^{cGR_T}}{cGe^{cGR_b} - 1}. \quad (8.8)$$

При определении воздухопроницаемости многослойных конструкций использование коэффициентов воздухопроницаемости материалов их составляющих не всегда позволяет получить физически обоснованные результаты. Поэтому в расчётах ограждающих конструкций оценка на воздухопроницаемость слоёв делается по величинам их сопротивлению воздухопроницанию. Для ограждений, состоящих из нескольких слоёв материалов, не имеющих щелей или стыков, сопротивление воздухопроницанию определяется как

$$R_B = \frac{\delta_1}{l_1} + \frac{\delta_2}{l_2} + \dots + \frac{\delta_n}{l_n}, \quad (8.9)$$

где l – коэффициент воздухопроницаемости, кг/(м·ч·Па).

Характеристики воздухопроницаемости ограждений в основном определяют экспериментально. Натурные и стендовые исследования позволили разработать методику оценки сопротивления воздухопроницанию, которая вошла в нормативную литературу [8.12].

8.5 Воздухопроницаемость плёнок и мембран

В ограждающих конструкциях зданий применяются различного назначения плёнки и мембраны, обладающие определёнными свойствами. Они используются в качестве материалов ветрозащитных, пароизоляционных слоёв, паро- и гидроизоляционных материалов, паропроницаемых мембран и т.д. Плёнки и мембраны изготавливаются из полиэтилена и полипропилена отечественными и зарубежными предприятиями. Одно из основных назначений плёнок и мембран, используемых в ограждающих конструкциях, предотвращение фильтрации воздуха и сохранение их теплозащитных свойств. Воздухопроницаемость конструкций оценивается сопротивлением воздухопроницанию, которое может быть определено при фильтрации по формуле (8.9).

Выполнение расчётов осложняется отсутствием данных по величинам сопротивления воздухопроницанию современных, наиболее часто используемых в практике, плёнок и мембран. В данном параграфе представлены результаты экспериментальных исследований воздухопроницаемости ряда плёнок и мембран фирмы «Юта».

Исследования проводились на экспериментальной установке, описанной в параграфе 8.2. Методика исследований составлена на основании рекомендаций ГОСТ 25891-83. Отличие заключается в креплении образцов плёнок на раму из деревянных брусков и уплотнении с помощью прижимных устройств и мастики мест контакта образца с камерой для обеспечения герметичности.

Эксперименты были выполнены на образцах специальной диффузионной плёнки «Ютафол Д110 Стандарт», супердиффузионной мембраны и других материалах.

Исследования воздухопроницаемости плёнок проводились при разностях давлений воздуха в пределах от 20 до 200 даПа. Полученные результаты показывают, что плёнки при разности давлений до 40-50 даПа практически непроницаемы для воздуха. В качестве примера на рис. 8.10 представлена графическая зависимость воздухопроницаемости плёнки «Ютафол Д100 Стандарт» от разности давлений воздуха построенная в логарифмических координатах.

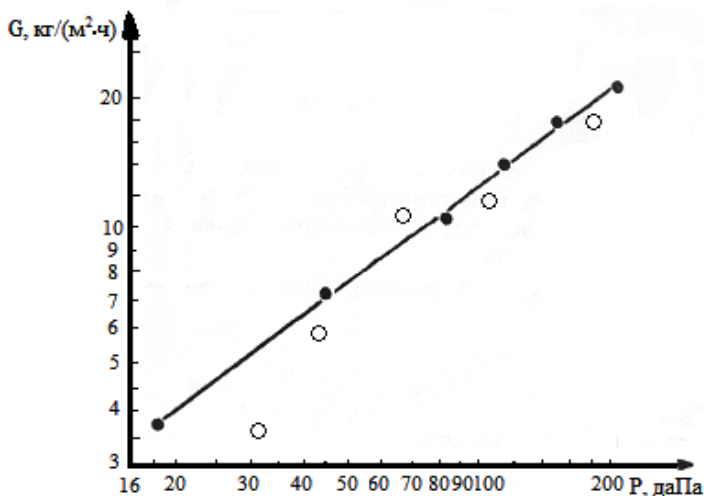


Рис. 8.9. Зависимость воздухопроницаемости плёнки «Ютафол Д100 Стандарт» от разности давлений

На графике видно, что перенос воздуха через плёнку происходил только при разности давлений больше 20 даПа (200 Па). Для остальных плёнок перенос воздуха был зафиксирован при разности давлений больше 70 даПа (700 Па).

Мембрана «Ютавек 135» вообще непроницаема для воздуха.

Результаты экспериментальных исследований воздухопроницаемости плёнок сведены в табл. 8.3. Здесь же представлены данные по воздухопроницаемости плёнок и мембран, изготавливаемых различными предприятиями и фирмами, и используемые в строительстве.

Плёнка «Ютафол Д100 Стандарт» состоит из трёх слоёв: основного слоя, арматурной сетки из полиэтиленовых полосок, и двух

внешних, изготовленных из полиэтиленовой плёнки. Арматурная сетка придаёт прочность материалу, двухстороннее ламинирование обеспечивает гидроизоляционные свойства, а микроперфорация плёнок создаёт условия для проникания влаги.

Таблица 8.3

Характеристики воздухопроницаемости плёнок и мембран

№ п/п	Наименование плёнки	ΔP , даПа	G , кг/(м ² ·ч)	\bar{i} , кг/(м·с·Па)	R , м ² ·ч·даПа/кг
1	Ютафол Д100 Стандарт	85	11,14	0,13	7,69
2	Ютавек 135	80	0	0	непроницаема
3	Ютакон 130 ВСУВ	70...170	3,71...7,4	0,05	20
4	Ютафол Н110 Стандарт	85...160	3,73...7,37	0,034	29,1
5	Ютафол НАЛ 170 Специальный	70	3,7	0,052	19,2
6	Тайвек	> 20	—	—	1,0...1,05
7	Изоспан А	80	0	0	непроницаема
8	СпанБел	>20	—	—	0,0020

Для каждого типа плёнки физические характеристики индивидуальны и определяются экспериментально. Плёнка «Ютафол Д100 Стандарт» предназначена для проветриваемых наклонных крыш и стеновых вентилируемых конструкций в качестве ветрозащиты.

Супердиффузионная мембрана «Ютавек 135» применяется как ветрозащитная паропроницаемая плёнка для вентилируемых конструкций. Мембрана представляет четырёхслойный полипропиленовый материал, каждый слой которого имеет определённые свойства. Внешние слои обеспечивают прочность и ультрафиолетовую стабильность, а внутренние – супердиффузионную проницаемость для пара.

Паропроницаемая плёнка «Ютафол Н110 Стандарт» используется при защите ограждающих конструкций от проникновения водяного пара из помещений внутрь их. Плёнки представляют собой трёхслойный материал из полиэтилена. Внутренний слой — своеобразная армирующая решётка, сплетённая из полиэтиленовых волокон. Наружные слои – полиэтиленовая плёнка, определяющая паропроницаемость материала.

Антиконденсатная плёнка «Ютакон 130 ВСУВ» используется для защиты ограждающих конструкций от увлажнения атмосферной влагой. Она представляет ультрафиолетоустойчивую ткань, ламинированную с обеих сторон полипропиленовой плёнкой, к одной стороне которой подсоединён влагопоглощающий нетканый материал. Верхнее и нижнее ламинирование обеспечивает гидроизоляционные свойства и паропроницаемость данной плёнки. Ткань обеспечивает высокую прочность, а влагопоглощающий нетканый материал, присоединённый к нижней поверхности плёнки, сорбирует водяной пар, образующийся во внутреннем пространстве объекта. После того, как условия конденсации исчезают, нетканый материал быстро высыхает в воздушном потоке.

Ветрозащитная мембрана «Tyvek Housewrap» изготовлена из нетканого полиэтилена низкого давления и имеет высокую плотность и паропроницаемость. Производитель мембран компания Du Pont, указывает на воздухопроницаемость изделий со ссылкой на результаты испытания в соответствии с DIN 53120. В то же время экспериментально определенное сопротивление воздухопроницаемости этих же мембран составляет $10 \dots 10,5 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$ [8.5] при перепаде давлений $\Delta P \geq 20 \text{ Па}$, что противоречит данным компании DuPont [8.10]. Причину несоответствия характеристик сопротивления воздухопроницаемости следует искать в качестве изготовления мембран на различных производствах и особенностях проведения исследований.

Ветрозащитная паропроницаемая мембрана «СпанБел А», из нетканого полипропиленового полотна, применяется для защиты теплоизоляции в ограждающих конструкциях от воздушных потоков, способствуя удалению из неё влаги. Устанавливается с внешней стороны теплоизоляции под защитной облицовкой, размещаемой для создания воздушной прослойки на отnose.

«Изоспан А» – паропроницаемая, воздухозащитная мембрана используется для защиты теплоизоляции от атмосферных воздействий в конструкциях вентилируемых фасадов и теплоизолированной кровли (рис. 8.10).

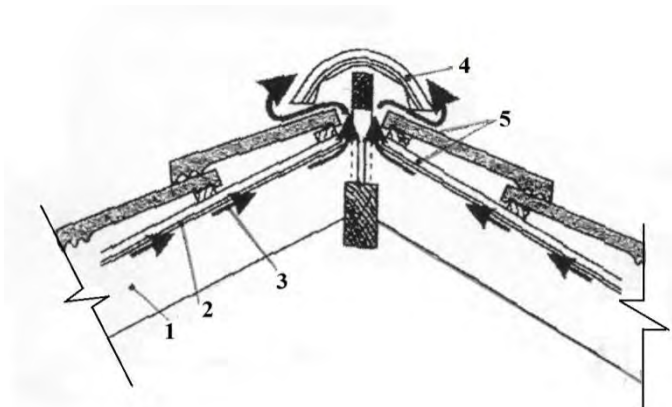


Рис. 8.10. Организация вентиляции покрытия чердака при использовании антиконденсатной плёнки «Ютакон Н 130 ВС УВ»:
1 – стропило; 2 – антиконденсатная плёнка;
3 – удаляемый воздух; 4 – конёк крыши; 5 – обрешётка

Примером использования плёнок и мембран в ограждающих конструкциях зданий может служить организация вентиляции покрытия с применением антиконденсатной плёнки «Ютакон Н130 ВСУВ» в реконструируемых православных храмах [8.11].

Так как антиконденсатная плёнка практически паро- и воздухо- непроницаема её размещают на нижней поверхности крыши, защищая её от влаги. Поступление наружного воздуха на чердак организуют так, чтобы он омывал нижнюю поверхность плёнки и удалялся вместе с влагой через щели у конька скатной крыши.

8.6 Выводы

1. Ветровое и гравитационное давления вызывают фильтрацию воздуха через ограждающие конструкции. Это приводит к поступ-

лению наружного холодного воздуха в помещения, увлажнению и снижению теплозащитных свойств ограждений.

2. Особую группу строительных материалов составляют теплоизоляционные минераловатные изделия. Их воздухопроницаемость оказывает влияние на возникновение конвективных потоков холодного воздуха внутри конструкций, на их тепловлажностный режим.

3. Проведены исследования воздухопроницаемости каменной ваты ОАО «Парок», минеральной ваты ОАО «Гомельстройматериалы». Результаты исследований указывают на наличие ламинарного и турбулентного режимов движения воздуха при $\Delta P \leq 0,8 \dots 0,9$ даПа. Величины сопротивления воздухопроницанию различных минераловатных изделий лежат в пределах $R_i = 0,011 \dots 0,051$ м²·ч·даПа/кг и зависят от плотности материалов и толщины образцов.

4. Исследования воздухопроницаемости диффузионной плёнки «Ютафол Д110 Стандарт», мембраны «Ютавек 135» и других материалов проводились при $\Delta P = 20 \dots 200$ даПа. Плёнки при разности давлений до 40...50 даПа практически непроницаемы для воздуха. Перенос воздуха был зафиксирован при разности давлений выше 60...70 даПа.

Мембрана «Ютавек 135» непроницаема для воздуха.

Литература к главе 8

8.1. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов/ А.У. Франчук//М.:Стройиздат.-1969.-138 с.

8.2. Брилинг Р.Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов/Р.Е. Брилинг//М.: Стройиздат, 1948.

8.3. Блюджус Р. Воздействие передвижения воздуха на теплопередачу конструкции с теплоизоляцией из минераловатных плит/Р.Блюджус, Р.Самаяускас. В сб. докладов VI научно-практической конференции «Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях» // М.:2001.–С.183-187.

8.4. Веселовацкая Е.В. Особенности теплопередачи через воздухопроницаемую теплоизоляцию трёхслойных ограждающих конструкций/Е.В. Веселовацкая – Автореферат канд. дисс.//М. 1985.

8.5. Садчиков А.В. Влияние продольной фильтрации воздуха в утеплителе на теплозащитные свойства стен с навесными вентилируемыми фасадами/А.В.Садчиков. – Автореферат канд. дисс./М.: НИИСФ, 2007.

8.6. Исследование ветрозащитных характеристик теплоизоляционных материалов ЗАО "Рагок" $\rho \leq 90 \text{ кг/м}^3$ и возможности использования их в ограждающих конструкциях зданий с вентилируемыми воздушными прослойками: Отчет по НИР (заключ). Белорусский национальный технический университет (БНТУ)/рук.темы А.М.Протасевич//Минск, 2003.–140 с. № г.р.2003138.

8.7. Исследовать процесс формирования температурно-влажностного режима наружных стен с вентилируемой системой утепления с учётом влияния конструктивных и климатических факторов: Отчёт по НИР. БНТУ/рук.темы А.М.Протасевич. – Минск, 2006. 99 с.– № г.р.20014160.

8.8. Ушков Ф.В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха./Ф.В. Ушков. – М.: Стройиздат. – 1969.

8.9. СТБ 939-9. Окна и балконные двери для зданий и сооружений. Общие технические условия./Минск.–1994.– 36 с.

8.10. Спицин А.Б. Критерий выбора ветрозащитной мембраны для вентилируемых фасадов./ А.Б.Спицин. Строительные материалы. №7. 2007.

8.11. Борухова Л.В. Обеспечение параметров микроклимата в реконструируемых православных храмах/Л.В.Борухова, А.М.Протасевич, Е.П.Тумашик. – Строительная наука и техника. №3. 2011.

8.12. ТКП 45-2.04-43-2006. Строительная телотехника. Строительные нормы проектирования. – Минск. 2007.

ГЛАВА 9. Повышение теплозащитных качеств ограждающих конструкций путём их дополнительной теплоизоляции

9.1 Общие положения

Повышение уровня теплозащиты наружных стен существующих зданий при их ремонте, реконструкции и модернизации, а также строящихся зданий, осуществляется с использованием эффективных теплоизоляционных материалов путём устройства дополнительной теплоизоляции.

В практике устройства дополнительной теплозащиты стен существует два основных способа ее расположения: с наружной или внутренней сторон стены. Иногда встречается конструктивно-технологическое решение устройства теплозащиты зданий с расположением утеплителя с наружной и внутренней стороны стены одновременно. Данный способ можно назвать комбинированным.

При выборе способа утепления ограждений предпочтение следует отдать наружной теплоизоляции, которая защищает ограждение от переменного замерзания и оттаивания и других атмосферных воздействий, выравнивает температурные колебания основного массива, сдвигает точку росы к их внешней поверхности, улучшает архитектурный облик зданий. Преимуществом наружной теплоизоляции является также увеличение теплоаккумулирующей способности массивной части ограждений. Существенным недостатком этого способа является необходимость устройства по теплоизоляции надежной защиты от атмосферных воздействий.

При размещении теплоизоляции с внутренней стороны ограждений возможно нарушение их влажностного режима вследствие приближения зоны конденсации водяного пара, диффундирующего через конструкцию, к внутренней поверхности и, как следствие, к их увлажнению. Ограждения с теплоизоляцией на внутренней поверхности эксплуатируются надежно в том случае, когда на теплой стороне слоя утеплителя уложен качественный паронепроницаемый материал, препятствующий проникновению пара внутрь его и образованию конденсата в этом слое.

Для выполнения наружной теплоизоляции стен используются как «мокрые», так и «сухие» технологии утепления. Наиболее распространены «мокрые» способы теплозащиты с укрытием утепли-

теля легким (тонким) и тяжелым штукатурными слоями и навесные системы с вентилируемой воздушной прослойкой.

В Республике Беларусь, Германии и в других странах наряду с традиционными системами теплоизоляции наружных стен используется утепление с применением ячеистобетонных изделий.

Лёгкие штукатурные системы теплоизоляции стен с утеплителем из пенополистирольных плит или минераловатных плит впервые появились в семидесятые годы 20-го столетия и с тех пор используются в строительстве. В РБ широкое распространение они получили в период с 1990-2000 г.г.

Вентфасады в Республике Беларусь начали применять для облицовки и тепловой изоляции стен зданий сравнительно недавно. В тоже время, в ряде стран, например, в Германии, Финляндии, Польше накоплен достаточно большой опыт по их применению. Едва появившись, вентфасады сразу завоевали популярность, как у архитекторов, так и строителей. Разработано большое количество конструктивно-технологических решений вентфасадов. Вентилируемым системам утепления отдаётся предпочтение при тепловой защите зданий с повышенной влажностью помещений, а также общественных и градообразующих зданий, что объясняется, высокими декоративными качествами облицовок.

Основной характеристикой систем дополнительной теплоизоляции является долговечность, определяемая сроком их службы без ухудшения эксплуатационных качеств по показателям морозостойкости, влагостойкости и прочности. Оценивается долговечность, в основном, по результатам отслеживания состояния систем теплоизоляции эксплуатируемых зданий. Также могут быть использованы расчётные методики или результаты экспериментальных исследований образцов материалов и систем утепления.

К характеристикам, по которым оценивается эксплуатационный ресурс теплоизоляции относятся: плотность и теплопроводность материалов, их усадочные и упругостные показатели, влаго- и паропроницаемость. Выбор контролируемых характеристик определяется их функциональной значимостью и возможностью контроля.

В ограждающих конструкциях зданий с наружной дополнительной теплоизоляцией процессы переноса теплоты и массы имеют определённые особенности. Поэтому оценку теплофизических ка-

чества конструкций и материалов следует выполнять на основании анализа их теплового, влажностного и воздушного режимов.

9.2 Лёгкая штукатурная система теплоизоляции

Легкие штукатурные системы утепления (ЛШС) предназначены для устройства наружной тепловой изоляции, вертикальных стен новых и эксплуатируемых зданий и сооружений различного назначения.

В легких штукатурных системах слой эффективного теплоизоляционного материала (пенополистирольные, пенополиуретановые или минераловатные плиты) крепится к основной стене на клею и дополнительно дюбелями. Клей наносится на поверхность теплоизоляционных плит точно, полосами или комбинированно. Но в любом случае между поверхностью стены и плитой образуется воздушная прослойка толщиной 3-8 мм. Для увеличения стойкости и долговечности теплоизоляционный слой защищается клеевым составом, армированным щелочестойкой стеклосеткой и укрывается декоративной штукатуркой на полимерной основе (рис. 9.1). Механическое крепление теплоизоляции более надёжно и зависит от прочностных свойств несущей части стены и элементов крепления. При креплении теплоизоляции с помощью дюбелей, нагрузка от неё и от отделочного слоя передаётся на несущую часть стены.

Общая толщина декоративно-защитного и армированного слоёв ЛШС теплоизоляции составляет от 8 до 12 мм. В состав клея и защитного слоя входят полимерные компоненты, которые влияют на воздухо- и влагопроводимость штукатурного слоя.

Каждый слой в системе утепления выполняет свои функции, имеет различные характеристики теплопроводности, паропроницаемости, водопоглощения, морозостойкости, термического расширения и т.д. По теплотехническим характеристикам отличаются и утеплители - изделия из каменной ваты и полистирола. В эксплуатационных условиях именно различие в тепло- и массообменных характеристиках материалов определяет распределение влаги по сечению наружных стен.

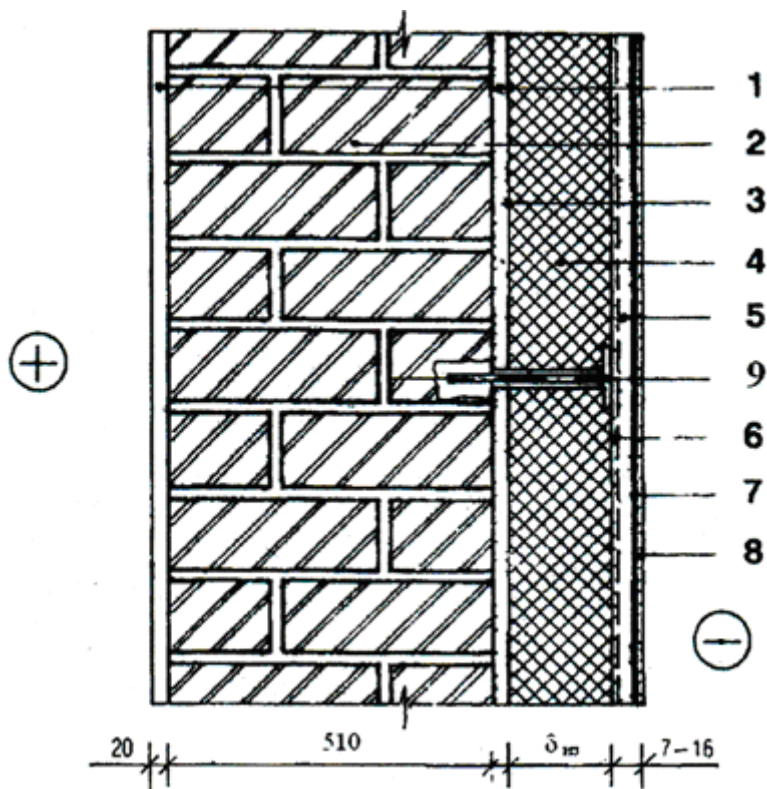


Рис. 9.1. Схема утепления наружной стены с тонким штукатурным слоем:
 1 – штукатурка; 2 – кирпичная кладка; 3 – клеевой состав; 4 – теплоизоляция;
 5 – выравнивающий клеевой состав; 6 – армирующая сетка; 7 – грунтовка;
 8 – декоративная штукатурка; 9 – дюбель

Результаты натуральных исследований стен зданий, в дополнительной теплоизоляции которых использовались каменная вата и полистирольный пенопласт (глава 6), подтвердили существенное различие в характере распределения влаги по сечению ограждающих конструкций.

Долговечность ЛШС теплоизоляции наружных стен зависит от многих факторов. Но в первую очередь от поведения утеплителя, подвергающегося температурным и влажностным воздействиям и нагрузкам от собственного веса. На долговечность укрывного слоя

оказывает влияние, кроме перечисленных факторов, ветровое воздействие и усадочные деформации ограждающих конструкций.

Результаты обследований ЛШС на эксплуатируемых объектах показали, что основными дефектами являются:

- отслоение декоративного отделочного слоя;
- трещины в защитном слое в местах стыков плит теплоизоляции и расположения дюбелей;
- трещины в углах проёмов.

Одним из факторов, определяющим долговечность ЛШС, служит взаимодействие её с водой. Влага воздействует на систему теплоизоляции путём:

- внешнего атмосферного влияния при попадании её внутрь материалов и последующего перехода из жидкой фазы в твёрдую и наоборот;
- внутреннего влияния вследствие повышенной влажности помещений и конденсации водяного пара в слое теплоизоляции или в укывном слое.

Число переходов температуры наружного воздуха через 0 °С за год составляет около 60-ти раз. При периодических или скачкообразных её колебаниях происходит изменение агрегатного состояния влаги. При этом в зоне перемещения фронта промерзания создаются крайне неблагоприятные условия для материалов вследствие возникновения напряжённого состояния при льдообразовании. Кроме того, изменение границы раздела фаз влияет на распространение температурных волн в ограждении, а, следовательно, и на теплоустойчивость ограждений к внешним и внутренним воздействиям. А это сказывается на колебаниях температуры внутренней поверхности ограждения.

Причинами появления дефектов в системах теплоизоляции могут быть и нарушения технологии монтажных работ и ошибки в проектировании, как зданий, так и систем утепления, а также процессы естественного старения.

В тоже время, длительные и кратковременные испытания и натурные исследования по определению характеристик ЛШС на эксплуатируемых объектах показали, что срок службы теплоизоляции не менее 25 лет.

9.3 Тяжёлые штукатурные системы теплоизоляции

Тяжёлые штукатурные системы (ТШС) для теплоизоляции стен здания представляют многослойную конструкцию, состоящую из теплоизолированного слоя, закреплённого на поверхности стены при помощи анкерных устройств или при помощи анкерных устройств и клея, армированного и декоративно - защитного слоёв.

Применение тяжёлых штукатурных систем утепления стен связано с возможностью применения более дешёвых, чем в лёгких системах, материалов.

Общая толщина армирующего и декоративно-защитных слоёв в тяжёлых штукатурных системах утепления составляет от 20 до 50 мм и определяется противопожарными требованиями. Для армирования используются оцинкованные металлические сетки с размером ячейки от 15 до 50 мм из проволоки диаметром от 1 до 3 мм.

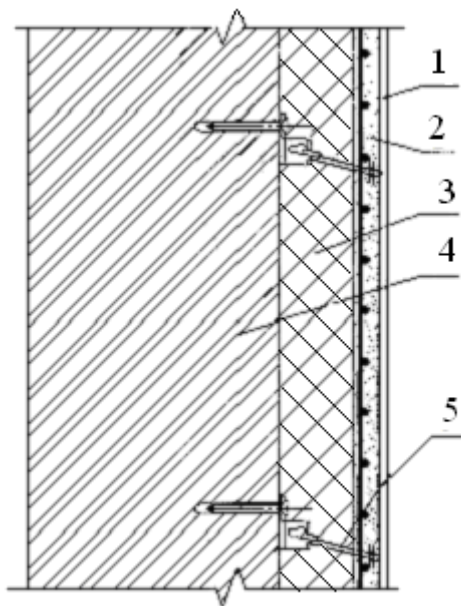


Рис. 9.2. Конструкция тяжёлой штукатурной системы:
1 – защитно-отделочный слой; 2 – армирующий слой, состоящий из модифицированной штукатурки с металлической проволочной сеткой; 3 – теплоизоляционный слой; 4 – стена здания; 5 – анкерные устройства

Особенностью ТШС является чёткое разграничение назначения отдельных элементов между собой.

Несущими элементами системы являются анкерные устройства и металлическая сетка, которые воспринимают нагрузки от конструкции системы утепления и передают их на стену здания. Крепление теплоизоляции к стене выполняется при помощи металлических прямых или наклонных анкеров.

Слой теплоизоляции в ТШС не является несущим, а обеспечивает теплозащитные качества системы. Для него могут быть использованы пенополистирольные плиты марок 15Н, 20Н и 25Н, а также изделия из минеральной ваты. По теплотехническим характеристикам, в частности по коэффициенту паропроницаемости, указанные материалы отличаются друг от друга. В эксплуатационных условиях именно различия в тепло- и массообменных характеристиках материалов определяют распределение влаги по сечению наружных стен, а, следовательно, и их долговечность.

Укрывной армированный слой, в котором располагается металлическая сетка, обычно выполняется из цемента-песчаного раствора или специальной модифицированной штукатурной смеси. Он защищает теплоизоляцию от внешних воздействий и механических повреждений и имеет толщину в пределах 50 мм.

Защиту от атмосферных осадков, а также обеспечение архитектурной выразительности выполняет декоративно-защитный слой.

Следует подчеркнуть, что коэффициенты паропроницаемости материалов в декоративно-защитном и армированном слоях ТШС теплоизоляции должны быть достаточно большими ($\mu \geq 0,1 \text{ мг / (м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$), чтобы исключить накопление избыточной влаги в конструкции стены.

Появление трещин в защитно-отделочном слое от усилий, возникающих в результате температурных деформаций, предотвращается устройством горизонтальных и вертикальных температурных швов шириной не менее 10 мм, расположенных на расстоянии не менее 10 м друг от друга. Швы следует располагать также на углах зданий и вдоль архитектурных элементов фасадов.

9.4 Вентилируемая система теплоизоляции

Среди применяемых способов устройства наружного утепления достаточно часто встречаются «сухие» способы, отличительной особенностью которых является наличие защитного экрана на отnose ($\delta = 20 \dots 100$ мм) от слоя теплоизоляции с образованием воздушной прослойки, вентилируемой наружным воздухом, т.н. «вентилируемый фасад». Размеры и конструкции облицовок в разных системах различаются. Они могут быть сплошными, выполненными из гладких или профильных листов, иметь входные и выходные отверстия в нижнем и верхнем участках стен или быть выполненными из отдельных элементов (панелей), между которыми предусмотрены открытые швы шириной до 10 мм для поступления и выхода воздуха. Движение воздуха происходит вследствие возникновения разности его давлений на входе в и выходе из прослойки. Т.е., вентфасад представляет собой вентилируемую систему теплоизоляции наружных стен, в которой в отличие, от лёгкой и тяжёлой штукатурных систем утепления, декоративно-защитный слой отнесён на некоторое расстояние от поверхности утеплителя, что позволяет осуществлять его вентиляцию наружным воздухом.

Вентфасады отличаются друг от друга материалом облицовочного слоя, конструкцией каркаса, способом крепления к стене, методом защиты утеплителя от потоков воздуха, перемещающегося в вентпрослойке, однако в любом вентфасаде присутствуют следующие обязательные элементы:

- подоснова (утепляемая стена);
- подоблицовочная конструкция;
- теплоизоляционный слой;
- вентилируемая воздушная прослойка;
- облицовка (экран).

Схема «вентилируемого фасада», представленная на рис. 9.3, показывает все его основные элементы.

Облицовка вентфасада выполняется в виде крупноразмерной сплошной плиты высотой с этаж или несколько этажей с входными отверстиями внизу и выходными – наверху (Тип I).

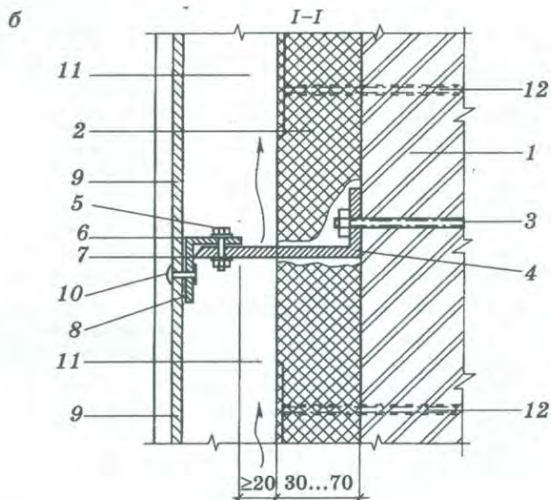
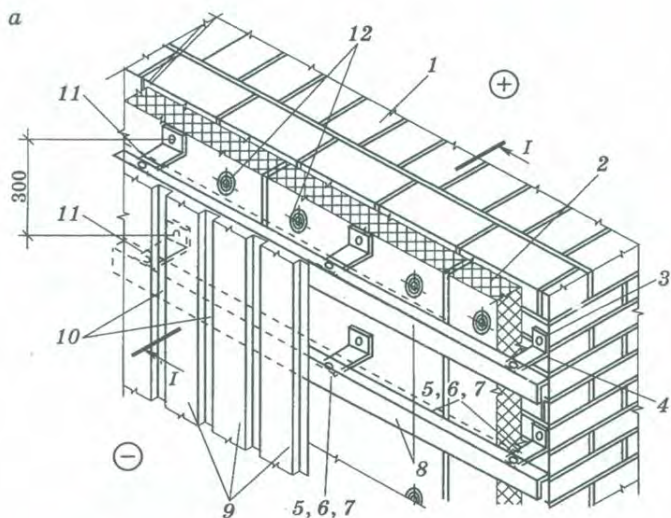


Рис. 9.3. Наружная теплоизоляция стен здания «вентилируемый фасад»:
a – общий вид; *б* – элемент крепления;

1 – наружная стена; 2 – теплоизоляция; 3, 12 – дюбель-анкер; 4 – кронштейн;
 5 – 7 – болты с гайкой, шайбой и гравером; 8 – горизонтальный несущий
 профиль (балка); 9 – экран; 10 – заклёпки; 11 – воздушная прослойка

Возможно устройство облицовки из мелкогабаритных элементов прямоугольной формы, между которыми предусмотрены воздухопроницаемые горизонтальные швы шириной $\delta = 5 \dots 10$ мм (Тип II).

Конструкция облицовки должна обеспечивать защиту теплоизоляции от атмосферных осадков – воды и снега, а также воспринимать ветровой напор. Материалом для облицовочных изделий служат металлы, полимербетоны, фиброцементы, керамика, стекло, дерево и др.

Крепление облицовки на отnose от теплоизоляции выполняется с использованием опорных конструкций, которые состоят из кронштейнов, анкерных устройств и вертикальных или горизонтальных балок. Жестко соединённые друг с другом экраны и под облицовочные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются гравитационным, температурно-влажностным и ветровым циклическим воздействиям, которые сопровождаются возникновением напряжений и деформации. Для обеспечения конструкций вентфасадов надёжности они рассчитываются по предельным состояниям с учётом неблагоприятных сочетаний нагрузок и возникающих усилий.

Вентилируемые прослойки служат для удаления диффундирующей влаги и исключения влагонакопления в годовом цикле эксплуатации ограждений. В вентфасаде наружным слоем стены является теплоизоляция, свободно пропускающая поток влаги, а плоскостью возможной конденсации его служит внутренняя поверхность облицовки. При перенасыщении движущегося потока воздуха водяным паром происходит его конденсация на внутренней стороне облицовки, а затем и на поверхности теплоизоляции. Конденсат начинает выпадать в верхней части прослойки, выходные отверстия обмерзают, образуется налесь, которая перекрывает прослойку, движение воздуха прекращается. Указанное явление может привести к переувлажнению теплоизоляции, резкому увеличению веса конструкции вентфасада за счёт гололёдной нагрузки, неконтролируемым деформациям и даже к разрушению.

Для защиты вентфасада от указанных неблагоприятных явлений необходимо предусмотреть, чтобы через прослойку проходил объём воздуха, достаточный для ассимиляции всего водяного пара и не происходило перенасыщение воздуха.

Тепловлажностный режим наружных стен зданий с вентфасадом в процессе эксплуатации формируется в зависимости от ряда фак-

торов, к которым относятся ориентация объекта на местности, материал и конструкция подосновы и теплоизоляции, ветрозащита теплоизоляции, вид подобилицовочной конструкции, облицовки и т.д. Значительную роль играют толщина прослойки и расстояние между входными и выходными отверстиями.

Расчёт и проектирование теплоизоляции по системе «вентилируемый фасад» основывается на решении трёх задач:

- определения толщины слоя теплоизоляции на основании теплотехнического расчёта;

- расчёта влажностного режима ограждающей конструкции с определением потока диффундирующей влаги и расхода воздуха для его ассимиляции в прослойке;

- расчёта аэродинамического режима прослойки с определением геометрических характеристик.

Представленные в литературных источниках материал по расчёту и применению систем теплоизоляции «вентилируемый фасад» в основном ориентируются на советскую школу теплофизики и иностранный опыт [9.1...9.8] и не полностью освещают обозначенную задачу. В работах советской школы решались задачи, связанные с нормализацией тепловлажностного режима ограждающих конструкций или защиты их от перегрева, а в материалах иностранных компаний представлены только конечные результаты.

Технологии теплоизоляции наружных стен зданий, разработаны отечественными и совместными предприятиями, без углубления в теплофизические аспекты этих систем. Но климатические условия Республики Беларусь значительно отличаются как от стран Западной Европы, так и России. И механически переносить опыт этих стран, без коррекции на условия Республики Беларусь, было бы не верным.

Для широкого внедрения наружной теплоизоляции зданий «вентилируемый фасад» необходимо накопление результатов исследований, в том числе и в процессе эксплуатации зданий. Особенно важны результаты теплотехнических и аэродинамических исследований.

9.4.1 Экспериментальные исследования наружных стен эксплуатируемых зданий

Натурные исследования наружных стен жилых и общественных зданий, теплоизолированных по системе «вентилируемый фасад»,

выполнены за период с 2001 по 2010 г.г. на эксплуатируемых объектах различной этажности в г. Минске. На выбранных участках кирпичных стен зданий были смонтированы измерительные участки. По высоте вентилируемых прослоек, на поверхностях слоя теплоизоляции и облицовки, по сечению стены устанавливались датчики температур, тепловых потоков, давлений. В процессе исследований выполнялся анализ формирования температурных полей на поверхностях облицовки и стены, распределение температур по сечению стены, измерялись скорости движения воздуха в прослойке, направление и скорость ветра, плотность удельной мощности тепловых потоков, определялись массовые влажности материалов.

Общий вид измерительного участка и монтаж датчиков на стене одного из объектов показан на рис. 9.4.

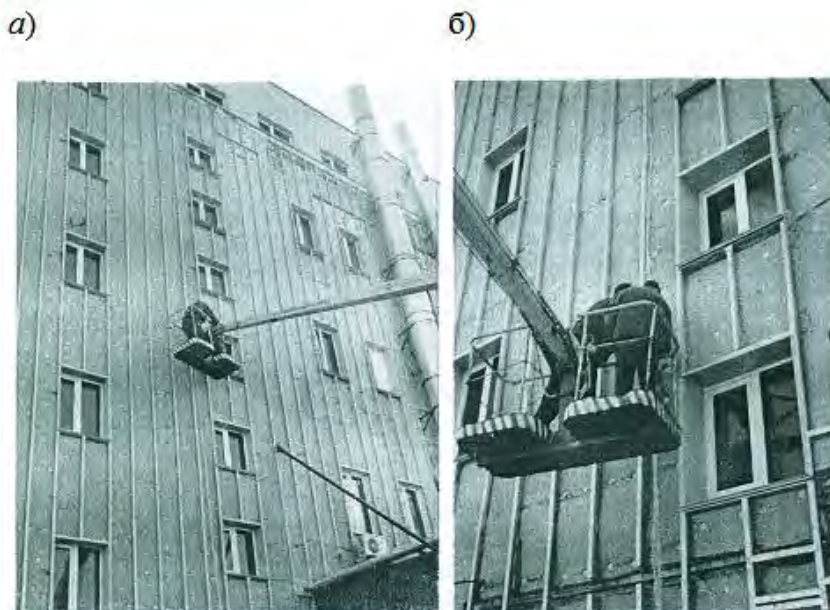


Рис. 9.4. Измерительный участок на стене с «вентилируемым фасадом» административного здания:

a – общий вид; *б* – установка датчиков температуры по высоте фасада

Измерения на объектах выполнялись в весенний, летний, осенний и зимний периоды года. Производились они с записью показаний на автоматические многоканальные приборы, за периоды с погодными условиями «постоянными» во времени и близкими к условно «стационарным».

Анализ результатов натурных исследований показал, что на аэродинамический и тепловлажностный режимы вентфасадов значительное влияние оказывает тип защитной облицовки и ветровое воздействие. У систем с защитной облицовкой из отдельных панелей с открытыми стыками обнаружено наличие локальных зон с повышенным давлением потока воздуха, которые инициируют возникновение продольной фильтрации в слое теплоизоляции.

В вентфасадах со сплошной облицовкой, локальных зон повышенного давления зафиксировано меньше, а скорость потока воздуха более постоянная. В тоже время, в зданиях в 2...4 этажа были замечены случаи опрокидывания движения воздуха в прослойках и поступление его в них через верхние выходные отверстия. Воздействие же ветра положительно сказывалось на интенсификации вентиляции прослоек.

Измерения скорости воздуха в вентилируемых прослойках, при отсутствии ветра показали, что в большинстве случаев в условиях г. Минска она менее 0,1 м/с. При температурах наружного воздуха ниже $t_n = -10$ °С скорость воздуха составляла $v = 0,12...0,15$ м/с и возрастала до 1 м/с при ветровом воздействии на здания.

На ряде объектов движение воздуха в прослойках вообще не было зафиксировано. По результатам анализа распределения температур воздуха по высоте прослоек следует вывод, что в них образуются циркуляционные кольца, препятствующие сквозному прохождению воздуха (рис. 9.5). Причинами возникновения циркуляционных потоков являются неверно принятые размеры входных (выходных) отверстий и ошибки при определении аэродинамического режима прослоек.

Результаты натурных исследований также указывают на значительное расхождение результатов измерений температур воздуха на выходе из прослоек (или в различных сечениях по высоте ВВП) от рассчитанных по методикам, приведенным в [9.1, 9.6].

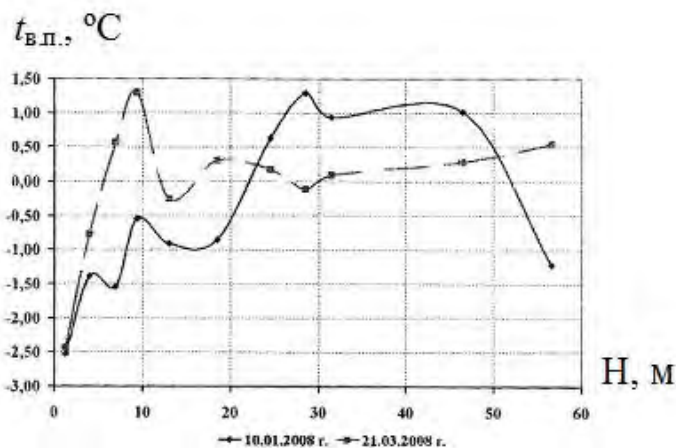


Рис. 9.5. Распределение температур воздуха в вентилируемой прослойке по высоте здания по пр. Независимости в г. Минске

Кронштейны с дюбелями крепления защитного экрана фасадной системы влияют на температурное поле ограждения. Это подтверждается и натурными наблюдениями. На всех экспериментальных объектах датчики температуры, установленные в зазорах между слоями утеплителя и на подблицовочной конструкции у элементов крепления, показывали более низкую температуру, чем датчики, установленные вдали от теплопроводных включений.

Вскрытие участков стен с вентилируемыми системами утепления после нескольких лет эксплуатации показало, что влажностный режим их, в целом, удовлетворительный. Массовые влажности материалов, в большинстве конструкций, не превышали сорбционные влажности, определённые по изотермам сорбции для относительной влажности воздуха $\varphi = 65 \dots 75 \%$.

Выявить наличие или отсутствие продольной фильтрации воздуха в слое теплоизоляции и в воздушном зазоре между утеплителем и стеной однозначно не удалось. Следует указать, что на объектах были использованы теплоизоляционные материалы с различной защитой поверхности от возникновения фильтрации воздуха. В большинстве случаев это были минераловатные плиты с наружным уплотнённым ветрозащитным слоем, а также укрытием теплоизоляции ветрозащит-

ными плёнками. В то же время исследования выявили, что при ветровом воздействии со скоростями ветра $v = 6$ м/с и выше существует снижение температур в зазорах между конструктивными слоями и теплоизоляцией напротив стыков плит утепления.

Проведенный комплекс натуральных исследований систем теплоизоляции «вентилируемый фасад» на эксплуатируемых объектах различного назначения и этажности, не дал однозначного ответа на ряд вопросов необходимых для выполнения их расчёта. Не выявлено влияния подблицовочной конструкции и элементов крепления слоя теплоизоляции на величину сопротивления теплопередаче стен с «вентилируемым фасадом», влияния шероховатости теплоизоляции и экрана на потери давления при движении воздуха внутри прослоек, а также влияния взаимосвязанных процессов переноса теплоты, влаги и воздуха на тепловлажностный режим стен с фасадными системами теплоизоляции.

Вышеизложенное послужило отправной точкой для дополнительного проведения аналитических и экспериментальных исследований процессов переноса теплоты и массы в ограждающих конструкциях зданий с «вентилируемыми фасадами».

9.4.2 Аэродинамический режим вентиляруемых прослоек

Движение воздуха в вентиляруемых прослойках вызывается наличием гравитационного и ветрового давления. С ростом этажности зданий усиливается роль ветрового давления на аэродинамический режим, как самих зданий, так и вентиляруемых прослоек вентфасадов. На высоте 100 м скорость ветра в 1,5...2,4 раза выше по отношению к её величине на высоте 10 м. Атмосферное давление с увеличением высоты понижается, в среднем, на один гектопаскаль через каждые 8 м. Наличие переменного воздушного воздействия влияет и на режим движения воздуха как вблизи ограждений, так и вентпрослойке. В качестве иллюстрации на рис. 9.6 показана картина обтекания здания линейного типа в вертикальной плоскости с указанием эпюр скоростей, построенным по данным экспериментальных исследований Ф.Л. Серебровского [9.10]. Как видно из представленной схемы, перед зданием и в заветренной области за ним возникают движения потоков, способствующих поступлению воздуха во входные отверстия защитного экрана теплоизоляции.

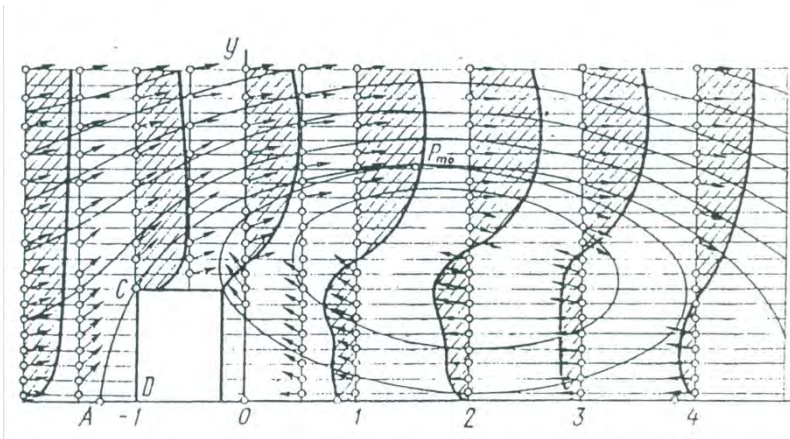


Рис. 9.6. Эпюры скоростей воздушного потока в вертикальной плоскости при обтекании здания линейного типа

По результатам исследований аэродинамики потоков [9.9, 9.10], омывающих здания, можно сделать вывод, что движение воздуха будет присутствовать вдоль всех фасадов. При этом различные фасады или участки фасадов будут находиться под разным давлением, избыточным или пониженным по отношению к атмосферному.

Анализ литературных источников и натуральных исследований распределения температур по высоте прослоек «вентилируемых фасадов» косвенно указывают на сложный характер движения в них потоков воздуха. Возможны как образование циркуляционных колец, так и одновременное движение восходящих и нисходящих потоков воздуха на различных участках прослоек, учесть которые в расчётах сложно.

Поэтому для оценки развития статического давления в вентиляруемой воздушной прослойке от ветрового воздействия, на испытательном стенде выполнены исследования на моделях зданий простой конфигурации. Схема испытательного аэродинамического стенда и методика испытаний представлены в главе 10.

Исследовались модели зданий с воздушной прослойкой на поверхности стен и без неё, модели с различными конструктивными решениями выхода воздуха из прослоек. В процессе проведения экспериментов определялось статическое давление на вертикальных поверхностях мо-

делей. Для этого в местах выхода воздуха из воздушной прослойки размещены штуцера отбора, соединённые с микроманометрами. Отсчёты по приборам выполнялись фотосистемой.

Модели устанавливались на поворотной платформе, что позволяло ориентировать их по потоку воздуха. Исследования проводились при скорости воздуха $v = 1,1 \dots 2,1$ м/с. Некоторые результаты моделирования представлены на рис. 9.7. Величины статических давлений измерены у входных и выходных отверстий воздушных прослоек.

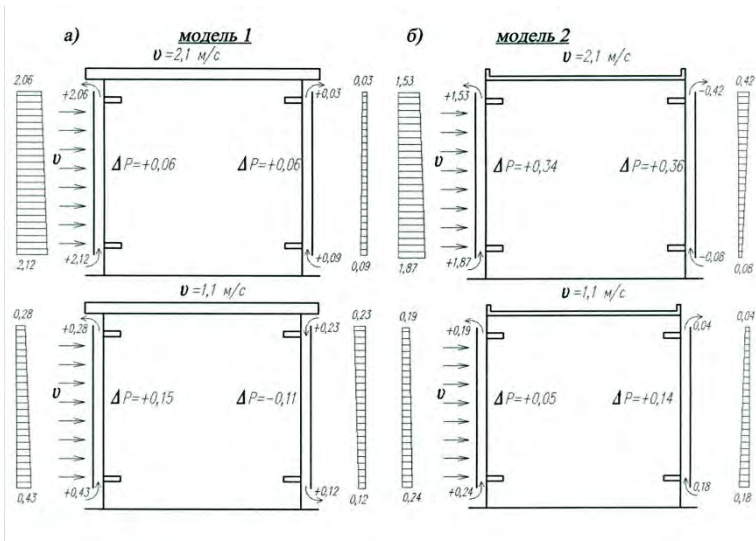


Рис. 9.7. Схемы движения воздуха и величины статических давлений (P, Па) в прослойках и на поверхности моделей при скоростях $v = 1,1$ м/с и $2,1$ м/с

Исследования подтвердили зависимость развития статического давления в вентилируемых прослойках, как от скорости потока воздуха, так и от конфигурации модели. Указали на возможность опрокидывания потока воздуха в прослойках на заветренной стороне зданий. Кроме того, исследования показали, что величины статического давления воздуха зависят от конструктивного решения отверстий на входе в прослойку и выходе из неё.

Схема формирования аэродинамического режима в воздушной вентилируемой прослойке на поверхности стены здания для зим-

енго периода года ($t_g > t_n$) показана на рис. 9.8. Движение воздуха в прослойке вызвано одновременным действием гравитационного и ветрового давлений.

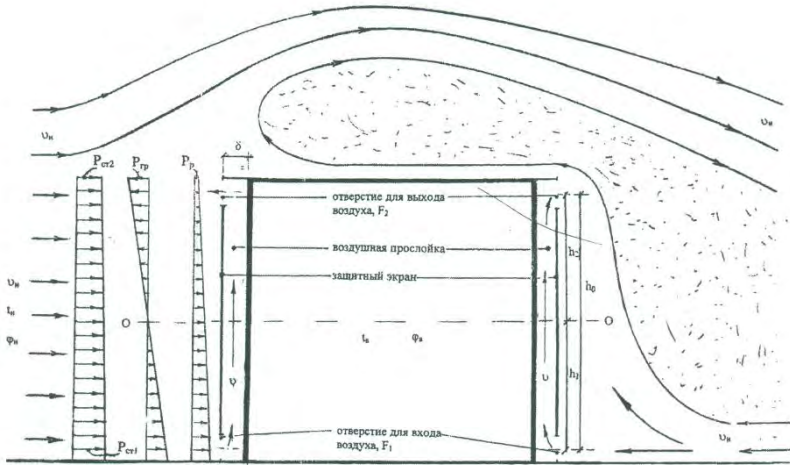


Рис. 9.8. Схема формирования воздушного режима вентилируемой прослойки ($t_g > t_n$)

При воздействии ветра на здание помимо прямого ветрового потока возникают турбулентные потоки и завихрения воздуха. Вихри, имеющие высокую скорость, вызывают круговое восходящее движение воздуха и всасывающие струи вблизи здания.

На схеме вентилируемая прослойка толщиной « δ » имеет два отверстия. Одно для входа воздуха площадью живого сечения « F_1 », а второе – для выхода, площадью живого сечения « F_2 ». Отверстия расположены на двух уровнях на расстояниях « h_1 » и « h_2 » от осевой линии 0-0. Расстояние между отверстиями $h_0 = h_1 + h_2$.

Различие в температурах воздуха по высоте прослойки вызывает появление гравитационного давления $P_{гр}$. Избыточное гравитационное давление в нижней части воздушной прослойки направлено внутрь, а в верхней, из прослойки – наружу.

При обдувании здания потоком воздуха у нижнего отверстия прослойки создаётся избыточное статическое давление.

$$P_{ст1} = C_1 \cdot \frac{\rho \cdot v_n^2}{2}, \quad (9.1)$$

а у верхнего:

$$P_{ст2} = C_2 \cdot \frac{\rho \cdot v_n^2}{2}, \quad (9.2)$$

где C_1 и C_2 – аэродинамические коэффициенты, определяющие статическое давление у отверстий в долях от динамического давления прямолинейного ветрового потока;

v_n – скорость ветра, м/с.

Внешнее давление, возникающее у прослойки, передаётся внутрь её, формируя внутренне давление, равное:

$$P_{в1} = P_{ст1} - \xi_1 \frac{\rho v_1^2}{2}$$

и

$$P_{в2} = P_{ст2} - \xi_2 \frac{\rho v_2^2}{2}, \quad (9.3)$$

где $\xi_1 \frac{\rho v_1^2}{2}$ и $\xi_2 \frac{\rho v_2^2}{2}$ – потери давления в отверстиях, Па;

ξ_1 и ξ_2 – коэффициенты местных сопротивлений;

v_1 и v_2 – скорость ветра, м/с.

Разность между $P_{в1}$ и $P_{в2}$ представляет величину располагаемого давления, возникающего вследствие ветрового напора.

$$\Delta P_p = P_{в1} - P_{в2}. \quad (9.4)$$

С учётом гравитационного давления, располагаемое давление прослойки равно

$$\Delta P_p = \left(C_1 \cdot \frac{\rho v_n^2}{2} - \xi_1 \frac{\rho v_1^2}{2} \right) - \left(C_2 \cdot \frac{\rho v_n^2}{2} - \xi_2 \frac{\rho v_2^2}{2} \right) + \Delta P_{гр}. \quad (9.5)$$

Определяется гравитационное давление в Па, по формуле

$$\Delta P_{\text{гр}} = 9,81 \cdot h_0 \cdot \rho_n - \rho_{\text{нр}}, \quad (9.6)$$

где ρ_n – плотность наружного воздуха, кг/м³;

$$\rho_{\text{нр}} = \frac{\rho_{\text{вх}} + \rho_{\text{вых}}}{2}, \text{ кг/м}^3;$$

$\rho_{\text{вх}}$ – плотность наружного воздуха на входе в прослойку, кг/м³;

$\rho_{\text{вых}}$ – плотность воздуха на выходе из прослойки, кг/м³.

Геометрические характеристики вентилируемых прослоек рассчитываются или только с учётом гравитационного давления, что соответствует худшим условиям их эксплуатации, или с учётом совместного гравитационного и ветрового давлений.

При отсутствии ветровой нагрузки на стены расчёт выполняется в следующей последовательности.

По формуле 9.6 определяется величина гравитационного давления. Затем по формуле 9.7 рассчитываются потери давления при движении воздуха в прослойке.

$$\sum P_{\text{П}} = R_h + \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \frac{\rho_{\text{нр}} \cdot v_{\text{нр}}^2}{2}, \quad (9.7)$$

где R_h – потери давления на трение по высоте прослойки,

$$R_h = R_f \cdot h, \text{ Па};$$

R_f – удельные потери давления на трение, Па/м;

$\sum_{i=1}^n \xi_i$ – сумма местных сопротивлений;

$v_{\text{нр}}$ – скорость воздуха в прослойке, м/с, определяемая по формуле

$$\bar{v}_{\text{нр}} = \frac{L}{3600 \cdot F_{\text{ж.с}}}, \quad (9.8)$$

где $F_{\text{ж.с}} = \delta \cdot b$ – площадь живого сечения прослойки, м²;

L – объёмный расход воздуха в прослойке, м³/ч.

Определение площади прослойки $F_{ж.с}$, m^2 при ширине $b = 1$ м выполнено, если $\Delta P_{гр} > \sum P_{л}$. При невыполнении условия $\Delta P_{гр} > \sum P_{л}$, необходимо изменить толщину вентилируемой прослойки и повторить расчёт.

При учёте совместно ветрового и гравитационного давлений аэродинамический расчёт проводится в следующей последовательности.

По формуле 9.6 определяется гравитационное давление. Ветровое давление во входном и выходном отверстиях прослойки, рассчитываются по формулам (9.1) и (9.2), дополненным коэффициентами $K_{вх}$ и $K_{вых}$

$$P_{\partial}^{вх} = K_{вх} \cdot C_1 \cdot \frac{\rho \cdot v_n^2}{2} \quad \text{и} \quad P_{\partial}^{вых} = K_{вых} \cdot C_2 \cdot \frac{\rho \cdot v_n^2}{2}, \quad (9.10)$$

где C_1 и C_2 – аэродинамические коэффициенты по [9.9, 9.11];

$K_{вх}$ и $K_{вых}$ – коэффициенты, учитывающие изменение скорости по высоте здания, [9.11].

Располагаемое давление в прослойке равно

$$\Delta P_p = \left(K_{вх} \cdot C_1 \cdot \frac{\rho \cdot v_n^2}{2} - \xi_1 \cdot \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} \right) - \left(K_{вых} \cdot C_2 \cdot \frac{\rho \cdot v_n^2}{2} - \xi_2 \cdot \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} \right) + \Delta P_{зр}. \quad (9.11)$$

Потери давления при движении воздуха в прослойке рассчитываются по формуле 9.7.

Расчёт считается законченным при выполнении условия $\Delta P_p > \sum P_{л}$. При невыполнении данного условия необходимо уточнить толщину вентилируемой прослойки, либо разбить вентилируемый фасад по высоте на зоны, имеющие входные и выходные отверстия и повторить расчёт до выполнения условия.

При учёте потерь давления на местные сопротивления и потерь на трение скорость воздуха в прослойке определяется по формуле

$$v_{np} = \sqrt{\frac{C_1 - C_2 v_n^2 + 0,08h \cdot t_{cp} - t_n}{\sum \xi_i + 1,67 R_i h}} \quad (9.12)$$

Экспериментальные и аналитические исследования вентиляруемых прослоек, показали незначительность величин их располагаемого давления и обозначили необходимость учёта в расчётах как потерь давлений на местных сопротивлениях, так и на трение [9.12].

Представленные на рис. 9.9 графические зависимости потерь давления в прослойках толщиной $\delta_{np} = 60$ мм и 80 мм с учётом и без учёта потерь на трение, наглядно демонстрируют необходимость их определения.

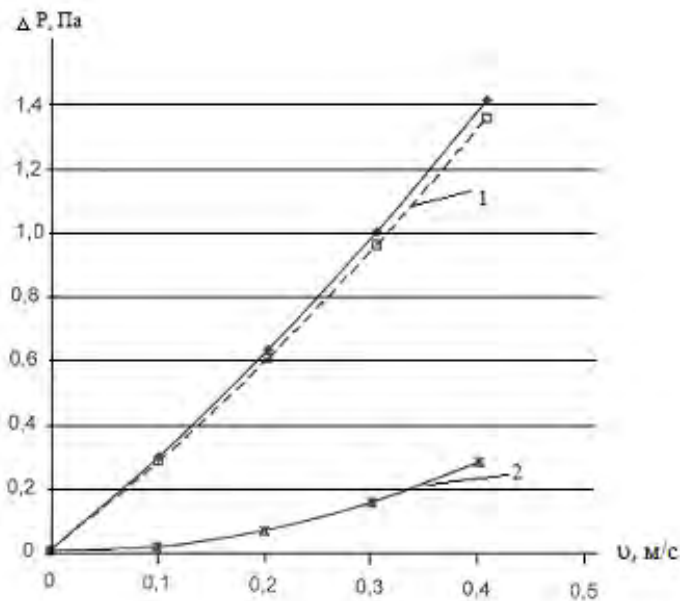


Рис. 9.9. Потери давления при движении воздуха в вентиляруемых прослойках:
 1 – с учётом потерь давления на трение;
 2 – без учёта потерь давления на трение

Выполнение указанных расчётов осложняется отсутствием конкретных данных о величине удельных потерь на трение при движении воздуха вдоль плит из базальтовой минеральной ваты, а так же при движении воздуха в щелевых каналах переменного сечения, каковыми в большинстве случаев являются вентилируемые прослойки.

Для получения необходимых данных по удельным характеристикам потерь давления на трение проведены дополнительные экспериментальные исследования. Эксперименты выполнены на установке, схема и общий вид которой представлен на рис. 9.10.

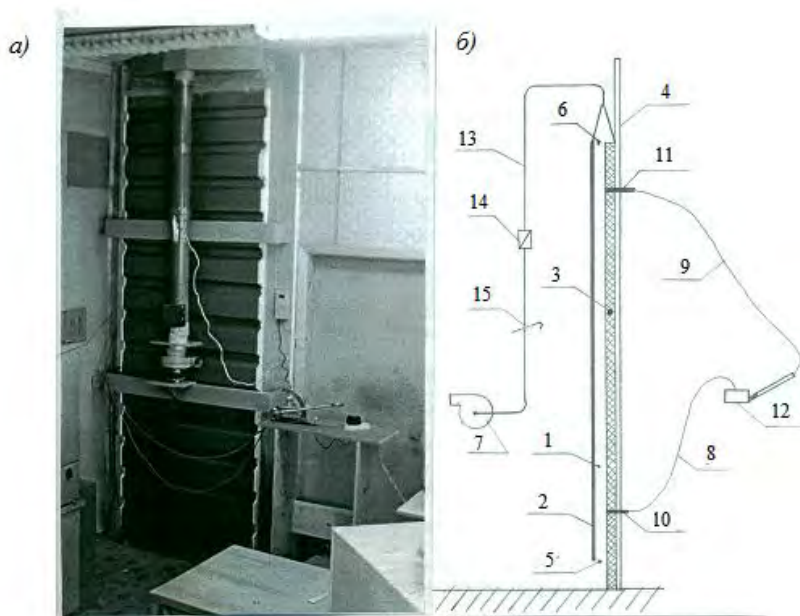


Рис. 9.10. Экспериментальная установка по определению удельных потерь давления на трение в вентилируемой прослойке:

a – общий вид; *б* – принципиальная схема

1 – вентилируемая прослойка; 2 – наружная облицовка фасада;

3 – минераловатные плиты; 4 – плита, имитирующая наружную стену фасада;

5 – нижнее отверстие вентилируемой воздушной прослойки; 6 – верхнее отверстие вентилируемой воздушной прослойки; 7 – вентилятор;

8, 9 – соединительные шланги; 10, 11 – пневмометрические трубки;

12 – дифференциальный микроманометр; 13 – воздуховод;

14 – расходомер; 15 – шибер

Установка представляет собой участок вентилируемой воздушной прослойки с шириной канала для прохода воздуха $b = 0,93$ м, высотой $l = 2,5$ м и изменяющейся толщиной $\delta = 20, 40, 60, 80$ и 100 мм.

Исследования проводились на вентилируемых прослойках двух видов (рис. 9.11):

I – «гладкий канал» – одна поверхность образована минераловатными плитами, другая – гладкой поверхностью;

II – «канал профиль», или канал переменного сечения – одна поверхность образована минераловатными плитами, другая – листами металлического профиля. Толщина прослойки в данном случае определялась как размер в минимальном сечении.

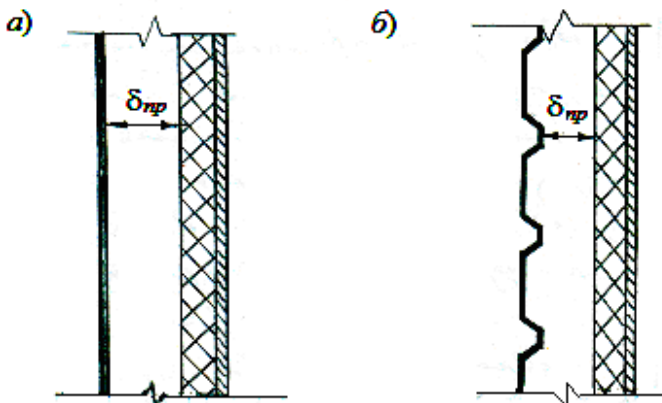


Рис. 9.11. Схемы вентилируемых прослоек:
а – «гладкий канал»; б – «канал профиль»

По результатам экспериментов для каждого вида и толщины прослойки получены величины сопротивления потоку воздуха и рассчитаны значения удельных потерь на трение. Данные получены для двух режимов движения воздуха – нагнетание и отсос. Скорость воздуха в прослойке варьировалась в пределах до $0,8$ м/с.

Результаты экспериментальных и аналитических исследований представлены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Формулы расчёта значений R_f , Па/м от скорости воздуха
в вентилируемой прослойке

№ п/п	Толщина прослойки	Диапазон скоростей, м/с	Поверхность облицовки	
			гладкая	профилированная
1	20 мм	0,1...0,8	—	$R_f=0,172 \cdot v$
2	40 мм	0,1...0,8	$R_f=0,223 \cdot v$	$R_f=0,205 \cdot v$
3	60 мм	0,1...0,8	$R_f=0,482 \cdot v$	$R_f=0,362 \cdot v$
4	80 мм	0,1...0,8	$R_f=0,328 \cdot v$	$R_f=0,337 \cdot v$
5	100 мм	0,1...0,8	$R_f=0,071 \cdot v$	$R_f=0,051 \cdot v$

Анализ результатов, представленных в виде простых линейных уравнений, указывает на зависимость удельных величин потерь на трение от геометрии прослойки, в основном, от её толщины.

9.4.3 Фильтрация воздуха в стенах зданий теплоизолированных по системе «вентилируемый фасад»

Для воздуха, перемещающегося в прослойке, изделия из минеральной ваты нового поколения, имеющие волокнистую структуру и используемые в качестве теплоизоляции в «вентилируемых фасадах», не являются препятствием. Перемещение его происходит в виде продольных и поперечных потоков внутри теплоизоляции и подосновы или между ними. Фильтрация холодного воздуха в слое утеплителя ухудшает теплозащитные качества и может уменьшить приведенное сопротивление теплопередаче стены на 10...20 %.

Возникновение продольной и поперечной фильтрации, а также возможность возникновения внутренней фильтрации, в слое утеп-

лителя зависит, в основном, от двух факторов. Первый фактор — величина избыточного давления воздуха в прослойке, второй — плотность и структура минераловатных изделий, т.е. их воздухопроницаемость. Третий фактор — наличие щелей и зазоров между плитами теплоизоляции или между плитами и поверхностью стены, зависит от технологии и качества монтажных работ и может быть не менее важным, чем первые два.

Анализ развития избыточного давления в зависимости от внешних и внутренних факторов, аэродинамический расчёт с определением располагаемого давления по высоте прослойки изложены в параграфе 9.4.2. Некоторые результаты расчёта развития полного давления в прослойке для системы теплоизоляции "вентилируемый фасад" со сплошной облицовкой из металлического сайдинга приведены в [9.13].

Интенсивность фильтрации воздуха через пористые материалы характеризуется коэффициентом воздухопроницаемости, а защитные качества против фильтрации — величиной сопротивления воздухопроницанию.

$$R_g = \sum_{i=1}^n R_{i,g} = \frac{\delta_1}{i_1} + \frac{\delta_2}{i_2} + \dots + \frac{\delta_n}{i_n}, \quad (9.13)$$

где $R_{i,g}$ — сопротивление воздухопроницанию материалов, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$;

\bar{i}_n — условные коэффициенты воздухопроницания отдельных слоёв материала, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$;

δ_n — толщины слоёв материалов, м.

Коэффициенты воздухопроницаемости для волокнистых материалов определены как условные величины, т.к. структура минеральной ваты практически всегда неравномерна по толщине изделия. Кроме того, коэффициент воздухопроницаемости не является величиной пропорциональной общей толщине изделий, поскольку фильтрационному потоку оказывают большее сопротивление поверхностные, уплотнённые слои.

Анализ результатов исследований различных авторов [9.14...9.17] не позволяет сделать однозначные выводы о зави-

симости коэффициентов воздухопроницаемости минваты от различных факторов. Поэтому при оценке воздухопроницаемости используют величину сопротивления воздухопроницанию конкретного материала или изделия.

С целью оценки ветрозащитных качеств плитных теплоизоляционных материалов из минеральной ваты, используемых в «вентилируемых фасадах» проведены экспериментальные исследования их воздухопроницаемости [9.18]. Одновременно выполнена оценка сопротивления воздухопроницаемости образцов утеплителя составленных из минераловатных изделий разной плотности и назначения. Использовались плитные изделия из каменной ваты «Ventirock», имеющие уплотнённую поверхность для защиты от проникновения воздуха, и изделия «Paroc WAS 25 t» защищённые кашированием из стеклохолста.

Описание экспериментальной установки и методика исследований представлены в главе 8, а результаты даны в таблицах 8.1 и 8.2. Их анализ показывает зависимость коэффициента воздухопроницаемости от плотности минеральной ваты. При равных толщинах изделий из минеральной ваты и $\Delta P = 10$ Па удельный поток воздуха, проходящего через образцы плотностью $\rho = 69$ кг/м³ в три раза выше, чем через образцы плотностью $\rho = 170$ кг/м³. Также в три раза выше сопротивление воздухопроницанию изделий с более высокой плотностью. Плитные изделия из минеральной ваты большой толщины имеют характеристики хуже, чем изделия малой толщины, но с защищённой от проникновения воздуха поверхностью. В тоже время высокое сопротивление воздухопроницанию изделий не исключает фильтрацию воздуха во внутренних слоях теплоизоляции, а, следовательно, интенсификацию переноса теплоты через него.

Чтобы оценить влияние фильтрации необходимо знать градиент давлений по высоте прослойки. Следует отметить, что у различных типов «вентилируемых фасадов» градиент давлений будет различным. Так, вентилируемые прослойки с наружной облицовкой мелкоформатной плиткой с открытыми швами, будут иметь совершенно иное распределение давлений по высоте, по сравнению, например, с вентилируемыми прослойками, имеющими воздухонепроницаемые экраны из металлического сайдинга.

Отсутствие достоверных данных по градиентам давлений указывает на необходимость иного подхода к выбору методов ветрозащиты теплоизоляции.

На основании результатов экспериментальных лабораторных и натурных исследований, прослойки по поступлению наружного воздуха предлагается классифицировать на – слабо вентилируемые, вентилируемые и интенсивно вентилируемые (табл. 9.2).

Таблица 9.2

Классификация вентилируемых прослоек

Вид воздушной прослойки	Суммарная площадь входных и выходных вентиляционных отверстий, мм ² /(м ² поверхности стены)	Облицовка прослойки
Слабо вентилируемая	$F_{om} \leq 3000$	Кладка из кирпича, листовые материалы с воздухопроницаемыми швами
вентилируемая	$3000 < F_{om} < 12000$	Из материалов, непроницаемых для воздуха, с отверстиями для входа и выхода воздуха внизу и вверху вентилируемого участка
Интенсивно вентилируемая	$F_{om} > 12000$	Малоформатные плитные материалы с открытыми горизонтальными швами

Предлагаемая классификация позволяет обозначить требования по воздухозащите слоя теплоизоляции.

При использовании в наружных стенах со слабо вентилируемыми воздушными прослойками в качестве утеплителя изделий из минеральной ваты, их плотность должны быть не менее $\rho > 75 \text{ кг/м}^3$, а сопротивление воздухопроницанию $R_i > 0,025 \text{ (м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{даПа)/кг}$.

Для стен с вентилируемыми воздушными прослойками в качестве утеплителя рекомендуются изделия из минеральной ваты $\rho \geq 120 \text{ кг/м}^3$ или изделия, имеющие уплотненные поверхности и специально предназначенные для использования в ограждениях с воздушными прослойками.

Сопротивление воздухопроницанию слоя утеплителя или ветрозащитного слоя должно быть $R_f \geq 0,03$ ($\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{даПа}$)/кг.

В стенах с интенсивно вентилируемыми воздушными прослойками рекомендуются минераловатные плиты плотностью $\rho > 175$ $\text{кг}/\text{м}^3$. При использовании утеплителя с $\rho < 175$ $\text{кг}/\text{м}^3$, следует предусмотреть защиту поверхности его с:

- использованием паропроницаемых листовых материалов или ветрозащитных пленок и мембран со специальной микроперфорацией;

- устройством двухслойного утепления из минеральной ваты с наружным защитным слоем из изделий плотностью $\rho \geq 175$ $\text{кг}/\text{м}^3$ или меньшей плотности, но имеющих обращенную к потоку воздуха ветрозащитную поверхность.

В качестве ветрозащитных материалов для защиты слоев минераловатного утеплителя в вентилируемых конструкциях могут быть применены паропроницаемые пленки и мембраны, имеющие специальную микроперфорацию (табл. 9.3). Их паропроницаемость позволяет влаге, диффундирующей через ограждения, покинуть слой теплоизоляции. Для воздуха, указанные пленки и мембраны практически непроницаемы.

Таблица 9.3

Массообменные характеристики плёнок «JUTA»

Характеристика материала	Физические показатели материала	Фактическое значение показателя для образцов
1	2	3
Паропроницаемая, защитная, микроперфорированная плёнка	Коэффициент паропроницаемости, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$	0,002
	Сопротивление паропроницаемости, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$	0,116
	Теплостойкость (изменение линейных размеров), %	$\pm 0,2$
	Водонепроницаемость при давлении 0,001 МПа в течении 72 ч.	Просачивание воды не наблюдалось
	Водопоглощение, %	0,2
	Сопротивление воздухопроницанию, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{даПа}/\text{кг}$, $\Delta P = 10$ Па	7,69

Окончание табл. 9.3

1	2	3
Защитная, супер- диффузионная мембрана	Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,046
	Сопротивление паропроницаемости, м ² ·ч·Па/мг	0,010
	Теплостойкость (изменение линейных размеров), %	±0,3
	Водонепроницаемость при давлении 0,001 МПа в течении 72 ч.	Просачивание воды не наблюдалось
	Водопоглощение, %	0,3
	Сопротивление воздухопроницанию, м ² ·ч·даПа/кг, ΔP = 10 Па	Непроницаем.

Исключение фильтрации воздуха в слоях теплоизоляции или между теплоизоляцией и подосновой путём организации ветрозащиты позволяет повысить теплозащитные качества систем наружной теплоизоляции «вентилируемый фасад».

9.4.4 Сопротивление теплопередаче наружных стен с «вентилируемым фасадом»

За сопротивление теплопередаче теплоизолированных наружных ограждений «вентилируемый фасад» принимается приведенное сопротивление теплопередаче $R_{г}^{пр}$, м²·°C/Вт с учётом теплопроводных включений образованных элементами крепления теплоизоляции и наружного защитного экрана (облицовки), а также с учётом теплотехнической однородности основного ограждения. В расчёт принимают слои стены, заключённые между воздушными потоками, омывающими её, т.е. между воздухом прослойки и помещения.

Основными факторами, влияющими на приведенное сопротивление теплопередаче стены, являются материал креплений, геометрические размеры слоев и креплений, заглубление дюбелей и кронштейнов в основной материал стены и т.д. Одна и та же система подблицовочных конструкций и креплений теплоизоляционного материала к стене вызывает неодинаковое понижение сопротивления теплопередаче конструкции в зависимости от толщины утепляюще-

го слоя, материала основной конструкции, а также от теплопроводности теплоизоляционного материала. Кроме того, для стены с вентилируемой воздушной прослойкой механизм теплопередачи усложняется перемещением воздуха, влияющим на процессы переноса в прослойке и возможностью возникновения фильтрационных потоков в слое эффективного утеплителя.

Перенос теплоты через прослойку, образованную двумя поверхностями имеющими температуры соответственно t_1 и t_2 , происходит конвективным теплообменом (q_k) и тепловым излучением (q_l). Интенсивность же переноса определяется внешними и внутренними климатическими условиями. Поэтому расчёт приведенного сопротивления теплопередаче стены «вентилируемый фасад» требует знания интенсивности переноса теплоты между подосновой и воздухом, а также температуры воздушного потока и поверхности прослойки.

Здания, в том числе и с вентилируемыми воздушными прослойками, эксплуатируются в режиме переменного ветрового воздействия. Наличие давления воздуха на поверхности стен, особенно в местах отверстий, влияет на режим движения его в прослойке. При наличии ветра в вентилируемых прослойках будет теплообмен при вынужденном движении воздуха, интенсивность которого зависит от скорости и направления ветра, их геометрических характеристик и других факторов.

В безветренную погоду движение воздуха в вентилируемой прослойке связано с возникновением гравитационного давления. В этом случае, интенсивность теплообмена в прослойке определяется условиями свободной конвекции.

Из выше изложенного следует, что движение воздуха в вентилируемой прослойке в зависимости от внешних условий может быть как свободным, так и вынужденным. Следовательно, будут и различными по величине коэффициенты сложного теплообмена, определяемые как

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_l, \quad (9.14)$$

где α_k – коэффициент теплообмена конвекцией, Вт/(м²·°С);
 α_l – коэффициент теплообмена излучением, Вт/(м²·°С.

Расчёт вентилируемых воздушных прослоек и соответственно учёт переноса теплоты был предложен В.Д. Мачинским [9.19] и впоследствии изложен в монографии К.Ф. Фокина [9.6]. В этих работах коэффициент теплообмена в прослойке при расчётах коэффициентов теплопередачи принимается постоянной величиной равной $\alpha_0 = 11,63 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Исследования теплообмена в вентилируемых прослойках выполнены и представлены в работах В.Н. Богословского [9.1], А.Ф. Хомутова [9.5], В.И. Лукьянова [9.20] и других авторов. Результаты их исследований в виде расчётных формул определения коэффициентов теплообмена сведены в таблице 9.4.

Расчётные формулы, приведенные в таблице указывают на различный подход авторов к определению, как вида теплообмена, так и режима движения воздуха.

В нормативных документах коэффициент теплообмена в вентилируемых прослойках рекомендуется принимать постоянной величиной. Например, в DIN 4701 Teil2 коэффициент теплообмена принят равным $\alpha_0 = 11,11 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. В BFE Richlinie этот же коэффициент принимается равным $\alpha_0 = 8,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Дать оценку достоверности определения величин коэффициентов сложного теплообмена в расчетах сопротивления теплопередаче наружных стен наиболее верно на основании проведения натуральных исследований на эксплуатируемых зданиях теплоизолированных по системе «вентилируемый фасад». Экспериментальные исследования выполнены на 1...9 этажных домах наружные стены которых были оборудованы измерительными участками, в зимние периоды в течении трёх лет [9.12]. Результаты натуральных экспериментальных исследований и последующая обработка их позволяет предложить следующие средние коэффициенты теплообмена на поверхности утеплителя:

- для прослоек одно-двухэтажных зданий — $\overline{\alpha_0} = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$;
- для прослоек зданий высотой до 12 м — $\overline{\alpha_0} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$;
- для прослоек зданий выше 12 м — $\overline{\alpha_0} = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

Таблица 9.4
 Расчётные формулы и коэффициенты теплообмена вентилируемых воздушных прослоек

№ п/п	Автор, литература	Конвективный теплообмен, α_K		Лучистый теплообмен, α_L	$\alpha_0 = \alpha_K + \alpha_L$, Вт/(м ² ·°С)
		Вид и режим движения жидкости	Расчётная формула		
1	2	3	4	5	6
1	К.Ф.Фокин, [9,6]	—	—	—	11,6
2	В.М.Ильинский, [9,16]	свободная конвекция	$\alpha = 2,3 \cdot \sqrt{\frac{\Delta t}{\delta}}$	По закону Стефана-Больцмана	$\alpha_0 = 2,3 \div 3,0$
3	В.Н.Богословский, [9,1]	вынужденная конвекция ламинарный и турбулентный режимы	$\alpha_K = 0,896 + 1,51 \cdot 10^{-3} \cdot t \cdot \nu \cdot \rho^{0,2} \cdot \Delta t^{0,1} d^{0,5}$ $\alpha_K = 3,02 \cdot \nu^{0,8} \cdot d^{-0,2}$	По закону Стефана-Больцмана	
4	А.Ф.Хомутов, [9,5]	вынужденная конвекция, турбулентный режим	$\alpha_K = 3,44 - 0,0079 \cdot t \cdot \nu^{0,8} \cdot \delta^{-0,2}$	Не определяется	$\alpha_K = 1,6 \div 2,8$
5	В.И.Лукьянов, [9,20]	свободная конвекция	$\alpha_K = 0,36 \cdot \lambda_{\text{в}} \cdot \left[\frac{g \cdot \beta \cdot \text{Pr} \cdot \Delta t}{\nu^2 \cdot \delta} \right]^{1/4}$	$\alpha_L = 3,3 \cdot [1 + 0,035 \cdot T_{\text{кр}} - 273]$	

Окончание табл. 9.4

1	2	3	4	5	6
6	В.А.Козлов, [9.3]	вынужденная конвекция	$\alpha_{\text{квн.л}} = 0,483 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{\nu}{\delta \cdot \nu} \right)^{0,5}$ $\alpha_{\text{квн.в}} = 0,2 \cdot \frac{\lambda}{\delta^{0,38}} \cdot \left(\frac{\nu}{\nu} \right)^{0,62}$		
7	В.С. Беляев, [9.4]	вынужденная конвекция	$\alpha_0 = 5,5 + 5,7 \cdot \nu$		
8	Батинич Ра- дивое, [9.7]		—	$\alpha_n = f \cdot \nu$	$\alpha_0 = 8 \div 12$

Примечание: ν – скорость, м/с;

Δt – разность температур воздуха и поверхности воздушной прослойки, °С;

t – средняя из этих температур, °С;

d – эквивалентный диаметр, м;

δ – толщина прослойки, м.

Для прослойки (щелевого канала) d равен двойной толщине $d = 2 \cdot \delta$.

Рекомендуемые коэффициенты α_0 могут быть использованы в теплотехнических расчётах стен с вентилируемым фасадом (тип I), у которых облицовка (экран) прослойки выполнена в виде крупно-размерной сплошной плиты.

Температуры воздуха в вентилируемых прослойках на основании результатов исследований, предлагается определять

- на входе в прослойку $t_{вх}$ на 0,5 градуса выше расчётной температуры наружного воздуха, °С;
- на выходе из прослойки путём расчёта по формуле

$$t_{вых} = t_{вх} + h_0 \cdot \frac{\Delta t}{\Delta X}, \quad (9.15)$$

где $\frac{\Delta t}{\Delta X}$ – изменение температуры по высоте прослойки, °С/м, определяемое по графику (рис. 9.12) или по формуле (9.16).

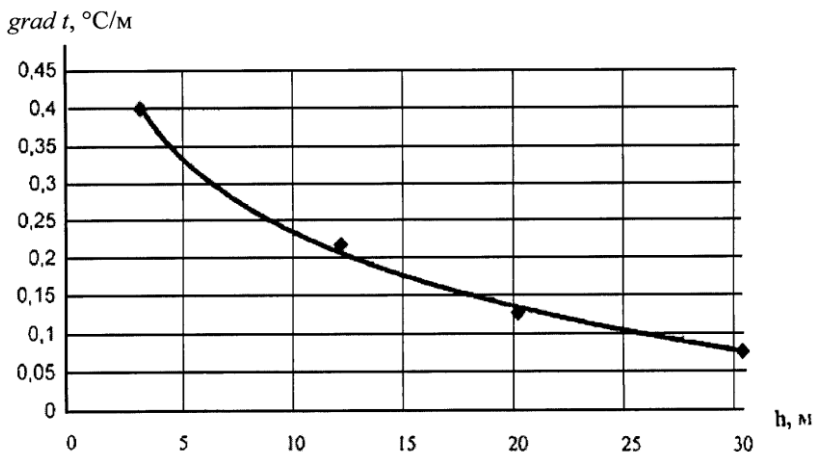


Рис. 9.12. Градиент температуры по высоте прослойки

Аппроксимация кривой $grad t = f(h)$ имеет вид

$$grad t = -0,1404 \cdot \ln(h_0) + 0,5907, \quad (9.16)$$

тогда температуру на выходе из прослойки можно рассчитать по зависимости

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{вх}} + h_0 \cdot (-0,1401 \cdot \ln(h_0) + 0,5907). \quad (9.17)$$

Путиём интегрирования зависимости (9.17), средняя температура по высоте прослойки получена в виде

$$t_{cp} = t_{\text{вх}} - h_0 \cdot -0,035 \cdot \ln h_0 - 0,1568. \quad (9.18)$$

Высота прослойки между входным и выходным отверстиями h_0 , м, первоначально принимается конструктивно с последующим её уточнением.

Проверка методики определения градиента температуры по высоте прослоек выполнена на «вентилируемых фасадах» экспериментальных одно, четырёх и шести этажных кирпичных зданиях. Толщина воздушных прослоек на выбранных объектах $\delta = 40$ мм. Измерения выполнялись в годовых циклах эксплуатации зданий. Экспериментальные исследования температурного режима вентиляруемых воздушных прослоек высотой $h = 3, 12$ и 20 м подтвердили наличие градиента температуры воздуха, зависящего от высоты прослойки. Для воздушных прослоек высотой $h = 3,0$ м градиент температуры воздуха получен равным $\text{grad } t = 0,2-0,4$ °C/м, воздушные прослойки высотой $h = 12$ м имеют градиент температуры воздуха равный $\text{grad } t = 0,2-0,3$ °C/м, а высотой $h = 20$ м равный $-\text{grad } t = 0,15$ °C/м.

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами исследований, изложенными в [9.21].

Наличие данных по интенсивности теплообмена и распределении температур в вентиляруемых прослойках позволяет выполнить расчёты теплотехнических характеристик стен с «вентилируемым фасадом». Определение приведенного сопротивления теплопередаче таких конструкций возможно на основании расчёта трёхмерного температурного поля для участка стены. Расчёт рекомендуется выполнять с разделением его на фрагменты, включающие отдельные элементы подблицовочной конструкции (кронштейны, прогоны, дюбеля крепления). Для этого используются компьютерные про-

граммы расчёта трёхмерного температурного поля, например, программа TEMPER 3D [9.22] или другие. По величинам сопротивлений теплопередаче отдельных фрагментов определяется приведенное сопротивление теплопередаче и коэффициент теплотехнической однородности для выбранного участка стены.

Возможно нахождение приведенного сопротивления теплопередаче стен с «вентилируемыми фасадами» на основании расчётов двухмерных температурных полей для вертикального и горизонтального сечений каждого из теплопроводных включений в отдельности и с последующим расчётом для выбранного участка. Данный способ менее точен, но и менее трудоёмок.

Снижение сопротивления теплопередаче стен из-за влияния теплопроводных включений учитывается введением коэффициентов теплотехнической однородности

$$r = \frac{R_T^{ex}}{R_T}, \quad (9.19)$$

где R_T – сопротивление теплопередаче участка наружной стены без теплопроводных включений, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

R_T^{ex} – сопротивление теплопередаче участка наружной стены с учётом влияния теплопроводных включений, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Влияние теплопроводных включений на уровень теплозащиты наружной стены жилого дома с «вентилируемым фасадом» показывают результаты расчётов, приведенные в табл. 9.5.

Стена дома смонтирована из керамзитобетонных стеновых панелей с наружным железобетонным слоем толщиной $\delta = 30$ мм, средним слоем из керамзитобетона ($\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$) толщиной $\delta = 250$ мм и внутренним фактурным слоем из бетона, толщиной $\delta = 20$ мм. Вентилируемая фасадная система – с теплоизоляционным слоем из минераловатных плит на основе базальтового волокна ($\rho = 90 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\lambda_A = 0,0406 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$) толщиной $\delta = 100$ мм. Защитная облицовка выполнена металлическим профилированным сайдингом; крепление её к основанию стены – с помощью кронштейнов и анкеров.

Таблица 9.5

Влияние теплопроводных включений на сопротивление
теплопередаче наружной стены с вентфасадом

Тип и количество теплопроводных включений на 1 м ² поверхности стены	Коэффициент теплотехнической однородности наружной стены, r	Сопротивление теплопередаче расчётного фрагмента наружной стены с учётом влияния включений R_T^{ex} , м ² ·°C/Вт
Стальной кронштейн с анкером (1 шт.) и дюбеля с металлическими сердечниками (6 шт.)	0,816	2,81
Алюминиевый кронштейн с анкером (1 шт.) и дюбеля с металлическими сердечниками (6 шт.)	0,726	2,50

Крепление теплоизоляции к основанию предусмотрено с помощью дюбелей с металлическими сердечниками Ø5 мм. Толщина прослойки равна $\delta = 60$ мм, сопротивление теплопередаче стены без теплопроводных включений $R_T = 3,45$ (м²·°C)/Вт. В качестве примера на рис. 9.13 показаны температурные поля отдельных фрагментов расчётного участка наружной стены с теплопроводными включениями.

Анализ результатов расчётов показывает, что коэффициент теплотехнической однородности стены при установке 1-го кронштейна и 6-ти дюбелей с металлическими сердечниками на 1 м² её площади получен в пределах $r = 0,726 \dots 0,816$, а сопротивление теплопередаче с учётом влияния теплопроводных включений – в пределах $R_T^{ex} = 2,50 \dots 2,81$, м²·°C/Вт.

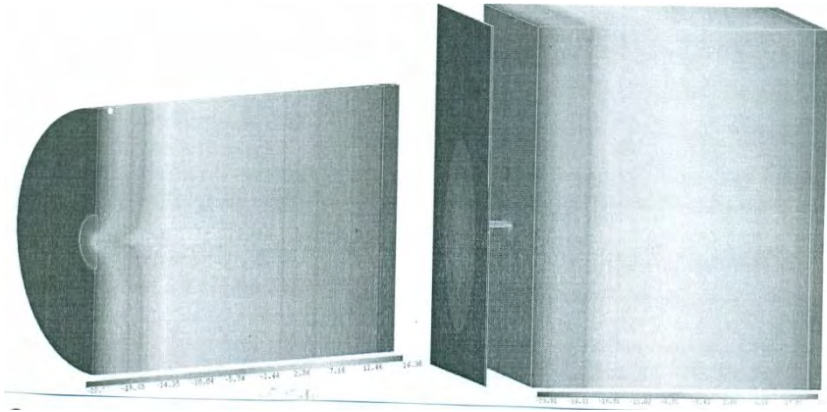


Рис. 9.13. Температурные поля отдельных фрагментов расчётного участка наружной стены с «вентилируемым фасадом»:
a – с дюбелем крепления; *б* – с кронштейном подобилицовочной конструкции

С увеличением точек крепления подобилицовочной конструкции для экранов из керамических керамогранитных и других «тяжёлых» изделий их влияние на уровень теплозащиты стен ещё более увеличивается.

9.4.5 Влажностный режим наружных стен зданий с системами теплоизоляции «вентилируемый фасад»

Процесс переноса влаги в наружной стене здания теплоизолированной по системе «вентилируемый фасад» может быть представлен следующим образом.

В зимний период года водяной пар из воздуха помещений, под действием разности парциальных давлений, поступает в ограждающую конструкцию. Внутри стены влага перемещается в парообразной и жидкой фазах под действием разности парциальных давлений водяного пара. В этом же направлении осуществляется перенос теплоты под действием разности температур и соответствующий ей термоградиентный перенос влаги.

Часть влаги может оставаться в толще стены, накапливаясь в течение холодного периода года в её слоях, а часть в жидкой и газообразной фазах, перемещаясь в направлении воздушной прослойки,

поступает в неё. Влага, прошедшая через слои стены, разделяется на два потока. Один поток ассимилируется движущимся воздушным потоком и удаляется из прослойки. Оставшаяся влага в виде пара, перемещается в направлении поверхности облицовки.

При отрицательных температурах наружного воздуха на внутренней поверхности облицовки происходит выпадение конденсата и возможно образование инея или слоя наледи. Их образование уменьшает живое сечение прослойки, увеличивает её аэродинамическое сопротивление и снижает поток перемещаемого воздуха.

Расчёт влажностного состояния наружной стены с «вентилируемым фасадом» включает определение потока влаги диффундирующей через неё и потока воздуха движущегося в прослойке и необходимого для ассимиляции влаги.

Определение потока влаги через стену выполняется с использованием методик расчёта влажностного режима ограждений [9.23...9.32].

Однако внедрение аналитического аппарата теории влагопереноса и совместного тепло- и влагопереноса в инженерную практику сдерживается:

- отсутствием достаточного количества экспериментальных исследований по определению характеристик влагопереноса в строительных материалах;

- отсутствием удобных для практического использования аналитических решений уравнений совместного тепло- и влагопереноса.

Более широкое применение в практических расчётах, в том числе и по требованиям нормативной документации, нашли методы стационарного влажностного состояния конструкций в зимний период года, выполняемые с использованием коэффициента паропроницаемости μ , мг/(м·ч·Па). Подробное изложение указанных методик выполнено в главе 6.

Для помещений с влажным и мокрым режимами эксплуатации, имеющими теплоизолированные наружные стены с «вентилируемым фасадом», применима модель переноса влаги, в которой не учитывается термовлагопроводность и теплота фазовых переходов, а температурное поле изменяется скачкообразно, т.е. в пределах одного шага по времени оно постоянно. В основе этой модели лежит усовершенствованный В.Г. Гагариным [9.33] метод последовательного увлажнения.

Назначение воздушной прослойки в системе теплоизоляции «вентилируемый фасад» – удаление влаги, диффундирующей через стену, потоком наружного воздуха. Влагоёмкость, т.е. способность ассимилировать водяной пар, поступающего в прослойку воздуха, зависит от парциального давления и определяется его температурой и относительной влажностью

Процесс поглощения воздухом прослойки влаги наиболее доступно анализировать с использованием $h - d$ диаграммы влажного воздуха. На рис. 9.14 показана данная задача для зимних условий эксплуатации зданий.

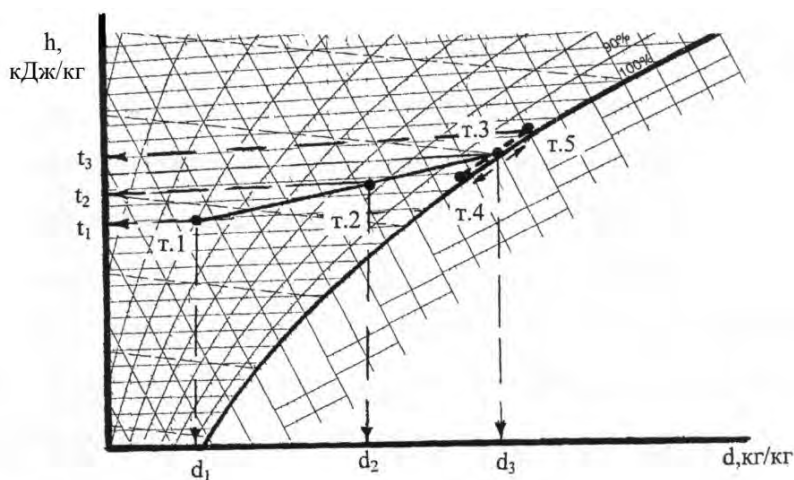


Рис. 9.14. Ассимиляция влаги воздухом вентилируемой прослойки

В прослойку поступает ненасыщенный наружный воздух (т.1). Перемещаясь в прослойке, он поглощает влагу, диффундирующую через стену, постепенно насыщаясь с повышением температуры (т.2). Фазовое состояние влаги меняется в зависимости от температуры воздуха, а также массы поступающего в него пара. С повышением парциального давления пара, изменяется степень насыщения воздуха влагой, которая постепенно приближается к максимальному насыщению (т.3). Полное насыщение воздуха влагой приводит к конденсации водяного пара на поверхностях прослойки (т.4 и т.5).

А снижение температуры поверхности ниже $t \leq 0$ °С определяет переход влаги в твёрдое состояние, к образованию инея и наледи.

Процесс ассимиляции водяного пара воздухом прослойки в $h-d$ диаграмме изображается линией, связывающей точки 1,2 и 3. А процесс конденсации пара на поверхностях прослойки – линиями 3-4 и 3-5.

Необходимый расход воздуха L , м³/ч, для ассимиляции диффундирующего водяного пара через воздушную вентилируемую прослойку, рассчитывается по выражению

$$L = \frac{j_m \cdot h_0 \cdot b}{d_{\text{вых}} - d_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot 1000}, \quad (9.20)$$

где h_0 – высота вентилируемой прослойки от входного до выходного отверстий, м;

b – ширина участка прослойки (расстояние между вертикальными прогонами), м;

$d_{\text{вых}}$ – влагосодержание воздуха на выходе из прослойки при температуре на выходе и относительной влажности воздуха $\varphi = 98$ %, г/кг с.в.;

$d_{\text{вх}}$ – влагосодержание воздуха на входе в прослойку при расчётной температуре и относительной влажности воздуха, г/кг с.в.;

$\rho_{\text{ср}}$ – средняя по высоте прослойки плотность воздуха, кг/м³, определяемая по средней температуре воздуха (формула 9.18).

Удельный поток диффундирующей влаги через наружные стены может быть определён по формуле

$$j_m = \frac{e_s - e_{np}}{R_n}, \quad (9.21)$$

где j_m – удельный поток пара, мг/(м²·ч):

e_s и e_{np} – соответственно действительное парциальное давление водяного пара с внутренней и наружной (в прослойке) сторон ограждения, Па;

$$R_n = \frac{\delta_1}{\mu_1} + \frac{\delta_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\mu_n} \text{ — сопротивление паропрооницанию «}n\text{»}$$

слоёв наружной стены, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$;

μ_n –расчётный коэффициент паропрооницания материала слоя ограждающей конструкции, $\text{мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$.

Необходимые величины парциальных давлений водяного пара определяются расчётом величин температур и относительных влажностей воздуха после построения процесса в $h-d$ диаграмме.

Относительную влажность воздуха на выходе из прослойки следует принимать равной $\varphi = 98 \%$.

Расчёты, выполненные по выше изложенной методике, показали, что в зависимости от величины удельного потока влаги через стену, толщины вентилируемой прослойки должны быть в пределах:

- при $j_m \leq 200 \dots 300 \text{ мг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $\delta_{\text{пр}} = 30 \dots 40 \text{ мм}$;
- при $j_m > 300 \text{ мг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $\delta_{\text{пр}} = 50 \dots 60 \text{ мм}$.

Сопоставление результатов расчёта и натуральных исследований позволили уточнить **минимальные толщины** «вентилируемой прослойки» для ограждений зданий с сухим и нормальным режимами эксплуатации:

- для одноэтажных зданий $\delta \geq 0,03 \text{ м}$;
- для зданий высотой до 12 м $\delta \geq 0,04 \text{ м}$;
- для зданий высотой до 26 м $\delta \geq 0,05 \text{ м}$;
- для зданий высотой больше 26 м $\delta \geq 0,06 \text{ м}$.

Толщину вентилируемой воздушной прослойки ограждений зданий с влажным и мокрым режимами эксплуатации помещений необходимо определять на основании расчёта удельного потока влаги, диффундирующей через стену, расхода воздуха на его ассимиляцию для конкретного объекта.

9.5 Выводы

1. Дополнительную теплоизоляцию ограждающих конструкций зданий следует выполнять с наружной стороны стен. Она защищает ограждение от переменного замерзания и оттаивания, выравнивает температурные колебания, сдвигает точку росы к внешней поверхности, улучшает архитектурный облик здания.

2. Проектирование наружных стен теплоизолированных по системе «вентилируемый фасад» выполняется для условий стационарного теплового режима с учётом нормативных требований. Расчёт разработан на основании рассмотрения и анализа уравнений баланса теплоты и массы для зимнего периода их эксплуатации. Основные подходы по его составлению изложены в периодических изданиях [9.13,9.18, 9.34...9.38] и сведены в «Рекомендации по теплотехническому расчёту наружных стен зданий с вентилируемой воздушной прослойкой» [9.39].

3. Определение характеристик ограждающих конструкций и «вентилируемого фасада» со сплошными защитными экранами «Тип I» выполняется для условий его движения за счёт гравитационного давления методом последовательного приближения (итераций). Критерием сходимости принята температура на внутренней поверхности защитного экрана, т.к. на её величину влияют все пересчитываемые в циклах итерации параметры (гравитационное давление, скорость движения воздуха в прослойке, коэффициенты теплообмена поверхностей прослойки и т.д.).

Литература к главе 9

9.1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). 2-ое изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.

9.2. Хамидов С.А. Теплотехнический расчёт стены с трансформируемой воздушной прослойкой. Автореферат диссертации. М., 1983. – 23 с.

9.3. Козлов В.А. Наружные ограждающие конструкции зданий с повышенной влажностью воздуха внутри помещений. Автореферат диссертации. – М., 1997. – 34 с.

9.4. Беляев В.С. Разработать предложения по методике экспериментальных исследований и расчёту теплопередачи через наружные ограждающие конструкции при фильтрации воздуха. НТО № гос. Рег. 01821017229 ЦНИИТЭП жилища. – М., 1981. – 175 с.

9.5. Хомутов А.Ф. Теплоизоляционные свойства наружных ограждений комплексного типа с применением монопанелей. В сб.

«Теплозащитные свойства наружных ограждающих конструкций зданий» – М., 1980.

9.6. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.

9.7. Батинич Радивое. Вентилируемые фасады зданий Сб. «Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях». – М.:РААСН, НИИСФ, 1999. – С.157-174.

9.8. Рекомендации по расчёту и конструированию вентилируемых стен промышленных зданий с влажным и мокрым режимами. НИИСФ. – М.:Стройиздат, 1988. – 43 с.

9.9. Ретгер Э.М. Архитектурно-строительная аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1984. – 293 с.

9.10. Серебровский В.Л. Строительная аэродинамика и аэрация населённых мест. – Челябинск, 1977. – 123 с.

9.11. СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия».

9.12. Отчёт НИР «Исследовать процесс формирования температурно-влажностного режима наружных стен с вентилируемой системой утепления с учётом влияния конструктивных и климатических факторов». Х/д 1664-237/01. – Минск, 2004. № гос.рег. 20014160, Рук. работы А.М.Протасевич.

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

9.14. Брилинг Р.Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. – М.: Стройиздат, 1948. – 120 с.

9.15. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. – М., 1969. – 138 с.

9.16. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. – М.: Высшая школа, 1974. – 318 с.

9.17. Блюджюс Р, Самаяускас Р. Воздействие движения воздуха на теплопередачу конструкций с теплоизоляцией из минераловатных плит// VI научно-практическая конференция «Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях». Сб.докл. – М., 2001. –С.183-187.

- 9.18. Протасевич А.М. Фильтрация воздуха в стенах зданий с вентилируемым фасадом/А.М. Протасевич, А.Б. Крутилин//Строительные материалы. 2006. – 11. – С.2-4.
- 9.19. Мачинский В.Д. Теплотехнические основы строительства/В.Д. Мачинский. – М.Госстройиздат, 1949. – 327 с.
- 9.20. Лукьянов В.И. Метод расчёта влажностного состояния наружных ограждений с вентилируемой воздушной прослойкой/В.И.Лукьянов//Сборник трудов института. Исследование теплозащиты зданий/НИИСФ. –М., 1983. – С. 84-93.
- 9.21. Хомутов А.Ф. Инженерный метод расчёта наружных стен зданий с периодически вентилируемой прослойкой. В кн. «Исследования теплозащиты зданий». Сборник трудов НИИСФ. – М., 1983. – С.32-39.
- 9.22. Программа TEMPER – 3D:разработана в лаборатории «Аэродинамических и теплопрочностных исследований». – Омск: ЛАПТИ. – 2001.
- 9.23. Фокин К.Ф. Расчёт последовательного увлажнения материалов и наружных ограждений. Вопросы строительной теплофизики в проектировании, ЦНИИПС, 1941. №2. – С.2-18.
- 9.24. Фокин К.Ф. Уточнённый метод расчёта влажностного режима ограждающих конструкций. Холодильная техника, 1955. № 3. – С.28-32.
- 9.25. Ильинский В.М. Расчёт влажностного состояния ограждающих конструкций при диффузии водяного пара. Промышленное строительство. 1965, №2. – С.223-228.
- 9.26. Ушков Ф.В. Метод расчёта увлажнения ограждающих частей зданий. –М., 1955. –104 с.
- 9.27. Франчук А.У. Вопросы теории и расчёт влажности ограждающих частей зданий. – М., 1957. – 188 с.
- 9.28. Табунщиков Ю.А. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений//Табунщиков Ю.А., Хромец Д.Ю., Матросов Ю.А. – М.:Стройиздат, 1986. – 378 с.
- 9.29. Богословский В.Н. Тепловой режим зданий. – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.
- 9.30. Богословский В.Н. Шкала относительного потенциала влажности и её использование для оценки влажностного режима ограждений./Богословский В.Н., Тертичник Е.И.//Научные труды МИСИ. – М., 1970. №68.

9.31. Перехоженцев А.Г. Вопросы теории и расчёта влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций. – Волгоград, 1977. – 272 с.

9.32. Руководство по расчёту влажностного режима ограждающих конструкций зданий. – М.: Стройиздат, 1984. – 165 с.

9.33. Гагарин В.Г. Теория состояния переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий. Автореферат диссертации д.т.н. – М., 2000. – 47 с.

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

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

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

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

9.38. Протасевич А.М. Некоторые результаты расчётов приведенного сопротивления теплопередаче наружных стен зданий с повышенным уровнем защиты/ А.М.Протасевич, А.Б. Крутилин//Строительная физика. Системы обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях. Сборник докладов. – М., 2014. С.54-59.

9.39. Рекомендации по теплотехническому расчёту наружных стен зданий с вентилируемой воздушной прослойкой. Р1.04.0000.05. – Минск. –2005.

9.40. ТКП 45-2.04-43-2006. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования. – Минск.–2014.

9.41. ТКП 45-3.02-113-2009 (02250). Тепловая изоляция наружных ограждающих конструкций зданий и сооружений. Строительные нормы проектирования. – Минск. -2009.

ГЛАВА 10. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗДАНИЙ С «ТЕПЛЫМИ» ЧЕРДАКАМИ

10.1 Общие положения

Одним из направлений повышения энергоэффективности зданий является утилизация теплоты удаляемого воздуха с использованием «теплого» чердака. Их устройство дает определенные преимущества при эксплуатации зданий за счет упрощения конструкции покрытия, предотвращение теплопотерь через перекрытие верхнего этажа, удобство обслуживания инженерных коммуникаций, а эксплуатация позволяет получить экономию теплоты до 15%.

Наиболее часто «теплый» чердак устраивается в жилых крупнопанельных зданиях, имеющих 9 и более этажей. «Теплый» чердак монтируется на планировочную секцию дома из сборных железобетонных элементов. Ее чердачное пространство, используется как сборная вентиляционная камера статического давления, в которую открываются все вентиляционные вытяжные каналы, и воздух из которой удаляется через его общую вентиляционную шахту (рис. 10.1).

«Теплый» чердак состоит из внутреннего помещения и ограждающих конструкций. Для обеспечения воздухоудаления чердачное помещение выполняется в виде единого герметичного объема в пределах планировочной секции дома. Естественная вытяжная вентиляция обеспечивается, как правило, с применением вытяжных стояков из унифицированных вентиляционных блоков со сборными магистральными каналами на высоту здания и каналами-спутниками на высоту одного-двух этажей. Выпуск удаляемого теплого воздуха осуществляется через оголовки вентиляционных стояков, размещенных в различных участках чердака и на разных расстояниях от вытяжной шахты, находящейся, как правило, в центральной части у стен лестничных клеток или машинного помещения лифта.

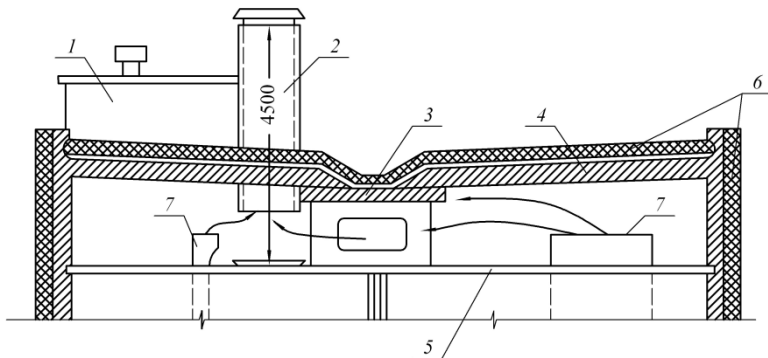


Рис. 10.1. Схема тёплого чердака:

- 1 – машинное помещение лифта; 2 – вытяжная вентиляционная шахта;
 3, 4 – плита покрытия; 5 – плита чердачного перекрытия; 6 – теплоизоляция;
 7 – оголовок вентиляционного блока

Ограждающие конструкции чердака включают покрытие, наружные стены и чердачное перекрытие. Покрытие и наружные стены имеют теплоизоляцию, обеспечивающую поддержание внутри его объема температуры воздуха не менее $t = 14^{\circ}\text{C}$. Перекрытие чердака дополнительной теплоизоляции не имеет.

В процессе эксплуатации зданий с «теплыми» чердаками часто возникают проблемы. Они связаны с нарушением нормативных воздухообменов помещений, особенно в квартирах верхних этажей, «опрокидыванием» потока воздуха в каналах вытяжных стояков и шахты. Указанные проблемы особенно заметны в зданиях повышенной этажности – выше 12 этажей.

Результаты многочисленных обследований зданий с «теплыми» чердаками показали, что причинами неудовлетворительной работы систем естественной вытяжной вентиляции являются ошибки, как в проектировании этих систем, так и входе строительства и эксплуатации [10.1]. Проведенные натурные экспериментальные исследования на эксплуатируемых и вводимых в эксплуатацию зданиях серии 464-VI, M464-M и 111-90 и др. позволили определить некоторые из них.

Наиболее нестабильно происходит удаление воздуха через каналы-спутники верхних этажей зданий. Измерение скорости воздуха в сборном канале и каналах-спутниках, выполненные одновременно в квартирах и на «теплом» чердаке, выявили изменение ее в пределах

от 0 до 2,5 м/с при периодическом опрокидывании циркуляции потока или полном его отсутствии.

Второй причиной является неправильный подбор поперечного сечения, высоты сборных вытяжных шахт, формы и сечения выбросных отверстий, значительно снижающих располагаемое давление в системе естественной вытяжной вентиляции. Чрезмерная интенсификация воздухоудаления из квартир нижних этажей создает условия для формирования областей повышенного давления над стояками вытяжных систем вентиляции, что ухудшает удаление воздуха из квартир верхних этажей и, часто влечет за собой задувание воздуха из «тёплого» чердака в квартиры.

Из-за нарушения герметизации помещений «тёплого» чердака наблюдаются поступления холодного наружного воздуха, влекущие ухудшение его тепловлажностного и аэродинамического режимов и сокращающие полезную производительность вытяжной шахты.

При проектировании сборных вытяжных шахт в большинстве случаев не учитывается аэродинамика формы кровли здания и аэродинамика самого здания, что приводит к «опрокидыванию» вентиляции и поступлению холодного воздуха в квартиры.

Строительные дефекты чердака связаны, главным образом, с высокой воздухопроницаемостью ограждающих конструкций, что в одинаковой мере присуще как панельным, так и кирпичным зданиям. В процессе эксплуатации не обеспечивается герметизация открывающихся проемов «теплого» чердака.

Проблемы вентиляции, а, следовательно, микроклимата квартир, вследствие указанных причин инициировало проведение комплексных научно-исследовательских и конструкторских работ с целью:

- повышения располагаемого давления в системе «вентиляционный стояк – чердак – вытяжная шахта»;
- исследования аэродинамического режима внутреннего пространства «теплого» чердака;
- увеличения производительности и напора вытяжных шахт;
- исключения влияния потока воздуха, выходящего из сборного магистрального канала на потоки из каналов-спутников.

В основу методик проведенных работ положено выполнение натурных исследований на эксплуатируемых зданиях и физическое моделирование аэродинамических режимов зданий в лабораторных условиях [10.1...10.3].

10.2 Моделирование воздушного режима «теплых» чердаков жилых зданий

10.2.1 Приближенное моделирование аэродинамического режима систем вентиляции жилых домов

Методы моделирования физических процессов, основанные на теории подобия и анализа размерности, широко используются в научных исследованиях.

В настоящее время разработаны методики приближенного моделирования многих вентиляционных процессов: аэрации зданий; механической вентиляции цехов со значительными избытками теплоты, влаги, вредных веществ, местных отсосов и воздухораспределителей; воздушного душирования и др. При разработке указанных методик в основном использованы принципы приближенного моделирования [10.4, 10.5, 10.7].

Метод приближенного моделирования предусматривает создание модели, которая более проста, чем изучаемое здание. При этом необходимо установить область применения разработанной методики, величину возможной ошибки, которая не должна выходить за пределы точности решения поставленной задачи.

Анализируя результаты ранее выполненных исследований на моделях, сделан вывод, что при моделировании вентиляционных процессов необходимо учитывать:

- режим течения;
- неизотермичность течения;
- степень стеснения течения.

1. Режим течения жидкости определяется критерием Рейнольдса. При моделировании вентиляционных процессов необходимо соблюдать условие [10.10, 10.11]:

$$Re = idem. \quad Re_M = Re_n \quad \left(\frac{v \cdot l}{\nu} \right)_M = \left(\frac{v \cdot l}{\nu} \right)_n$$

где v – скорость движения потока, м/с;
 l – характерный размер, м;
 ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Для создания в модели полного подобия поля скоростей потока воздуха необходимо моделировать не только изучаемый участок, но и вентиляционные каналы по которым удаляется воздух из квартир. Однако в модели можно искусственно создать только условия подобные натуре.

Экспериментально установлено, что, начиная с определенной величины критерия Re , основные характеристики турбулентного течения не зависят от Re . Автомодельность, т.е. независимость наблюдается при $Re > 10^5$.

При температуре воздуха $t_b = 16^\circ\text{C}$, коэффициент кинематической вязкости равен $\nu = 14,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Тогда
$$Re = 10^5 = \frac{\nu \cdot 1,2}{14,6 \cdot 10^{-6}}, \text{ а } \nu = 1,216 \text{ м/с.}$$

При скорости воздуха $\nu > 1,216 \text{ м/с}$ в аэродинамической трубе будет соблюдаться автомодельность турбулентных течений.

При этом отпадает условие $Re = idem$, что значительно упрощает проведение опытов.

2. Характер течения в пограничном слое неизотермических потоков определяется величиной критерия Релея, представляющим собой произведение чисел Грасгоффа и Прандтля

$$Ra = Gr Pr = \frac{g l^3}{\nu a} \beta \Delta T,$$

где $Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля;

l – характерный размер, м;

g – ускорение силы тяжести, $\text{м}^2/\text{с}$;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

β – коэффициент объемного расширения, $1/\text{К}$;

ΔT – разность температур, К.

Исследования показывают, что при значениях $GrPr \geq 10^6$ неизо-

термическая струя становится полностью турбулентной [10.10]. Т.е. при изучении неизотермических течений, необходимо, чтобы выполнялось условие

$$Gr Pr = idem .$$

Но так как при моделировании обтекания чердака и шахт будут использованы изотермические течения, выполнение условия $Gr Pr = idem$ не требуется.

3. Характеристики струй, зависят от степени стесненности области их распространения (H_k / d_o), где H_k – ширина камеры, d_o – диаметр приточного отверстия.

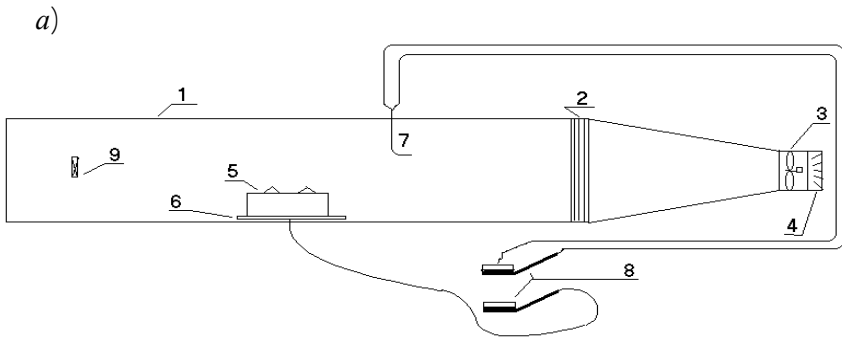
Для того, чтобы при моделировании не сказывалась стесненность камеры, необходимо выполнение условия:

$$h_m / h_{3d} \leq 1/10.$$

$$l_k / d_o \geq 10.$$

На основании вышеизложенных требований, для проведения исследований создан экспериментальный стенд, схема которого представлена на рис. 10.2.

Стенд представляет аэродинамическую трубу прямоугольного сечения 1, внутри которой размещена платформа 6 с моделью здания 5. Платформа поворотная, что обеспечивает возможность моделирования воздействия ветра различной направленности. Движение воздуха в трубе обеспечивается осевым вентилятором 3. Регулирование скорости воздушного потока осуществляется установкой кольцевых диафрагм 4, а выравнивание скоростного поля – решёткой 2. Измерение скорости воздуха проводится крыльчатый анемометром 9 (ГОСТ 6376-74) и термоанемометром с характеристиками, соответствующими ГОСТ 8361-79. Измерение давления в сечениях трубы и модели вентиляционной шахты выполняется микроманометрами 8 модели ММН (ГОСТ 11161-71). Погрешность при измерении перепада давлений воздуха $\pm 1\%$. Микроманометр соединен с датчиками при помощи резиновых шлангов.



б)



Рис. 10.2. Схема установки для аэродинамических испытаний модели здания:
а – схема стенда; *б* – общий вид измерительного участка

Площадь поперечного сечения трубы выбрана, исходя из условия выполнения задачи обтекания тела безграничным потоком, т.е. площадь миделевого сечения модели не превышает 10% площади поперечного сечения рабочей части трубы.

10.2.2 Экспериментальная проверка принятой методики приближенного моделирования

Проверка принятых принципов приближенного моделирования выполнена путем исследования вентиляционных шахт вытяжных систем жилых зданий серии М 464М. Эксперимент осуществлен с целью сравнения результатов стендовых лабораторных исследований на модели и натурных исследований на эксплуатируемом здании. Для натурных измерений выбран жилой дом по адресу Алибегова, 14 в г.Минске. План покрытия секции дома с расположением вентиляционных шахт приведен на рис. 10.3.

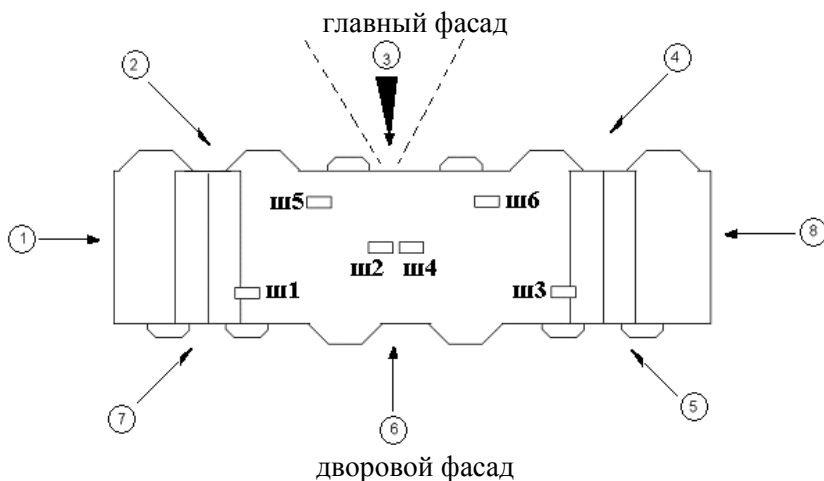


Рис. 10.3. План секции здания с указанием направлений ветра
⑤ – направления ветра; ш1, ш2,... – вытяжные шахты;
штриховыми линиями обозначено направление ветра в период
натурного эксперимента

Исследования состояли в определении величин статического давления на выбранных участках покрытия эксплуатируемого здания и в тех же точках на модели. При этом скорость и направление воздушного потока на покрытии здания и при стендовых испытани-

ях были идентичными. Одновременно определялись давление, скорость и направление ветровых потоков.

Результаты измерений представлены на рис. 10.4 и 10.5, где указаны точки проведения измерений и значения перепада давлений между точками в условиях стенда и в натуральных условиях в Па.

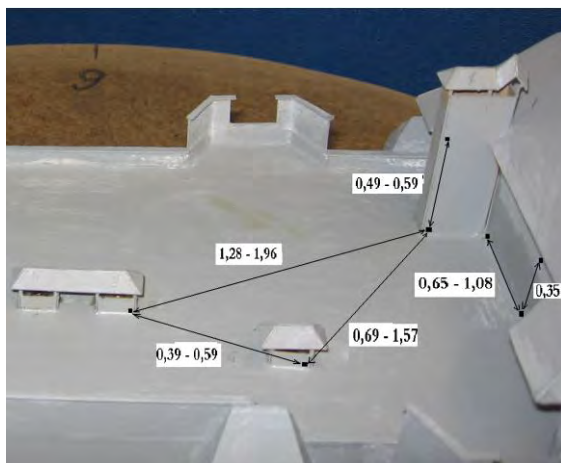


Рис. 10.4. Фиксированные точки измерений и значения перепада давлений между ними, полученные в натуральных условиях

Из анализа результатов сравнительных измерений видно, что натурные и стендовые значения перепадов давлений достаточно близки между собой. Различия связаны с тем, что во время натуральных измерений направление ветра изменялось в диапазоне до 15° от направления 3 (рис. 10.3) в сторону направления 4, а скорость ветра 2,4 м/с является средней величиной. Т.е. происходили пульсирующие изменения направления и скорости ветра. Пульсации ветра являются не только следствием непостоянства скорости ветра, но и определяются расположением здания в условиях городской застройки. В условиях стендовых измерений учесть все непредсказуемые изменения аэродинамики ветрового потока невозможно как по причине сложного механизма пульсаций скорости ветра, так и по расположению здания в застраиваемом районе города с изменяющейся аэродинамикой ветрового потока. Вследствие этого величины давлений в фиксированных точках, измеренные на модели здания, на

аэродинамическом стенде, можно считать идентичными значениям, полученным при натурных экспериментах.

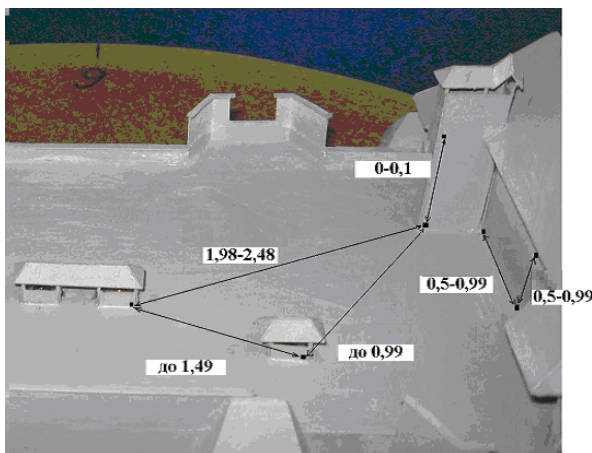


Рис. 10.5. Участки проведения измерений и значения перепада давлений между точками в условиях стенда

Проведенный эксперимент показывает возможность выполнения исследований с использованием приближенного моделирования для получения результатов, качественно характеризующих изучаемые объекты.

10.2.3 Модель «теплого» чердака зданий серии 464-У1

Стендовые экспериментальные исследования аэродинамического режима «теплого» чердака выполнены на модели чердачного помещения одной секции типового панельного жилого дома серии 464-У1. Модель изготовлена в масштабе 1:20. Масштаб был выбран максимально возможным из условий обеспечения приближенного моделирования. Общий вид модели представлен на рисунке 10.6, а принципиальная схема – на рис. 10.7.

Модель состоит из двух основных частей: камеры статического давления 6 и модели секции «теплого» чердака 9. В камере статического давления располагается воздуховод равномерной раздачи 5 и четыре вентиляционных стояка 7.



Рис. 10.6. Внешний вид модели чердака с камерой статического давления

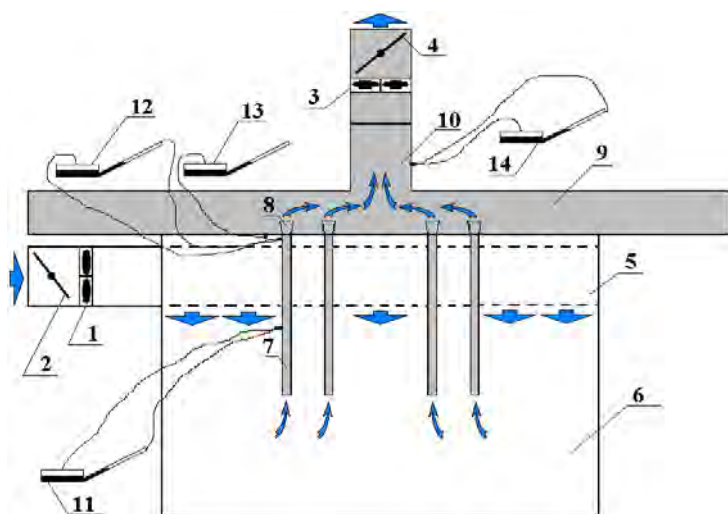


Рис. 10.7. Схема модели «теплого» чердака:

- 1, 3 – вентиляторы; 2, 4 – воздушные заслонки; 5 – воздуховод равномерной раздачи; 6 – камера статического давления; 7 – вентиляционные стойки; 8 – оголовки вентиляционных стоек; 9 – модель помещения «теплого» чердака; 10 – сборная вентиляционная шахта; 11, 12, 13, 14 – микроманометры

В объеме «теплого» чердака 9 расположены оголовки вентиляционных блоков 8 и сборная вентиляционная шахта 10. Движение воздуха обеспечивается вентиляторами 2 и 3, а регулирование – воздушными заслонками 2 и 4. Модель оснащена датчиками для измерения полного и статического давления в сборных каналах стояков, каналах-спутниках и в различных участках объема «теплого» чердака. Измерения производятся с использованием дифференциальных микроманометров, соединяющихся с датчиками импульсными трубками. Покрытие модели «теплого» чердака из прозрачного стекла, что позволяет фиксировать характер и направление воздушных потоков в объеме «теплого» чердака, как при помощи задымления, так и размещением в объеме модели закрепленных с одного конца, свободно свисающих нитей.

Эксперимент проводится в следующей последовательности. Воздух вентилятором подается в воздуховод равномерной раздачи и распределяется по объему камеры статического давления. Из камеры воздух поступает в приемные отверстия сборных каналов вентиляционных стояков, откуда, через оголовки блоков, выходит в объем чердака. Из объема «теплого» чердака воздух удаляется вентилятором через сборную вентиляционную шахту. Регулирование расхода воздуха и давления в объеме модели чердака осуществляется воздушными заслонками, а так же поочередным или же одновременным включением вентиляторов.

В исследуемой модели представлены две группы вентиляционных стояков, различающиеся условиями входа воздуха в сборные магистральные каналы: одна группа - вентстояки I и IV, вторая – вентстояки II и III (рис. 10.8). Вентстояки I и IV расположены на удалении один от другого, и всасывающий факел одного стояка не влияет на всасывающий факел другого стояка. Вентстояки II и III расположены вплотную один к другому, и всасывающий факел одного стояка может оказывать влияние на всасывающий факел соседнего стояка. Для предотвращения влияния одного факела на другой входные отверстия II-го и III-го вентиляционных стояков разделены вертикальными пластинами. Для создания идентичности всасывающих факелов всех вентиляционных стояков модели, аналогичные пластины были установлены и на вентиляционные стояки I и IV.

На модели «теплого» чердака выполнены эксперименты по изучению аэродинамических режимов для различных условий эксплуатации, когда:

- объем удаляемого сборной вытяжной шахтой воздуха равен воздухопоступлению его в «теплый» чердак (расчетный режим для системы вытяжной вентиляции);

- объем удаляемого сборной вытяжной шахтой воздуха превышает воздухопоступление его в «теплый» чердак (производительность шахты значительно увеличена под ветровым воздействием, или же воздухопоступление в объем чердака значительно ниже расчетного);

- объем удаляемого сборной вытяжной шахтой воздуха меньше воздухопоступления в объем «теплого» чердака (производительность шахты значительно снижена под ветровым воздействием, или же воздухопоступление в чердак значительно выше расчетного).

Наличие в модели проемов, имитирующих наружные дверные проёмы, позволяет изучать влияние подсосов воздуха через них в объем «теплого» чердака (рис. 10.8).

В объеме «теплого» чердака при проведении исследований моделировались различные режимы подачи воздуха:

- одновременная подача воздуха вентиляторами 1 и 3;
- разрежение – доминирование вытяжки вентилятором 3;
- подпор воздуха – доминирование подачи вентилятором 1.

В процессе эксперимента выполнялись следующие измерения:

- полного и статического давления в сборных магистральных каналах вентиляционных стояков I, II, III и IV (рис. 10.8 позиции 2 и 3);

- статического давления в устьях сборных магистральных каналах вентиляционных стояков I, II, III и IV (рис. 10.8, позиция 6);

- статического давления в устьях каналов-спутников вентиляционных стояков I, II, III и IV (рис. 10.8, позиции 4, 5, 7, 8);

- статического давления в объеме «теплого» чердака рядом с оголовками вентиляционных блоков (рис. 10.8, позиция 1);

- статического давления в крайних угловых частях «теплого» чердака (рис. 10.8, позиции 10, 11, 12, 13);

- статического давления в объеме «теплого» чердака у места входа воздуха в сборную вентиляционную шахту (рис. 10.7, позиция 9).

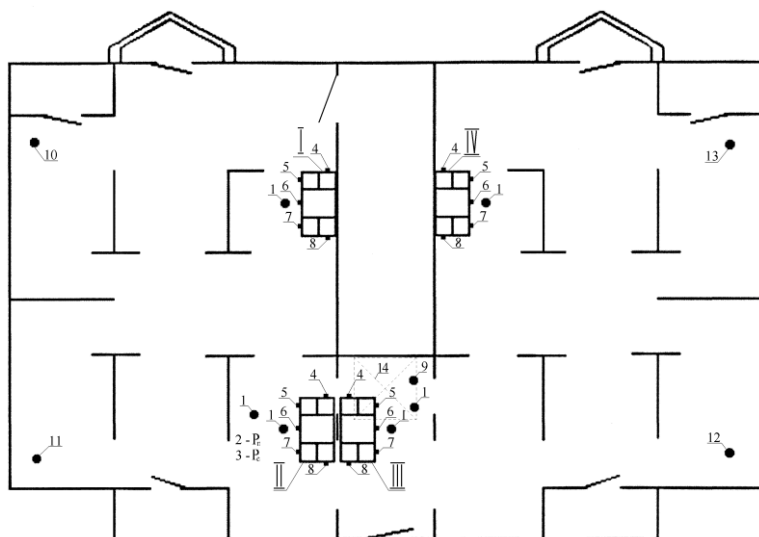


Рис. 10.8. План модели «теплого» чердака с указанием точек измерения:

I, II, III, IV – номера вентиляционных стояков;

1 – места измерения статического давления рядом с оголовками вентиляционных блоков; 2, 3 – измерение полного и статического давлений (соответственно) в сборном канале вентиляционного стояка (место подключения на плане не показано); 4, 5, 7, 8 – места измерения статического давления в устьях каналов-спутников вентиляционных стояков; 6 – места измерения статического давления в устьях сборных каналов вентиляционных стояков; 9 – место измерения статического давления в помещении «теплого» чердака под сборной вытяжной шахтой; 10, 11, 12, 13 – места измерения статического давления в крайних угловых частях помещения «теплого» чердака; 14 – место расположения сборной вытяжной шахты

Измерения на модели проводились при фиксированных величинах давлений воздуха в вытяжной шахте. Пределы его изменения в шахте определялись возможностями регулирования потока воздуха заслонками. В режиме разрежения величина давления составляла до $P_{\text{ш}} = -20$ Па. При нагнетании воздуха – $P_{\text{ш}} = 1,8$ Па, а при совместной работе вентиляторов на нагнетание и вытяжку – $P_{\text{ш}} = -10$ Па.

Результаты проведенных исследований формирования полей давлений в объеме «теплого» чердака при различных скоростях выхода воздушного потока из устьев сборных каналов вентиляционных стояков при режимах разрежения (доминирование вытяжки воздуха

из объема «тёплого» чердака) и подпора воздуха (доминирование подачи воздуха в объем «тёплого» чердака) представлены на рис. 10.9...10.12.

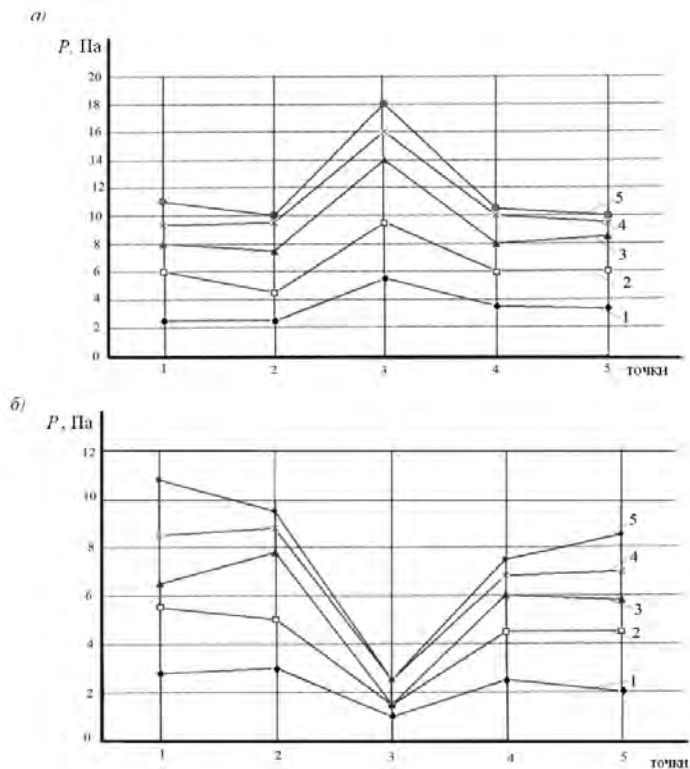


Рис. 10.9. Статическое давление на выходе из каналов стояков в зависимости от скорости воздуха в вытяжной шахте при нагнетании:

<i>a</i> – стояк I;		<i>б</i> – стояк II	
1 —◆—	0,57 м/с	2 —□—	0,81 м/с
3 —▲—	1,07 м/с	4 —×—	1,14 м/с
5 —◆—	1,27 м/с		

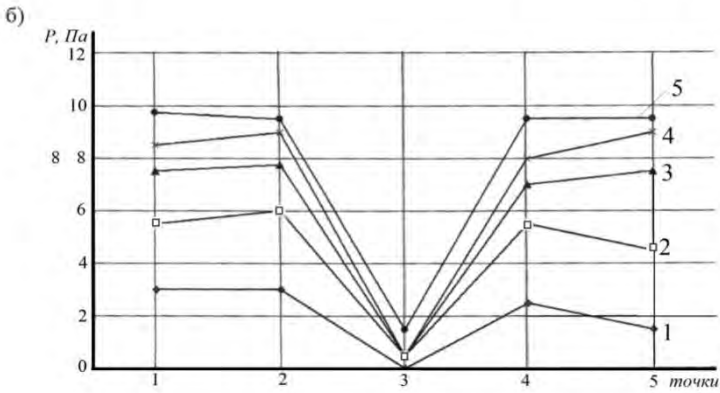
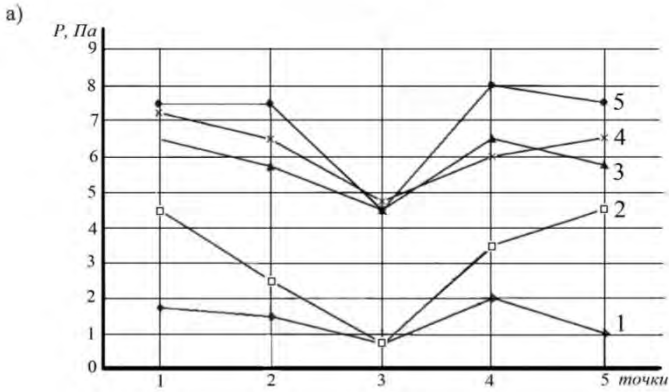
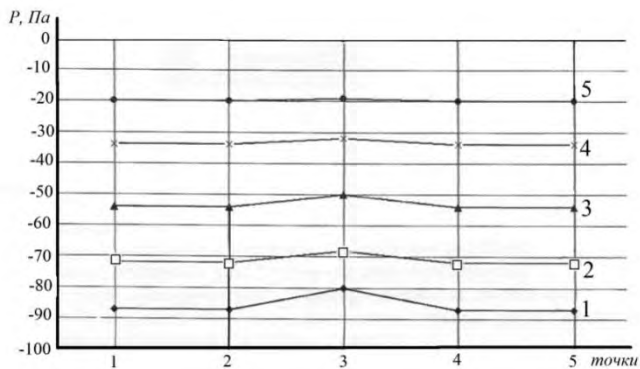


Рис. 10.10. Статическое давление на выходе из каналов стояков в зависимости от скорости воздуха в вытяжной шахте при нагнетании:

- а – стояк III; б – стояк IV
- | | | |
|---|---|----------|
| 1 | ◆ | 0,57 м/с |
| 2 | □ | 0,81 м/с |
| 3 | ▲ | 1,07 м/с |
| 4 | × | 1,14 м/с |
| 5 | ● | 1,27 м/с |

а)



б)

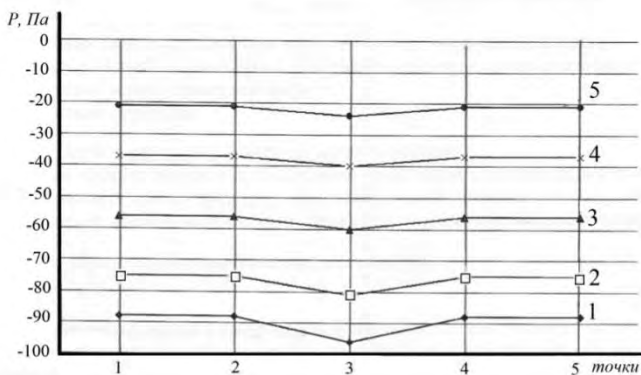


Рис. 10.11. Статическое давление на выходе из каналов стояков в зависимости от скорости воздуха в вытяжной шахте при вытяжке:

а – стояк I; б – стояк II

- | | |
|--------------|----------|
| 1 —◆— | 0,57 м/с |
| 2 —□— | 0,81 м/с |
| 3 —▲— | 1,07 м/с |
| 4 —×— | 1,14 м/с |
| 5 —●— | 1,27 м/с |

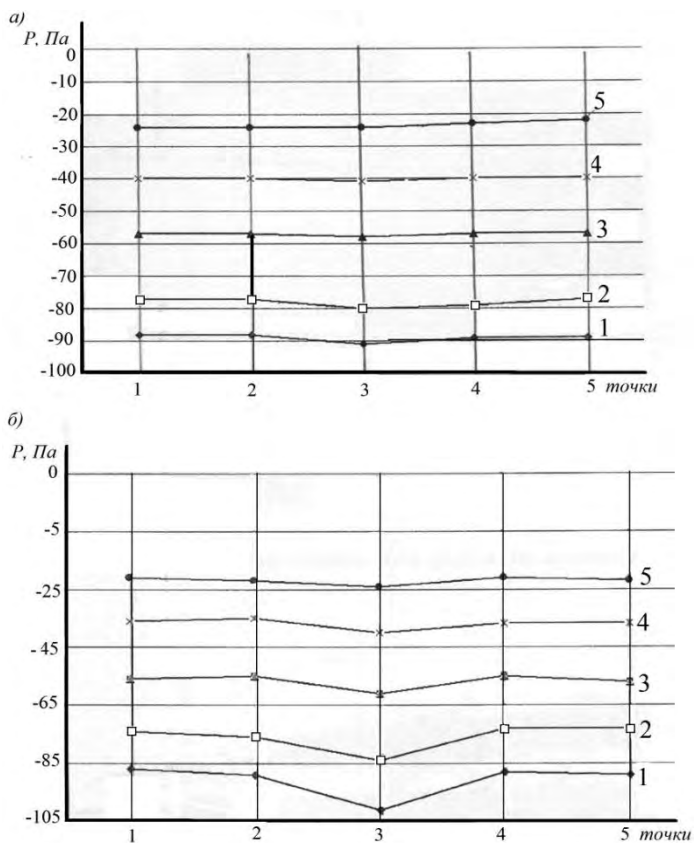


Рис. 10.12. Статическое давление на выходе из каналов стояков в зависимости от скорости воздуха в вытяжной шахте при вытяжке:

a – стояк III; *б* – стояк IV

1 ◆	0,57 м/с
2 □	0,81 м/с
3 ▲	1,07 м/с
4 ×	1,14 м/с
5 ●	1,27 м/с

На графиках точка 3 соответствует величинам статического давления, измеренным в устьях сборных магистральных каналов стояков, а точки 1, 2, 4, 5 – вытяжным каналам-спутникам.

Измерения проводились при скоростях воздуха в вытяжной шахте, изменяющихся в пределах от 0,22 до 0,81 м/с в режиме разрежения (вентилятор 3) и 0,57...1,27 м/с в режиме нагнетания (вентилятор 1).

При анализе графических зависимостей следует учитывать, что более низкое давление в канале-спутнике по отношению к магистральному каналу означает эжекцию воздуха из него, а более высокое – задувание воздуха из помещения «теплого» чердака в устье канала-спутника (или подпор).

Представленные результаты показывают, что эжекция воздуха из каналов-спутников наблюдается только для стояка №I в режимах всасывания и нагнетания. Для вентиляционных стояков №II, №III и №IV зафиксирован подпор каналов-спутников как в режиме всасывания, так и нагнетания.

Результаты исследований перепадов статических давлений между каналами-спутниками для каждого из стояков модели секции чердака при различных режимах продувки на стенде представлены в табл. 10.1

Таблица 10.1

Выборка максимальных перепадов статического давления между каналами-спутниками стояков

Номера стояков	Номера каналов	Разряжение	Совместная работа	Нагнетание
		ΔP , Па	ΔP , Па	ΔP , Па
Стояк I	4-8	0,195	0,097	0,147
	5-7	0,294	0,342	0,293
Стояк II	4-8	0,684	0,586	0,440
	5-7	0,586	0,391	0,391
Стояк III	4-8	0,195	0,098	0,195
	5-7	0,195	0,098	0,147
Стояк IV	4-8	0,293	0,098	0,293
	5-7	0,293	0,195	0,195

Сопоставление измеренных величин перепадов статического давления показывает их разброс в зависимости от размещения стояков по отношению к вытяжной шахте. Максимальные перепады измерены на стояке II, минимальные – на стояке III. Анализ полученных данных указывает на влияние формирования полей давлений потоков воздуха, перемещающихся над стояками к вытяжной шахте.

Проведенные экспериментальные исследования на модели чердака позволяют сделать следующие выводы:

- «теплый» чердак, исследуемой конструкции, не является камерой статического давления, как это предполагается при разработке проектов вентиляции зданий;

- вытекающий из сборного магистрального канала стояка воздух существенно влияет на формирование поля давлений и на давление в каналах-спутниках;

- влияние струи воздуха, вытекающего из сборного канала, может проявляться как в виде эжекции воздуха, так и в виде подпора потока из каналов-спутников;

- аэродинамические процессы, протекающие в объеме «теплого» чердака сложны и переменчивы и зависят как от величины располагаемого давления, так и от его знакопеременности, «разряжение» или «подпор»; на эксплуатируемых объектах это будет определяться наличием или отсутствием ветра – задуванием наружного воздуха в помещение чердака; герметичностью окон в квартирах здания;

- для «теплого» чердака, характерно возникновение пульсаций давлений с перераспределением расходов воздуха через вентиляционные стояки.

На основании результатов экспериментальных измерений и анализа видеосъемки движений задымленных воздушных потоков в модели «теплого» чердака, а также результатов натурных обследований на эксплуатируемых зданиях следует отметить следующие недостатки «теплого» чердака жилых домов серии 464 У1:

- сборная вентиляционная шахта расположена таким образом, что с одной стороны чердачного помещения к ней протекает 75 % объема воздуха, с другой стороны 25 %, что усиливает вихреобразование в чердачном помещении и увеличивает потери давления системы естественной вытяжной вентиляции здания;

- воздух, выходящий из вентиляционных стояков II и III, расположенных вплотную к сборной шахте, практически полностью исключается из теплового баланса чердака, что приводит к резкому снижению температуры внутреннего воздуха в торцевой наружной части чердачных помещений крайних секций здания;

- стояк II, расположенный около сборной шахты за перегородкой, находится под непосредственным (лобовым) воздействием потока воздуха, движущегося от стояка I к сборной шахте;

- стояк III, расположенный вплотную к сборной шахте, находится под воздействием сильных вихрей при слиянии потоков воздуха от всех стояков у входа в сборную шахту;

- каналы – спутники вентиляционных стояков зачастую находятся в области подпора от повышения давления в результате торможения о потолок чердака воздушного потока выходящего из магистрального канала стояка, или же под воздействием вихрей от эжектирования этим потоком воздуха из чердачного помещения.

10.3 Повышение располагаемого давления вытяжных шахт «теплых» чердаков

10.3.1 Аэродинамические исследования на модели вытяжной шахты

На повышение стабильности эксплуатации «теплых» чердаков значительное влияние оказывают производительность и величины располагаемого давления вытяжной шахты. Ее конструктивные особенности определяют потери давления, а, следовательно, и объем удаляемого воздуха. Оценка аэродинамических особенностей эксплуатируемых вытяжных шахт «теплых» чердаков и последующее повышение их напора, позволяет улучшить эффективность работы всей системы вентиляции.

Исследования были проведены на системах вытяжной вентиляции 10-этажных жилых зданий серии 464 V/1. Они включали стендовые испытания на моделях вытяжных шахт «теплого» чердака и натурные исследования на эксплуатируемых зданиях.

Внешний вид сборной вытяжной шахты зданий указанной серии представлен на рис. 10.13. Особенностью конструкции шахты явля-

ется наличие выходных отверстий ее оголовка, выполненных в форме полукруга и закрытых жалюзийными решетками.

Конструкция оголовка шахты характеризуется повышенным сопротивлением потоку удаляемого воздуха, что вызывает нестабильность эксплуатационных характеристик шахты и системы вентиляции.

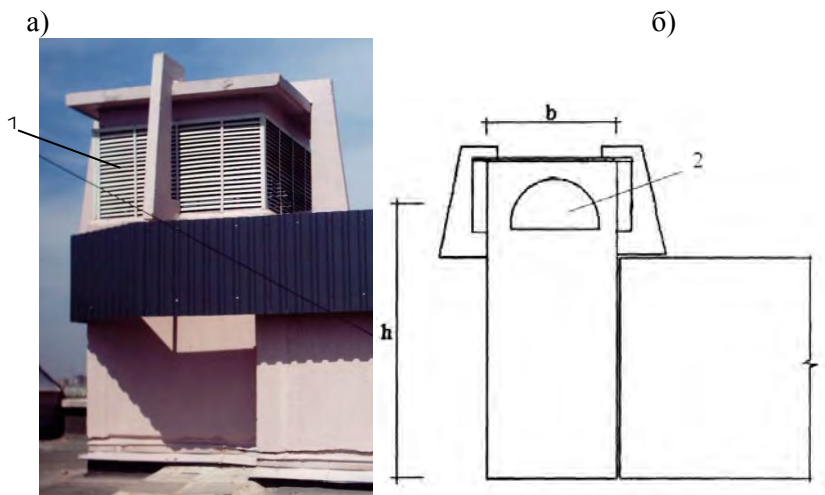


Рис. 10.13. Вытяжная вентиляционная шахта «теплого» чердака:

a – общий вид; *б* – схема оголовка

1 – жалюзийная решетка; *2* – выходное отверстие

Исследования по повышению напора вытяжной шахты зданий с «теплыми» чердаками проводились на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рис. 10.2. Для проведения исследований изготовлена модель покрытия чердака здания с вентиляционной шахтой и помещением машинного отделения лифта. При изготовлении моделей вытяжных шахт и проведении исследований выполнялись следующие условия приближенного моделирования.

1. Автомодельность течения воздушного турбулентного потока в трубе при $Re \geq 10^5$.
2. Изотермическое обтекание модели шахты потоком воздуха, что позволило исключить требование $Gr \cdot Pr = idem$.
3. Обеспечение свободного, не стесненного режима течения воздуха в месте размещения модели, при $h_m / h_a = 1/10$,

где h_m – определяющий размер модели, м;
 h_a – определяющий размер по сечению аэродинамической трубы, м.

4. Масштаб скорости в аэродинамической трубе для принятых условий моделирования равен $C_v = 0,2236$, а скорости воздушного потока в процессе исследований должны быть в пределах $v_m = 0,3 \dots 2,1$ м.

Предварительно на стенде были проведены аэродинамические испытания модели оголовка с дефлекторами различных форм и конструкций, в том числе ЦАГИ и Вентури. По результатам исследований выбрана конструкция прямоугольного дефлектора наиболее отвечающая форме оголовка.

Результаты исследований, проведенные на моделях существующей вытяжной шахты «теплого» чердака и шахты с дефлектором при различных воздействиях ветрового давления сведены в табл. 10.2 и 10.3. Под цифрами 1, 2, 3, 4 и 5 в таблицах указаны направления потоков воздуха в соответствии со схемой, представленной на рис. 10.14.

Таблица 10.2

Результаты исследований величины располагаемого давления на модели существующей вытяжной шахты зданий серии 464 У1

v , м/с	ΔP_b , Па					$\Delta \bar{P}$, Па
	1	2	3	4	5	
0,3	0	0	0,14662	0,14662	0	0,058648
0,6	0	0	0,14662	0,14662	0	0,058648
0,9	0	0,14662	0,439861	0,439861	0,14662	0,175944
1,3	0,14662	0,439861	0,586481	0,586481	0,439861	0,439861
1,7	0,29324	0,586481	0,879722	0,879722	0,586481	0,645129
2,1	0,43986	1,026342	1,319582	1,319582	1,172962	1,055666

Таблица 10.3

Результаты исследований величины располагаемого давления на модели вытяжной шахты с дополнительно установленным дефлектором

v, м/с	ΔP , Па					$\overline{\Delta P}$, Па
	1	2	3	4	5	
0,3	0,14662	0,293241	0,439861	0,439861	0,293241	0,32256
0,6	0,14662	0,439861	0,586481	0,586481	0,293241	0,41053
0,9	0,29324	0,586481	0,733101	0,733101	0,586481	0,58648
1,3	0,43986	0,733101	1,026342	1,172962	0,879722	0,85039
1,7	0,29324	0,586481	1,026342	1,172962	0,733101	0,76242
2,1	0,73310	1,466203	2,052684	2,199304	1,759443	1,64214

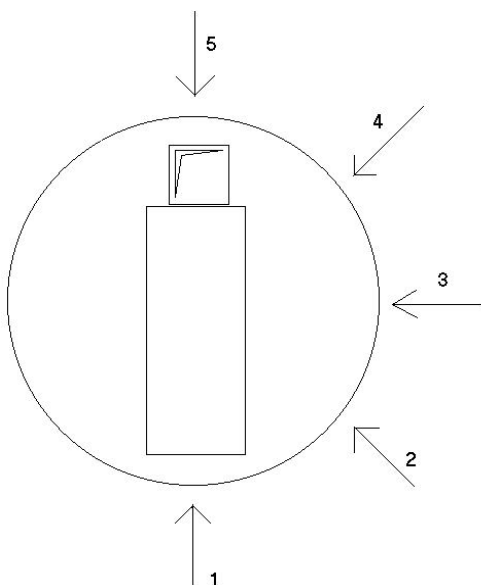


Рис. 10.14. Схема направлений воздействий воздушных потоков на модель шахты:
1-5 – номера, показывающие направления воздушного потока

Сравнение полученных на моделях результатов показывает, что располагаемая разность давлений для варианта вытяжной шахты с дефлектором значительно выше, чем без него. Кроме того, через шахту необорудованную дефлектором, возможно задувание наружного воздуха внутрь «теплого» чердака при направлениях ветра 1 и 2. Вероятность задувания наиболее высока при направлении ветра 1.

Аэродинамические исследования на моделях подтвердили возможность повышения располагаемого давления и предотвращения задувания наружного воздуха внутрь «теплого» чердак и в системы вытяжной вентиляции верхних этажей при оборудовании шахт дефлекторами.

10.3.2 Натурные исследования вытяжных шахт эксплуатируемых зданий

Экспериментальная проверка результатов аэродинамических стендовых исследований выполнена на жилом доме серии 464 У1. На двух секциях дома были одновременно проведены испытания вытяжных вентиляционных шахт. При этом вытяжная шахта секции «I» проектная (рис. 10.13). А на шахте секции «II» смонтирован дефлектор. Конструкторские работы, изготовление и монтаж дефлектора на вытяжной шахте выполнены ОАО МАПИД.

За основу конструкторской разработки дефлектора выбрана модель, продувка которой показала наиболее приемлемые аэродинамические характеристики оголовка шахты. Данная конструкция представляет прямоугольный дефлектор с размерами, позволяющими смонтировать его на существующих вытяжных вентиляционных шахтах. Общий вид шахты после монтажа дефлектора показан на рис. 10.15.

Измерения скоростей движения воздуха в шахтах, сборных магистральных каналах и каналах-спутниках вентиляционных стояков секций «I» и «II» выполнены одновременно. В табл. 10.4 представлены результаты измерений, полученные при температуре наружного воздуха $t_n = 2$ °С и скорости ветра $v = 4$ м/с. Ветер имел направления, соответствующие позициям 4 и 5 схемы, представленной на рис. 10.14.

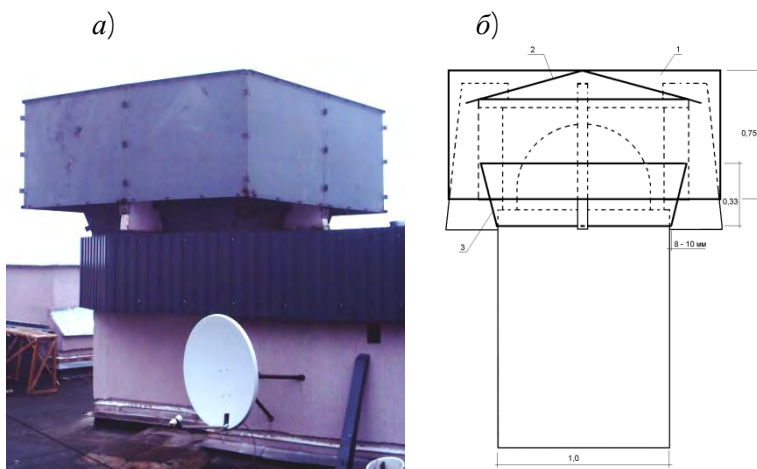


Рис. 10.15. Вытяжная шахта секции «II» «теплого» чердака:
a – после монтажа дефлектора; *б* – принципиальное решение

Результаты натурных испытаний вентшахты с дефлектором и последующие расчеты на их основании показали его более высокую производительность по объему удаляемого воздуха по сравнению с вентшахтой с жалюзийными решетками. Из табл. 11.4 видно, что объем воздуха, удаляемого оснащенной дефлектором шахтой секции «II» на 40 % превышает производительность проектной вытяжной шахт с жалюзийными решетками секции «I». Средний объем воздухоудаления шахтами в пересчете на одну квартиру десятиэтажной секции жилого дома составляет: для шахты с дефлектором – 170 м³/ч; для проектной шахты с жалюзийными решетками – 121 м³/ч.

Различие между объемами воздуха, поступающими в объем «теплого» чердака через вентиляционные стояки и удаляемого через вытяжную шахту, связано с подсосом «постороннего» воздуха через неплотности его ограждающих конструкций.

В секции «I», оснащенной стандартной вытяжной шахтой, подсос «постороннего» воздуха минимален, т.е. развиваемое вытяжной шахтой располагаемое давление неспособно обеспечить увеличение ее производительности.

Таблица 10.4

Объемы удаляемого воздуха через «теплые» чердаки с различными вытяжными шахтами

№	Номер вент-системы	Скорость воздуха на выходе из сборного канала	Объем удаляемого воздуха, L, м ³ /ч			Невязка воздухоудаления стояками и шахтой в $\frac{M^3}{ч}$ %	Средний объем воздухоудаления на одну квартиру, м ³ /ч
			стояка	четырех стояков	вытяжной шахты		
Секция «II» (шахта с дефлектором)							
1	стояк 1	1,55	1377	5256	6804	$\frac{1548}{23}$	170
	стояк 2	1,00	843				
	стояк 3	1,50	1517				
	стояк 4	1,40	1519				
Секция «I» (шахта с жалюзийными решетками)							
2	стояк 1	1,20	979	4561	4860	$\frac{299}{6,2}$	121
	стояк 2	1,40	1184				
	стояк 3	1,25	1288				
	стояк 4	1,00	1200				

В секции «II» скорость воздуха на выходе из магистрального сборного канала стояка №2 равна $v = 1,0$ м/с, а это ниже, чем на выходе из стояков №1, 3 и 4, где она равна $v = 1,4 \dots 1,55$ м/с. Стояки №2 и №3, расположенные почти вплотную друг к другу, разделены опорой плит перекрытия. В результате этого над стояком №2 образован карман, в котором, предположительно, при увеличении скорости в перемещающихся потоках по объему чердака, формируется вихрь, препятствующий выходу воздуха из вентиляционного стояка.

В секции «I» скорость воздуха, выходящего из магистрального канала стояка №2 равна $v = 1,4$ м/с, что выше, чем скорости выхода из вентстояков №1 - $v = 1,2$ м/с, №3 - $v = 1,25$ м/с, и №4 - $v = 1,0$ м/с. Т.е. при удалении воздуха через вытяжную шахту с жалюзийными решетками скорости потоков и объемы удаляемого воздуха через вентстояки более равномерны, но значительно ниже, чем в секции «II». Различие в скоростях потоков, направленных к вытяжной шахте, и конфигурация «теплого» чердака формируют его аэродинами-

ческий режим, определяющий объемы воздуха, удаляемого из вентиляционных стояков.

Проведенные экспериментальные стендовые и натурные исследования «теплых» чердаков показали, что улучшение работы каналов вытяжных систем квартир верхних этажей может быть обеспечено выбором рациональной конструкции вытяжной шахты. Дефлектирующие свойства шахты при ветровом воздействии позволяют увеличить располагаемое давление системы удаления воздуха, обеспечив работоспособность естественной вентиляции квартир зданий.

Для зданий серии 464 УІ разработана принципиальная схема дефлектора, полностью соответствующего по своим характеристикам устройствам данного типа, обладающего небольшим аэродинамическим сопротивлением и более высоким коэффициентом использования динамического давления ветрового потока по сравнению с проектным оголовком вентиляционной шахты.

10.3.3 Естественнo-механические системы вентиляции зданий с «теплыми» чердаками

Повышение стабильности эксплуатации систем вентиляции зданий с «теплыми» чердаками также выполняется путем использования естественнo-механического побуждения движения воздуха. Указанная задача решается двумя путями:

- использованием индивидуальных вентиляторов, устанавливаемых на входные отверстия вентиляционных каналов;
- использованием централизованной вытяжки воздуха при установке вентилятора на вытяжные шахты секций здания.

При реконструкции и ремонтах систем вытяжной естественной вентиляции удаление воздуха с «теплого» чердака можно организовывать через вытяжную шахту одним или несколькими крышными вентиляторами. Вентиляторы должны комплектоваться камерами глушения.

В ГУП «Моспроект-2 им. М.В.Посохина» при проектировании вентиляции жилых зданий повышенной этажности использованы системы с естественнo-механическим побуждением [10.12]. В проектные решения указанных объектов заложены следующие принципы:

- приток - естественный через клапаны в окнах, разгерметизацию форточек или фрамуг с помощью соответствующих запорных устройств;

- на вытяжных отверстиях кухонь и санузлов устанавливаются регулируемые ручные диффузоры;

- вытяжные каналы из промышленных вентиляционных блоков предусмотрены по два на квартиру: 1-й для кухонь с общим сборным каналом и двумя спутниками для общей вытяжки из кухни и возможностью присоединения местного отсоса; 2-й для совмещённых санузлов в 3-х и многокомнатных квартирах;

- для усиления вытяжки из верхних (двух-трёх) этажей и системы в целом предусмотрены естественно-механические установки эжекторного типа, состоящие из дефлектора типа «АС» (ООО «Вентстроймонтаж»), на общей вытяжной шахте каждой секции дома и осевого вентилятора с патрубком внутри ствола дефлектора для создания эжекции.

Принципиальная схема вентиляции квартир жилого дома представлена на рис. 10.16. Описанная система вентиляции положительно зарекомендовала себя на объектах Москвы.

Она удовлетворительно работает в естественном режиме в период года при температуре ниже $t_n = +5^{\circ}\text{C}$ и может переключаться на механический режим при более высокой наружной температуре или при необходимости, исходя из требований эксплуатации. Управление осевыми вентиляторами эжектора выполняется дистанционно или по задаваемой программе.

Данная система позволяет выполнять реконструкцию систем вентиляции на эксплуатируемых зданиях с «тёплыми» чердаками.

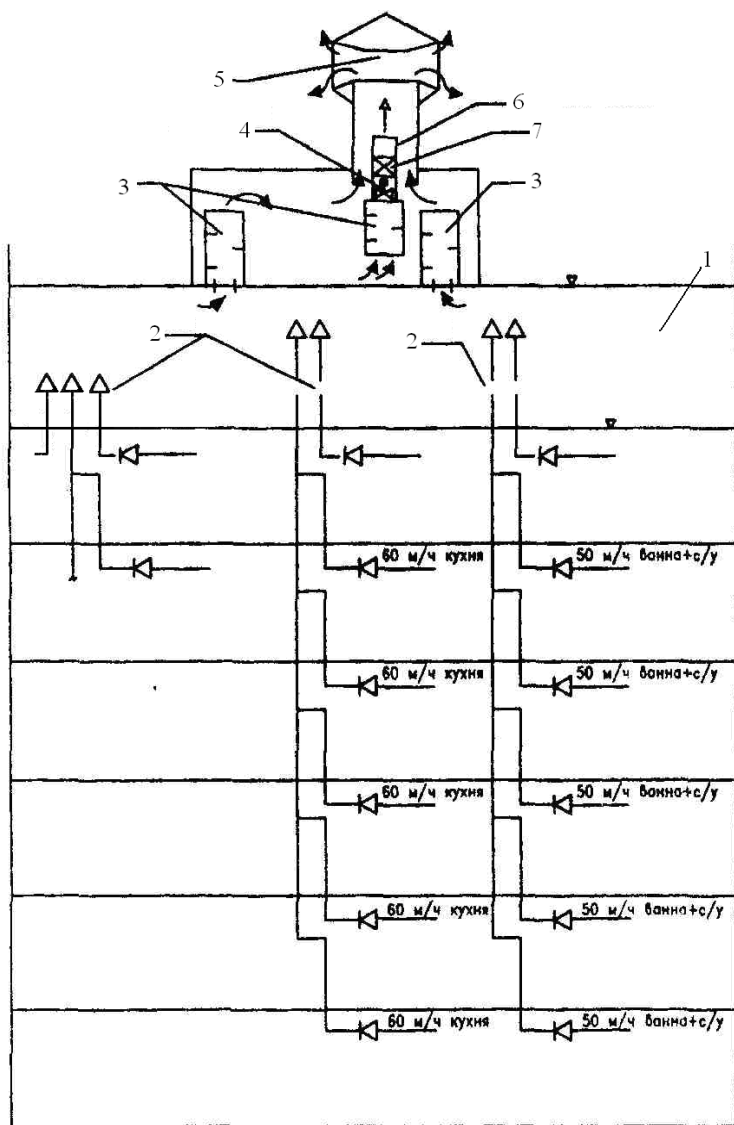


Рис. 10.16. Схема естественно-механической вытяжной
вентиляционной системы секции дома:

1 – «теплый» чердак; 2 – вентиляционный стояк; 3 – глушитель; 4 – вентилятор;
5 – дефлектор; 6 – эжектор; 7 – выпрямитель потока

10.4 Повышение устойчивости аэродинамического режима систем вентиляции зданий с «теплыми» чердаками

Размещение вентиляционных вытяжных стояков относительно вытяжной шахты определяет движение потоков воздуха и формирование поля давлений в объеме чердака. При расположении шахты в центре чердака, из-за взаимного воздействия перемещающихся воздушных потоков друг на друга, влияния местных сопротивлений в виде продольных и поперечных опорных элементов крыши, в нее с разных сторон поступают различные по объему потоки удаляемого воздуха. Указанные факторы вызывают турбулизацию воздушных потоков, вихреобразование и развитие неравномерного, пульсирующего поля давлений в чердачном помещении. В этих условиях увеличиваются потери давления в системах естественной вентиляции, особенно верхних этажей зданий. Для поля давлений также характерно возникновение пульсаций, вызванных нестабильностью воздушных струй вытекающих из сборных каналов и каналов-спутников стояков.

Поступление нагретого воздуха из стояков в чердак осуществляется через оголовок, имеющий вертикальные центральный сборный канал и боковые каналы-спутники (рис. 10.17 а). Выход воздуха из оголовка происходит вертикально вверх в направлении потолка чердачного помещения. Более мощная вытекающая струя воздуха из центрального сборного канала ударяется в потолок и создает область подпора из-за повышения давления в результате торможения потока. В области подпора находятся каналы-спутники. Вытекающий из них воздух попадает под воздействие вихревых образований, как от прямого воздействия потока из магистрального канала вентстояка, так и от воздействия притекающего к этому потоку воздуха из помещения чердака, что вызывает пульсацию давлений в каналах-спутниках. Это служит причиной возникновения перепадов давлений между каналами-спутниками и нарушением режима выпуска воздуха из оголовка стояка с возникновением опрокидывания потоков, хаотическим изменением расходов воздуха.

Наличие указанной нестабильности поля давлений связано и с конструктивными особенностями стандартных оголовков стояков, у которых потоки воздуха направлены вертикально вверх.

Данные выводы основываются на исследованиях аэродинамических особенностей «стандартной» конструкции «теплого» чердака, представленных ранее в п. 10.2.

Для стабилизации аэродинамических условий развития равномерного поля давлений в объеме чердака, обеспечения одинаковых условий для поступления удаляемого стояками воздуха в вытяжную шахту, организации функционирования чердака как камеры статического давления и налаживания устойчивой работы систем вытяжной вентиляции верхних этажей зданий, выполнен комплекс исследований на модели чердака (рис. 10.7).

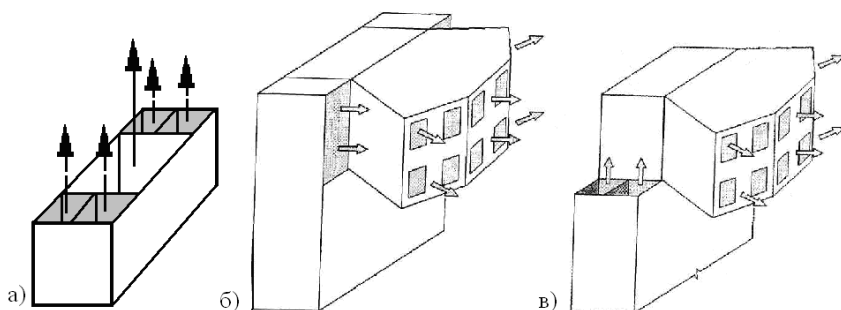


Рис. 10.17. Оголовок вытяжного стояка:

а – стандартный; *б* – с горизонтальными перфорированными каналами; *в* – с горизонтальной насадкой и вертикальными каналами-спутниками

В модели были выполнены следующие изменения.

1. Выпуск воздуха из сборного центрального канала организован через горизонтальную перфорированную насадку расщепленными быстрозатухающими струями, а из каналов-спутников – вертикальными или горизонтальными компактными струями (рис. 10.17 а и б).

Для сравнения на рис. 10.17 изображены схема движения потоков воздуха в типовом оголовке вытяжного стояка (а), а также в оголовке с горизонтальной перфорированной насадкой с вертикальным (в) и горизонтальным (б) выпуском воздуха из каналов-спутников.

2. «Тёплый» чердак в пределах планировочной секции дома в районе лестничной клетки или машинного помещения лифта разделен поперечной перегородкой на две части. Поперечная перегородка имеет герметично закрывающуюся дверь.

Вытяжные шахты чердака располагаются в дальнем участке выделенной полусекции и обслуживают вентиляционные стояки, воздушные потоки от которых перемещаются не пересекаясь друг с другом, тем самым улучшая аэродинамический и тепловой режимы (рис. 10.18).

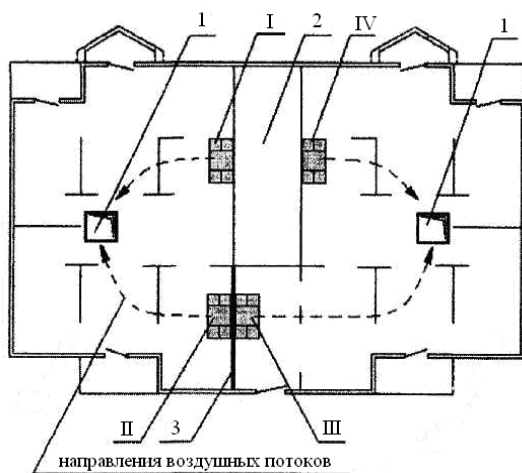


Рис. 10.18. Схема чердака с поперечной перегородкой:
1 – вытяжные шахты; 2 – лестничная клетка; 3 – перегородка;
I, II, III, IV – вентиляционные стояки.

Экспериментальные исследования на модели включали.

1. Исследование аэродинамических особенностей «теплого» чердака, разделенного на две полусекции, при этом выпуск воздуха из сборного и каналов-спутников стояков осуществляется горизонтальными струями (Модель I).

2. Исследование аэродинамического режима «теплого» чердака, разделенного на две полусекции, с удалением воздуха из магистральных каналов стояков через горизонтальные перфорированные

насадки, а из каналов-спутников через прямоугольные вертикальные (Модель II).

Полученные на моделях I и II результаты сравнивались с результатами исследований на модели стандартной конструкции чердака.

При выполнении исследований моделировались режимы движения воздуха:

– I режим – режим разряжения, включен вентилятор, установленный в вентиляционной шахте;

– II режим – режим нагнетания, включен вентилятор, размещенный в камере статического давления.

Результаты исследований сведены в табл. 10.5.

Таблица 10.5

Сравнение результатов экспериментальных исследований
на модели чердака

	№ стояка	№ каналов*	Разряжение, ΔP , Па	Нагнетание, ΔP , Па
Модель I	Стояк III	4-8	0,098	0,098
		5-7	0,049	0,098
	Стояк IV	4-8	0,245	0,049
		5-7	0,147	0,049
Модель II	Стояк III	4-8	0,0491	0,0196
		5-7	0,0490	0
	Стояк IV	4-8	0,0982	0,049
		5-7	0	0,049
Стандартная конструкция чердака	Стояк I	4-8	0,195	0,147
		5-7	0,294	0,293
	Стояк II	4-8	0,684	0,440
		5-7	0,586	0,391
	Стояк III	4-8	0,195	0,195
		5-7	0,195	0,147
	Стояк IV	4-8	0,293	0,293
		5-7	0,293	0,195

* – Расположение каналов указано на плане чердака (рис. 10.8).

Полученные результаты исследований также свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на перепад давлений между каналами-спутниками оказывает скоростной воздушный поток, выходящий из магистрального канала. Он создает над каналами-спутниками вихревые потоки. Подтверждением этому являются значения перепада давления между каналами-спутниками стояка IV с горизонтальным выпуском воздуха в режиме разряжения в первом эксперименте (модель I). В режиме разряжения воздух из этого стояка движется преимущественно в сторону каналов-спутников 7 и 8, что создает различные давления над каналами 7-8 и 4-5. Выходя из стояка III, воздух, огибая узкую перегородку напротив магистрального выпуска, движется по обе ее стороны, примерно одинаково воздействуя, как на каналы-спутники 4-5, так и на 7-8. Результаты второго эксперимента, с горизонтальным модифицированным выпуском из сборных каналов и вертикальными из каналов-спутников, подтвердили принятую гипотезу. Как в режиме разряжения, так и нагнетания поле давлений над каналами-спутниками относительно стабильное, подпор потоку воздуха из каналов-спутников отсутствует. Поле давлений воздушного объема чердака стабилизируется, и он выполняет функции камеры статического давления.

Выпуск воздуха из сборного магистрального канала вентиляционного стояка рекомендуется осуществлять горизонтально через оголовок свободными рассредоточенными струями, а из каналов-спутников – вертикально.

Рассредоточенные струи должны выходить через отверстия, расположенные в боковой панели оголовка, обращенной в сторону вытяжной шахты.

Натурные экспериментальные исследования на эксплуатируемых объектах и стендовые исследования на модели системы вентиляции здания с «теплым» чердаком показали, что максимальная скорость воздуха на выходе из отверстий каналов не должна превышать $v = 1,4$ м/с, а оптимальная скорость истечения должна быть в пределах $v = 1,1 \dots 1,2$ м/с.

Оптимальная скорость выхода воздуха из отверстий оголовка вентиляционного стояка принимается в том случае, если в чердачном помещении, на расстоянии менее 2,5 м от оголовка расположены перегородки или иные массивные конструкции. В случае, если

это расстояние превышает 2,5 м, то следует принимать к расчету максимальную рекомендуемую скорость выхода воздуха.

Наиболее приемлемым является веерный выпуск воздуха из оголовка (рис. 10.19).

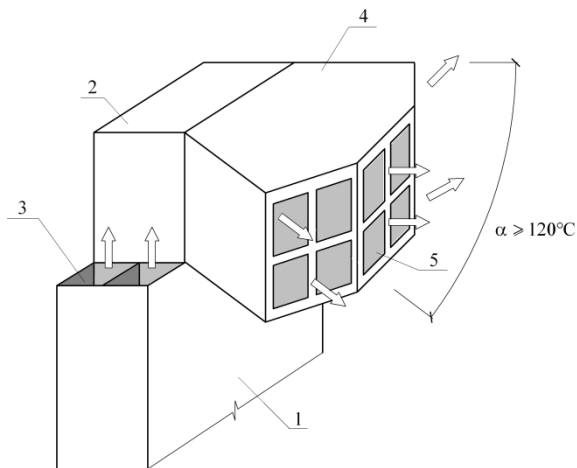


Рис. 10.19. Схема оголовка вентиляционного стояка:

- 1 – корпус; 2 – сборный магистральный канал; 3 – каналы-спутники;
4 – горизонтальный участок сборного магистрального канала;
5 – перфорированная насадка.

Располагать отверстия на каждой стороне панели рекомендуется в шахматном порядке, что обеспечит более плавное затухание скорости потока воздуха в помещении «теплого» чердака.

Оптимальный размер сечения отверстия 140×140 мм. Максимальный размер сечения отверстия не более 200×140 мм. Минимальное расстояние между отверстиями насадки не менее 120 мм.

Количество отверстий насадки оголовка вентиляционного стояка определяется как:

$$n = \frac{L}{3600 \times F \times v}, \quad \text{штук,}$$

где L – расход воздуха через насадок вентиляционного стояка, м³/ч;
 F – площадь живого сечения одного отверстия насадка, м².

Проведенные стендовые исследования, а также исследования на жилых зданиях различных серий с «тёплыми» чердаками, указывают на возможность исключения области повышенного давления под потолком чердака, пульсации давления в каналах-спутниках, уменьшения перепадов давлений между каналами-спутниками и исключения опрокидывания потоков воздуха, выходящих из них. Это позволяет упорядочить аэродинамический и тепловой режимы «теплого» чердака, а также интенсифицировать удаление воздуха из помещений верхних этажей зданий, которое осуществляется через каналы-спутники.

Рассмотренные конструктивные решения модернизации систем вытяжной вентиляции жилых зданий с «тёплым» чердаком подтверждены патентами [10.13, 10.14].

10.5 Выводы

1. Результаты натурных и лабораторных исследований систем вентиляции показывают, что в жилых зданиях с «теплыми» чердаками использование естественной вытяжки позволяет обеспечивать воздухообмен и поддерживать требуемые условия микроклимата в помещениях. Основное преимущество систем приточно-вытяжной естественной вентиляции низкие капитальные затраты и затраты на эксплуатацию.

2. Для устойчивой работы систем естественной вентиляции в жилых зданиях с «теплыми» чердаками необходимо:

а) при установке окон с повышенным сопротивлением воздухопроницанию, $R_v \geq 1 \text{ м}^2 \cdot \text{ч/кг}$ при разности давлений $\Delta P = 10 \text{ Па}$, в оконных блоках или наружных стенах должны быть предусмотрены приточные воздушные клапаны;

б) с целью повышения располагаемого давления и предотвращения опрокидывания циркуляции потока воздуха в системе на вытяжные шахты чердака следует установить дефлектор;

в) для стабилизации аэродинамических условий развития равномерного поля давлений в объеме чердака, выпуск воздуха из сборного центрального канала стояков следует организовать через горизонтальную перфорированную насадку рассредоточенными струя-

ми. Оптимальная скорость истечения воздуха из горизонтальной панели должна быть в пределах $v = 1,1 \dots 1,2$ м/с;

г) в пределах планировочной секции дома в районе лестничной клетки или машинного помещения лифта «теплый» чердак рекомендуется разделить поперечной перегородкой на две полусекции. Вытяжные шахты расположить на участке полусекции так, чтобы воздушные потоки не пересекались друг с другом.

3. Преобразование «теплых» чердаков уже существующих зданий в «холодные», для увеличения и нормализации воздухообмена в квартирах верхних этажей, как правило, нецелесообразно, так как удовлетворительных результатов можно добиться с небольшими материальными затратами и при существующей схеме воздухоудаления посредством использования «теплых» чердаков.

4. Организация системы естественной вытяжной вентиляции жилых зданий с использованием «теплых» чердаков целесообразна, особенно в секционных зданиях переменной этажности, при наличии в квартирах двух и более вытяжных вентиляционных систем и при сложной аэродинамической форме кровли здания.

5. При проектировании зданий новых серий необходимо проводить аэродинамические исследования моделей этих зданий с целью прогнозирования результатов ветрового воздействия на работу системы естественной вытяжной вентиляции и на теплопотери здания.

Литература к главе 10

10.1. Исследование влияния воздушного режима, процессов переноса теплоты и массы в ограждающих многослойных конструкциях с эффективными теплоизоляционными материалами на микроклимат помещений жилых зданий. Заключительный отчет по ГБ 06-58 от 03.01.2006 г. / Белорусский национальный технический университет; рук. А.М. Протасевич. – Минск, 2009. – 182 с. № Г.Р. 2006648.

10.2. Протасевич, А.М. Аэродинамические особенности систем вентиляции жилых зданий с «теплыми» чердаками. / А.М. Протасевич, Д.Д. Якимович, В.Н. Короткий // Строительная наука и техника, 2008. – №1. – С. 56-61.

10.3. Протасевич, А.М. Исследование влияния воздушного режима, процессов переноса теплоты и массы в ограждающих мно-

гослойдных конструкциях с эффективными теплоизоляционными материалами на микроклимат помещений жилых зданий. / А.М. Протасевич, Д.Д. Якимович // Современные архитектурно-конструкторские решения для снижения стоимости и повышения качества строительства. – Минск, 2008. Том 1. – С. 23-36.

10.4. Эльтэрман, В.М. Вентиляция химических производств. / В.М. Эльтэрман // М.: Химия, 1980. – 284 с.

10.5. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции. / В.Н. Талиев // М.: Стройиздат, 1979. – 295 с.

10.6. Гримитлин, М.И. Распределение воздуха в помещениях. / М.И. Гримитлин // М.: Стройиздат, 1982. – 164 с.

10.7. Шепелев, И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещениях. / И.А. Шепелев // М.: Стройиздат, 1978. – 210 с.

10.8. Реттер, Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. / Э.И. Реттер // М.: Стройиздат, 1984. – 294 с.

10.9. Эйгерсон, Л.С. Моделирование. / Л.С. Эйгерсон // М.: Советская наука, 1951. – 260 с.

10.10. Богословский, В.Н. Отопление и вентиляция. / В.Н. Богословский // М.: Стройиздат, 1978.

10.11. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения. // Э. Симиу, Р.Сканлан. // М.: Стройиздат, 1984. -215 с.

10.12. Малахов, М.А. Опыт проектирования естественно-механической вентиляции в жилых зданиях с теплыми чердаками / М.А. Малахов, А.Е. Савенков // АВОК, 2008. – №6. – С. 20-29.

10.13. Оголовок вытяжного стояка теплого чердака здания: пат. 14970 Респ. Беларусь, МПК F24F7/00, С 1 2011.10.30 / А.М. Протасевич, Д.Д. Якимович: заявитель Белорусский национальный технический университет. № а 20091022.

10.14. Крыша: пат. 15515 Респ. Беларусь, МПК E04D13/17, С 1 2012.02.28 / А.М. Протасевич, Д.Д. Якимович: заявитель Белорусский национальный технический университет. № а 20091464.

Научное издание

ПРОТАСЕВИЧ Анатолий Михайлович

**СТРОИТЕЛЬНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА ОГРАЖДАЮЩИХ
КОНСТРУКЦИЙ И МИКРОКЛИМАТ ПОМЕЩЕНИЙ**

Подписано в печать 09.12.2016. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 26,33. Уч.-изд. л. 20,59. Тираж 100. Заказ 949.

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