

ПРООН/ГЭФ

Проект №00077154

«Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь»

Отчет

Консультации, оказанные основным вузам при включении в их учебные программы новых учебных курсов

Исполнитель,

Эксперт по вопросам энергетической

эффективности в зданиях

Л. Н. Данилевский.

Минск, 2016

Введение

Ниже приведены тексты трех учебных курсов, предназначенных для студентов, готовящихся по программе магистратуры по специальностям строительного, архитектурного и энергетического факультетов БНТУ, а также кафедры «Энергетическая физика» физфака БГУ:

- **Основные принципы проектирования энергоэффективных зданий**
- **Снижение теплопотерь через ограждающие конструкции энергоэффективных зданий**
- **Пути снижения теплопотерь через оконные конструкции.**

Основные принципы проектирования энергоэффективных зданий

1. Требования к оболочке и инженерному оборудованию

В последние годы в Республике Беларусь интенсивно развиваются конструктивно-технологические системы жилых зданий, обеспечивающие гибкость объемно-планировочных решений, снижение материалоемкости, уменьшение затрат энергии при их последующей эксплуатации путем повышения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и использования воздухонепроницаемых окон с повышенным сопротивлением теплопередаче. Увеличение стоимости энергии потребовало принятия определенных мер по утеплению оболочки зданий [1]. В таблице 1 приведены нормативные значения сопротивления теплопередаче, действовавшие в Республике Беларусь в различное время и трансмиссионные тепловые потери зданий различных поколений. Очевиден значительный прогресс в этом направлении.

Таблица 1– Значения составляющих теплового баланса многоэтажных зданий различных поколений в Республике Беларусь

| Наименование ограждений | Наружные стены | | | Окна | | | Чердачное покрытие | | | Цокольное перекрытие | |
|--|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|------------|--------------------|--------------|------------|----------------------|--------------|
| | [69] | [18] | [18] | [69] | [18] | [18] | [69] | [18] | [18] | [69] | [18] |
| R_i , м ² град/Вт | 1 | 2,5 | 3,2 | 0,38 | 0,6 | 1 | 1,5 | 3 | 6 | 1,2 | 1,8 |
| Q, кВтч/м ² в год при $T_{вн}=18^{\circ}\text{C}/21^{\circ}\text{C}$ | 54,4/ /63,0 | 21,9/ /25,4 | 17/ /19,7 | 23,4/ /27,1 | 20,6/ /23,9 | 13/ /15 | 8,2/ /9,5 | 4,1/ /4,8 | 2/ /2,3 | 7,6/ /8,8 | 5.1/ /5,9 |
| Сумма трансмиссионных теплопотерь при $T_{вн}=18^{\circ}\text{C}/21^{\circ}\text{C}$, кВтч/м ² в год | | | | | | | 94/ /109 | 52/ /60 | 37/ /43 | | |
| Теплопотери с воздухообменом при естественной вентиляции, для $T_{вн}=18^{\circ}\text{C}/21^{\circ}\text{C}$, кВтч/м ² в год | | | | | | | | | | 52,6/61 | |

| | |
|---|----------------|
| Теплопотери с воздухообменом при использовании принудительной вентиляции с рекуперацией тепловой энергии вытяжного воздуха, кВтч/м ² в год ($\eta=0,8$) при $T_{вн}=18^{\circ}\text{C}/21^{\circ}\text{C}$, кВтч/м ² в год | 10,5/12,2 |
| Энергия внутренних источников кВтч/м ² в год, [5] | $29,7 \pm 1,5$ |
| Солнечная энергия, кВтч/м ² в год | 7,9 |

$T_{вн}$ – температура воздуха в здании, $^{\circ}\text{C}$.

Остальные системы зданий, влияющие на их энергетические характеристики, система вентиляции, горячего водоснабжения, электроснабжения зданий остались на прежнем уровне. Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций, установленные нормативными документами разных стран [2-7] значения которых приведены в таблицах

2 - 4, колеблется в пределах от 2 до 11 м²°C/Вт в зависимости от национальных или региональных требований. Сравнительный анализ показывает, что практически для всех типов ограждающих конструкций, за исключением перекрытия над подвальным помещением, сопротивление теплопередаче в РБ больше или равно аналогичному значению. Значение сопротивления теплопередаче оконных конструкций превышает аналогичное значение для всех стран, исключая Финляндию.

Таблица 2 – Нормативные требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий в странах ЕС [6]

| Показатель | Франция | Германия | | Словения | Венгрия | Румыния | Дания | Норвегия | Финляндия |
|-------------------------|---------|----------|--------------|---------------|---------|---------|-------|----------|-----------|
| | | жилое | общественное | | | | | | |
| Год принятия требований | 2005 | 2009 | | 2008/ 2010 | 2006 | 2006 | 2006 | 2007 | 2010 |
| Тип здания | – | жилое | общественное | – | – | – | – | – | – |

| Коэффициент сопротивления теплопередаче, м ² ·°С/Вт | | | | | | | | | |
|--|---------------------------|-----------|--------------------------|------|------|------|------|------|----|
| стены | 2,22 | 2,50–1,54 | 2,86/ 2,00 ¹⁾ | 3,57 | 2,22 | 1,49 | 2,5 | 4,55 | 7 |
| кровли | 3,57 (2,94) ²⁾ | | 2,86/ 2,00 ¹⁾ | 5,00 | 4,00 | 3,45 | 4,00 | 5,56 | 11 |
| окна | 0,38 | | 0,53/ 0,34 ¹⁾ | 0,77 | 0,62 | 0,56 | 0,50 | 0,63 | 1 |
| пола | 2,78 (2,5) ³⁾ | | 2,86/ 2,00 ¹⁾ | 3,33 | 4,00 | 4,55 | 3,33 | 5,56 | 11 |

Таблица 3 – Нормативные требования к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий в странах СНГ

| Страны | Россия, для 4000 градусосуток [19] | Казахстан, для 4000 градусосуток [20] | Украина [21] |
|--|------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| Год принятия | 2012 | 2012 | 2006 |
| | – | – | – |
| Коэффициент сопротивления теплопередаче, м ² ·°С/Вт | | | |
| Стены | 2,8 | 3,2 | 3,3 |
| Кровля | 3,7 | 5 | 5,35 |
| Окна | 0,50 | 0,6 | 0,75 |
| Перекрытия над неотапливаемыми подвалами | 3,7 | 2,5 | 3,75 |

Таблица 4 – Сравнение нормативных значений сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций новых и реконструируемых зданий в Республике Беларусь и других странах

1) Для температуры внутреннего воздуха соответственно > 19 °С / < 19 °С.

2) Для металлических крыш.

3) Для полов над подвальным помещением.

| | РФ | РК | Украина | Франция | Германия | Словения | Венгрия | Румыния | Дания | Норвегия | Финляндия |
|--------------------------|----|----|---------|---------|----------|----------|---------|---------|-------|----------|-----------|
| Стены | + | + | - | + | + | - | + | + | + | - | - |
| Перекрытия над подпольем | - | - | - | = | = | - | - | - | - | - | - |
| Кровля | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | - |
| Окна | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | = |

Примечание – 1. «+» означает, что нормативные значения сопротивления теплопередаче ограждения в РБ превышают аналогичные в стране. 2. «-» не достигают аналогичного.

Было бы ошибкой выбирать сопротивление теплопередаче методом аналогии с соседними странами. Сопротивление теплопередаче должно быть близким оптимальному значению для конкретных климатических и экономических условий. Для оптимального значения сопротивления теплопередаче разность между дополнительными капитальными затратами и экономией энергии в течение жизни системы утепления минимальна [8]. Такой подход был использован при подготовке изменения №1 к нормативному документу [1].

При решении задачи экономии энергии остаются, как правило, в стороне вопросы, связанные с горячим водоснабжением зданий [9].

Можно сказать, что строительная отрасль в нашей стране, как и в странах СНГ переживает сегодня системный кризис, связанный с неоднородностью развития строительных технологий, относящихся к оболочке здания и его инженерным системам. Недостатком существующих подходов к проектированию является то, что каждый элемент здания рассматривается в отрыве от остальных, что не позволяет оптимизировать конструкцию здания в виде единой энергетической системы. Основной акцент делается на решение проблем, связанных с разработкой конструктивно-технологических и объемно - планировочных решений зданий. Снижение уровня эксплуатационных затрат тепловой энергии на отопление зданий достигалось, в основном, путем утепления ограждающих конструкций. Инженерное оборудование современных зданий, несмотря на существенный прогресс в этой области, отстает в своем развитии [10-13].

Недостаток существующих подходов к развитию строительных технологий особенно остро выявился при переходе к новому типу окон. Переход к использованию оконных конструкций нового поколения с повышенной герметичностью при сохранении в жилых зданиях естественной вентиляции привел к негативным явлениям, связанным с ухудшением качества воздушной среды, нарушением температурного и влажностного режимов помещений в течение отопительного периода [14]. К этому можно добавить, что в зданиях, строящихся по существующим нормативам, на воздухообмен приходится до 60% теплопотерь [14-19], [10-13]. Эта проблема носит системный характер, так как не может быть решена в рамках существующих технических и проектных решений естественной вентиляции. Логика развития современного строительства приводит к необходимости перехода к проектированию жилых зданий с механической, контролируемой системе приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла вытяжного воздуха. К этому имеется несколько причин, которые не могут быть устранены иным путем.

1. Новые нормативные значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций приводят к тому, что максимальное значение потерь теплоты из зданий в отопительном периоде относится к воздухообмену, достигая более 50% от общего уровня, т.е. дальнейшие перспективы экономии тепловой энергии на отопление зданий связаны, прежде всего, с возвратом теплоты, уходящей с воздухом из помещений.

2. При утепленной стене, герметичных оконных конструкциях и герметизации примыканий окон к стеновой конструкции не остается щелей, которые могли бы поддержать нормативный уровень воздухообмена. Остается единственная возможность поддержания необходимого уровня воздухообмена путем открывания окон. Однако, при этом почти теряется смысл производства окон нового поколения и, тем более, освоения окон с еще более высоким термическим сопротивлением. Устройство клапанов или сознательная разгерметизация окон не является выходом, т.к. окно, прежде всего, обеспечивает инсоляцию помещений [20, 21]. Задачу вентиляции необходимо решать другими, проблемно ориентированными средствами. Существующая схема вентиляции путем открывания окон или форточек приводит к тому, что качество воздуха в квартирах нижних этажей зданий не соответствует существующим санитарным нормам вследствие сильного загрязнения наружного воздуха в городе, а также к повышению уровня шума в помещениях, часто выше установленных пределов.

3. Решив все-таки, какими - то техническими средствами задачу притока воздуха и сохранив систему естественной вентиляции, мы не решим задачу поддержания нормативного значения воздухообмена. Уровень воздухообмена будет зависеть от многих причин [14-19]:

- уровня ветровой нагрузки;
- высоты расположения квартиры в многоэтажном здании;
- открытия окон и степени их уплотнения;
- состояние вытяжных вентиляционных шахт.

4. Сохранение свободного воздухообмена не позволяет решить задачу использования внутренних источников тепла и поступающей в помещение солнечной энергии в общей системе энергоснабжения здания в течение отопительного периода. Как правило, избыток теплоты в одной из комнат, например, на кухне или в комнате на освещенном фасаде, уносится с вентиляционными выбросами. В то же время трудно найти хотя бы одну убедительную причину, не позволяющую перейти уже сегодня к механической вентиляции помещений.

Путем анализа теплового баланса зданий можно определить систему мероприятий, снижающих затраты энергии на их теплоснабжение. В [22] и [23,25-30] приведен тепловой баланс жилых зданий старого жилого фонда, построенных до 1990 г. и зданий более новых поколений строительства. с учетом распределения потерь теплоты по различным путям и затрат энергии на приготовление горячей воды. Данные приведены для условий ФРГ [22] и Республики Беларусь, [25 - 30]. Из приведенных данных можно сделать вывод, что уровень тепловых потерь через ограждающие конструкции и внутренних и технологических тепловыделений в новых зданиях существенно снизился. Это обусловлено изменением нормативных требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций [1] и увеличением общей площади помещений, приходящейся на одного жителя, которая составляет в настоящее время в Республике Беларусь около 24 м² на одного жителя. Из приведенных в [22] а также [23] данных следует вывод, что существенного снижения затрат тепловой энергии при эксплуатации зданий в отопительном периоде можно достигнуть путем утилизации теплоты вытяжного воздуха.

Следует обратить особое внимание на наличие внутренних источников тепла в помещениях. Если поставить задачу проектирования здания так, что средняя мощность потерь теплоты за отопительный сезон равна суммарной

мощности поступающей в здание солнечной энергии, а также внутренних и бытовых тепловыделений, приходим к идее пассивного дома, которая была сформулирована в [22, 31 - 36].

В Западной Европе 90 – х годов идея пассивного дома [22, 31 - 36] оказалась чрезвычайно плодотворной. Она позволила устранить основные противоречия, присущие массовому строительству жилья как с точки зрения экономии энергии, так и с точки зрения обеспечения комфортных условий проживания.

При постановке задачи массового строительства пассивных зданий были сформулированы следующие требования [31]:

- 1) стоимость строительства, несущественно отличающуюся от обычного;
- 2) использование при строительстве уже известных и освоенных технологий и технологических приемов;

Задаваемый уровень теплоснабжения пассивных зданий составляет 15 и менее кВтч/м² в год. Строительство зданий с указанным уровнем теплоснабжения продвигается на восток.

Встает вопрос о целесообразности и экономической оправданности строительства пассивных зданий в климатических и урбанистских условиях стран СНГ. В [37 – 38] была исследована возможность и перспективы развития этого направления строительства в климатических [39] и экономических условиях Республики Беларусь. Возможной альтернативой пассивному дому в условиях Республики Беларусь и стран СНГ может стать строительство энергоэффективных зданий, в которых системный комплекс теплотехнических мероприятий выполняется с учетом региональных особенностей строительства, климатических и экономических условий [10-13, 40 - 42].

В последние годы появилось достаточно публикаций посвященных не только строительству, но и реконструкции зданий с низким потреблением тепловой энергии на отопление и вентиляцию [43-45].

Общим недостатком приведенной литературы является отсутствие теоретической базы решений, принимаемых для исполнения в зданиях. В [43] приведено определение энергоэффективного здания в виде пожеланий по экономической, гигиенической, противопожарной и прочей

эффективности и приведены основные инженерные и архитектурные принципы снижения потребления тепловой энергии в зданиях. В [44] и [45] приводятся конкретные технические приемы по утеплению зданий и использованию энергоэффективного инженерного оборудования, однако, отсутствуют общие принципы выбора энергосберегающих решений, а сами решения рассматриваются вне взаимосвязи в здании.

Следует отметить, что к настоящему времени идея экономии энергии при эксплуатации зданий очень популярна во всем мире. Построены уже здания с нулевым потреблением энергии (Null – Energie) [46-48] и даже с положительным балансом энергии (Plus – Energie). Энергетические системы которых без использования ископаемых видов топлива производят больше энергии чем потребляют [49 - 53]. Однако, экономическое обоснование строительства таких зданий, как правило, отсутствует. Целью проектов Null – Energie или Plus – Energie здания является, скорее демонстрация современных технических возможностей строительства.

В то же время, деревенская изба с дровяным отоплением также попадает под определение Null – Energie дома, т. к. в ее энергоснабжении не используются ископаемые виды топлива. А если учесть наличие скотного двора, вырабатывающего бесплатное органическое удобрение – то это даже Plus – Energie дом. Однако, следует отметить, что уровень комфорта таких зданий далек от современных требований. Поэтому в современном здании с низким потреблением тепловой энергии на отопление важным фактором является обеспечение повышенного по сравнению с обычными комфорта проживания. Таким образом, технический прогресс двигает нас от нуль – энергии дома с нулевым комфортом, в котором жили наши отцы, да и некоторые современники, к нуль – энергии дому с высоким комфортом проживания.

2. Пассивный или энергоэффективный?

Следует еще раз уточнить понятия, термины «пассивный дом» и тот смысл, который вкладывается в понятие «энергоэффективный дом».

Как сформулировано в [31, 33], пассивный дом – здание, уровень тепловых потерь которого так низок, что можно исключить систему отопления, объединить ее с системой вентиляции здания. Там же сформулированы отличительные особенности пассивных зданий:

- уровень потребления энергии на отопление меньше $15 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год;

- равномерно утепленная оболочка с сопротивлением теплопередаче не менее $10 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;
- использование принудительной приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией теплоты вентиляционных выбросов;
- проектирование без мостиков холода;
- герметичная оболочка здания;
- сопротивление теплопередаче окон в которых - не менее $1,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Из перечисленных целевым является показатель потребления тепловой энергии на отопление, равный $15 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год.

В [31] впервые были приведены графики, представленные на рисунке 1.3, из которых следует обоснование этой цифры. При снижении потребления тепловой энергии снижаются затраты на отопление, что показано линейной зависимостью на рисунке 1.3. Разность затрат на мероприятия по экономии тепловой энергии и стоимостью сэкономленной энергии представлены на втором графике рисунке 1. Минимум этой функции соответствует удельному потреблению тепла на отопление, равному $30 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год. При значении этой величины, равном $15 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год можно совместить систему вентиляции с воздушным отоплением здания и убрать элементы водяной системы отопления, что приводит к скачкообразному снижению затрат на графике.

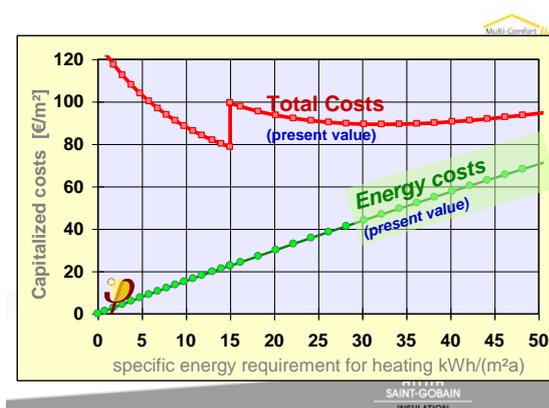


Рисунок 1 – Обоснование потребности в отоплении пассивного дома

На этом графике отображен уровень затрат в зависимости от потребления тепловой энергии на цели отопления. Следует отметить, что для конкретных климатических условий г. Дармштадт (Германия), уровня

воздухообмена ($1 \text{ }^1/\text{ч}$ для жилой площади) и конкретного блокированного 3 - этажного здания было рассчитано, что для системы воздушного отопления с температурой теплоносителя 50°C принятая кратность воздухообмена обеспечивает отопление здания с средним удельным потреблением тепла $15 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год. Этот порог и принят сегодня для определения пассивного дома для всех без исключения здания, независимо от их этажности и климатических условий строительства.

Рассмотрим возможность использования воздушного отопления в квартирах многоэтажных зданий для климатических условий г. Минска. В качестве условия такой возможности запишем следующее [25-26]:

$$\rho \cdot V \cdot c \cdot (T_{\max} - T_{\text{norm}}) = P_{\text{пот}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;

V – объем воздуха при нормативном воздухообмене, $\text{м}^3/\text{с}$;

c – теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$;

$T_{\max} = 45^{\circ}\text{C}$ – максимальная допустимая температура воздуха в системе воздушного отопления, подаваемая в рабочую зону [56];

$T_{\text{norm}} = 18^{\circ}\text{C}$ – допустимая температура воздуха в жилых помещениях;

$P_{\text{пот}}$ – максимальная мощности теплоснабжения, соответствующая наружной температуре холодной пятидневки [39].

Для нормативного значения уровня воздухообмена помещений ($90 \text{ м}^3/\text{ч}$ для кухни и по $25 \text{ м}^3/\text{ч}$ для туалета и ванной комнаты), приведенного в [33], максимальная удельная мощность теплоснабжения для многоэтажного здания равна $21 \text{ Вт}/\text{м}^2$, что дает для климатических условий Республики Беларусь [36] среднее значение удельных затрат тепловой энергии на отопление, равное $46 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год.

Выбранное в качестве характеристики пассивного дома в [31] значение удельного потребления энергии, равное $15 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$ носит случайный характер и не учитывает климатические и объемно-планировочные особенности строительства здания.

Зададим вопрос, к какому же уровню потерь тепла в зданиях следует стремиться и является ли необходимым переход к воздушному отоплению? Переход к воздушному отоплению возможен и при более высоких затратах тепла на отопление зданий. В этом случае можно сохранить кратность воздухообмена, требуемую для обеспечения нормируемого качества воздушной среды, а при необходимости увеличения кратности воздухообмена в системе воздушного отопления использовать частичную рециркуляцию воздуха в системе воздушного отопления в пределах одной квартиры.

Переход к воздушному отоплению зданий, позволяет убрать из квартиры отопительные приборы системы водяного отопления. Однако взамен необходимо установить канальный нагреватель воздуха, представляющий собой теплообменник вода/воздух. Стоимость такого теплообменника может оказаться не меньше суммарной стоимости отопительных приборов в системе водяного отопления. К этому можно добавить, что настройка и балансировка воздушного отопления достаточно сложна, так как в каждую жилую квартиру воздух необходимо подавать не пропорционально ее площади, а в соответствии с уровнем тепловых потерь, а тепловые потери помещения существенно зависят от положения помещения в здании [10].

При использовании воздушного отопления возникают сложности при управлении тепловым режимом помещений. Эти сложности обусловлены возможным противоречием между нормативным воздухообменом и воздухообменом, необходимым для компенсации теплотерь системой воздушного отопления. Представим себе ситуацию, когда в комнате собралось несколько человек. Объем воздуха в комнате должен быть увеличен. В то же время, в комнате увеличится уровень тепловыделений, что потребует снижения подачи теплоносителя в комнату. На наш взгляд, более целесообразным является использование системы отопления стандартного типа

Таким образом, не видно причины, которая требовала бы доведения уровня теплоснабжения здания до значения 15 кВтч/м^2 в год, как это требует для пассивного дома. Тем не менее, системный подход к задаче снижения потребления тепловой энергии на отопление здания, выработанный при проектировании пассивных зданий, показал свою эффективность и является отправной точкой при решении задач экономии энергии.

Следует отметить, что график на рисунке 1 не совсем точен. На нем отсутствует скачкообразное увеличение затрат, соответствующее появлению системы приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла вентиляционных выбросов. Снижение уровня потребления тепла на отопление вначале достигается увеличением сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. На каком-то этапе, когда дальнейшее утепление ограждающих конструкций экономически нецелесообразно, выполняется переход к системе принудительной приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла вентиляционных выбросов. Это обеспечивает скачкообразное снижение потребления тепловой энергии в здании на 40-45 кВт·ч/м² в год при скачкообразном увеличении инвестиций на 50 – 100 долларов/м².

При определении целесообразного уровня теплопотерь следует исходить из экономически оптимального для существующих технико-экономических условий уровня теплозащиты здания, т.е. экономически целесообразного сопротивления теплопередаче зданий [10].

3 Энергоэффективные здания

Необходимо определиться с понятием «Энергоэффективное здание». В 70 -80 гг. прошлого столетия с первым энергетическим кризисом в Западном мире были сделаны первые шаги в направлении экономии тепловой энергии для эксплуатации зданий. Были построены первые здания, называвшиеся энергоэффективными [54]. Выбор технических решения при строительстве этих зданий носил случайный характер, а в понятие энергоэффективности не вкладывалось глубокого смысла. Как правило, акцент делался на использование альтернативных источников энергии: солнечной, энергии ветра, геотермальной [54]. Понимание необходимости системного подхода к проектированию зданий с предельно низким уровнем тепловых потерь было продемонстрировано в проекте «Пассивный дом», выполненном в Германии в 1988-1993гг [31-34]. Основной идеей проекта было строительство зданий, в которых система отопления могла бы играть вспомогательную роль. Это первый в истории, давший толчок массовому строительству зданий указанного типа в Западной Европе. Недостатком идеологии пассивных зданий является жесткость в требованиях к уровню теплоснабжения здания (15 кВтч/м² в год), не учитывающая особенности объемно-планировочных

решений здания, экономические условия, климатические и социальные особенности регионов строительства.

В [40] декларируется системный подход к проектированию и строительству энергоэффективных зданий, однако, здание не рассматривается как развивающийся организм, увязанный с общим развитием энергоэффективных технологий. В интенсивно развивающемся технологическом мире энергоэффективное здание нельзя рассматривать как статичную систему вне общих тенденций развития энергетики и энергоэффективных технологий. Затраты энергии на эксплуатацию здания в течение срока его жизни можно записать в следующем виде [10]:

$$E = S_{от} \left[\sum_{n=1}^N \tau_n \cdot (f_1 \cdot \Delta T_n - f_{2n}) - \sum_{m=3}^M \sum_{n=k_m}^N \tau_n \cdot f_{mn} \right], \quad (2)$$

где N - срок жизни здания, лет; M - количество энергоэффективных технологий в здании; n - номер года; m - номер технологии; k_m - номер первого года введения технологии; E - затраты энергии на эксплуатацию здания в течение срока его жизни, кВтч; $S_{от}$ - отапливаемая площадь здания, m^2 ; τ_i - длительность отопительного периода в i -м сезоне, час.; f_1 - общий удельный коэффициент теплопередаче здания, $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C \cdot Вт)$; f_{2i} - мощность внутренних источников тепла в здании, $кВт/m^2$; f_{mn} - удельная мощность энергоэффективных технологий m -й технологии в n -м году, $кВт/m^2$; ΔT_n - средняя разность температур воздуха внутри и снаружи здания в i -м году, $^\circ C$.

Наиболее точно энергоэффективное здание характеризует следующее определение [10]:

Энергоэффективное здание - система с оптимальным для существующих технико-экономических условий уровнем потребления тепловой энергии и возможностью дальнейшего дополнения оборудованием, снижающим расход энергии при эксплуатации.

Это развивающееся с точки зрения уровня тепловых потерь здание, энергетические характеристики которого изменяются по мере развития энергоэффективных технологий, оставаясь оптимальными по соотношению затрат с получаемой экономией энергии все время жизни здания.

4. Техничко-экономические условия, необходимые для строительства энергоэффективных зданий

Снижение затрат энергии на отопление и горячее теплоснабжение зданий может быть достигнуто комплексом мероприятий [10]. Это утепление оболочки здания, утилизация тепла вентиляционных выбросов, сточных вод, оптимизация систем теплоснабжения. В то же время, задача снижения затрат энергии должна быть экономически оправданной. При этом следует различать задачи, решаемые при выполнении пилотных проектов, когда важно определить направление развития энергосберегающих технологий и при подготовке новых нормативных документов, определяющих развитие строительной отрасли на несколько лет. Во втором случае определяющим фактором при выборе энергосберегающих решений является их экономическая целесообразность.

В Советском Союзе основным критерием при выборе инвестиционных проектов был срок окупаемости капитальных затрат [55], т. е. величина отношения:

$$T=Z_0/\Delta Э, \quad (1.3)$$

где Z_0 – капитальные затраты, руб.;

$\Delta Э$ – дополнительный годовой доход от внедрения, руб.

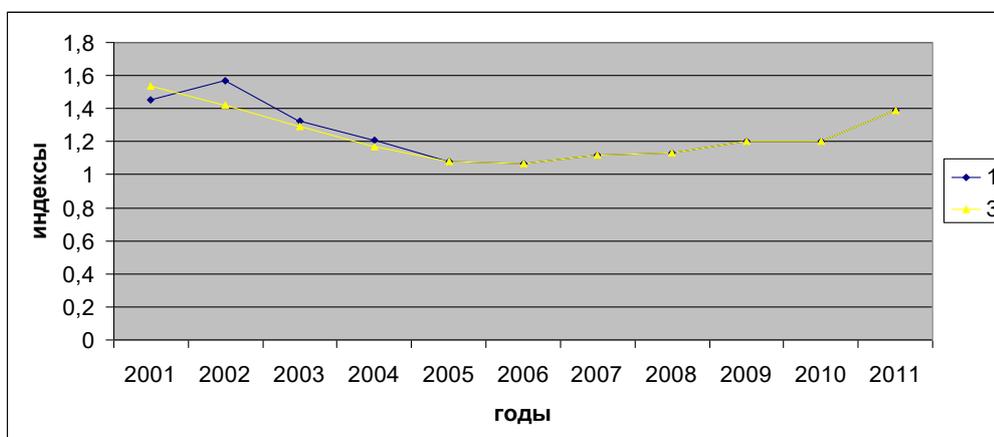
При этом нормативный срок окупаемости задавался в пределах 8 –12 лет.

В настоящее время используют новые экономические подходы к определению экономической эффективности инновационных мероприятий [56-59], учитывающие предполагаемую доходность вложенных средств. Основным экономическим показателем эффективности вложенных инвестиций может служить полный дополнительный доход, $\Delta Э$, который может быть получен за срок эксплуатации энергосберегающих мероприятий с учетом наращивания под проценты промежуточных доходов от реализации мероприятия, т. е. наращенный доход [56,59].

Нельзя рассматривать развитие отрасли, в том числе и комплекса энергоэффективных мероприятий, в отрыве от общих тенденций развития общества. В [56,59] основным предположением при выборе энергосберегающих мероприятий является стабильное состояние общества,

т. е. отсутствие инфляционных процессов, стабильные цены на энергоносители, постоянство кредитной ставки в банках. Удовлетворяет ли состояние хозяйственного развития в нашей стране этим условиям? На рисунке 4 приведено изменение индекса потребительских цен в стране в течение ряда лет [60].

Графики на рисунке 2 наглядно показывают, что наше общество развивается в условиях постоянно действующих инфляционных процессов. Даже в наиболее спокойный период развития, в течение 2004 по 2008 гг. среднегодовой индекс потребительских цен составлял более 1,11. С учетом развивающегося мирового финансового кризиса можно прогнозировать в течение трех лет индекс потребительских цен не менее 1,20 в год. Таким образом, рассчитывать на стабильное развитие общества в ближайшие годы не приходится. Стоимость энергоносителей и энергии в эти годы также не оставалась постоянной. В таблице 5 приведены изменения их стоимости, индекс инфляции и банковский процент при выдаче долгосрочных кредитов в нашей стране. Сведения о стоимости газа получены в департаменте ценовой политики министерства экономики Республики Беларусь, а о стоимости тепловой энергии – в концерне «Белэнерго» в последние годы.



1, 2- индекс потребительских цен и цен на техническую продукцию,соответственно;

Рисунок 2 – Изменение индекса потребительских цен с 2001 по 2011 гг.

Приведенные ниже в таблице 5 данные показывают, что среднегодовой рост стоимости энергии в стране превышал в последние годы как проценты по банковским кредитам, так и изменение индекса потребительских цен.

Таблица 5 – Изменения стоимости, индекса инфляции и ставки рефинансирования [60]

| Годы | Стоимость газа (с НДС), тыс. руб. | Стоимость 1 Гкал (с НДС) тыс. руб. | Индекс инфляции, 1/ α | Ставка рефинансирования Нац. Банка |
|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 2005 | 145,6 | 36,8 | 1,08 | 0,13 |
| 2006 | 155,6 | 41,7 | 1,066 | 0,13 |
| 2007 | 307,4 | 66,8 | 1,121 | 0,13 |
| 2008 | 371,7 | 76,2 | 1,133 | 0,13 |
| 2009 | 619,4 | 112,2 | 1,2 | 0,13 |
| 2010 | 622,1 | 120,7 | 1,2 | 0,13 |
| 2011 | 846,5 | 151,4 | 1,2 | 0,13 |
| Коэффициент увеличения стоимости | 4,3 | 3,3 | - | - |
| Среднегодовые значения | 1,3 | 1,3 | $\alpha_{\text{ср}} = 0,88$ | 0,13 |

Таким образом, в настоящий момент чрезвычайно актуально определить методику определения экономической эффективности энергосберегающих мероприятий в нашем обществе в существующих условиях [10]. Одно из возможных решений – ожидание периода стабильного развития общества, что не грозит нам в ближайшем десятилетии.

Второе – разработка оптимальной стратегии для конкретных условий с учетом изменения стоимости энергетических ресурсов и инфляционных процессов в стране.

Следует отметить, что энергетическая политика в стране в последние 18 лет строилась по второму сценарию.

5 Технико-экономическая эффективность энергосберегающих мероприятий

В [57] предлагается подход к определению экономически оптимального значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций здания как значения, минимизирующего разность затрат на выполнение дополнительной теплоизоляции и экономического эффекта, приносимого этим мероприятием в течение некоторого определенного времени. При этом может возникнуть ситуация, что с учетом банковского дисконта это мероприятие никогда не окупится. Условие окупаемости затрат, приведенное в [56], выглядит следующим образом:

$$\Delta \mathcal{E} / Z > r, \quad (4)$$

где r – процентная ставка по кредиту в банке.

Неравенство достаточно очевидно, его смысл в том, что ежегодный экономический эффект, выражаемый в стоимости сэкономленной энергии, должен покрыть выплаты по процентам и частичное погашение основной суммы кредита.

Недостатком предложенных подходов можно считать отсутствие учета увеличения стоимости энергии в течение срока использования мероприятия и учет возможных финансовых кризисов в этот период. В [10] предложен подход к расчету экономической эффективности, позволяющий дополнительно учесть прогнозируемую тенденцию изменения стоимости энергии, инфляционные и кризисные явления в экономике. Во время кризиса, как правило, происходит девальвация денег, что приводит к скачкообразному снижению их стоимости. Стоимость энергии может снизиться на кратковременном периоде, но она быстро возвращается к исходному уровню и продолжает расти дальше.

При этом окупаемость энергоэффективного мероприятия в условиях роста стоимости энергетических ресурсов и инфляционных процессов возможна только при условии:

$$\Delta \mathcal{E} / Z_0 > \alpha(1+r) - (1+r_1) \quad (5)$$

Для условия:

$$\alpha(1+r) < (1+r_1) \quad (6)$$

срок окупаемости энергоэффективного мероприятия будет равен:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\Delta \mathcal{E} + Z_0((1+r_1) - \alpha(1+r))}{\Delta \mathcal{E}}\right)}{\ln\left(\frac{1+r_1}{\alpha(1+r)}\right)} \quad (7)$$

Здесь где r_1 – относительное годовое увеличение стоимости энергоресурсов; α коэффициент инфляции в стране.

Из выражения (7) следует, что для случая, задаваемого неравенством (6), мероприятия по энергосбережению всегда окупаемы [10].

На рис. 3 представлены расчетные составляющие теплового баланса зданий. Здесь представлены здания современной постройки и энергоэффективные здания. Причем, представлены энергоэффективные здания трех поколений: соответствующие современным возможностям строительства (строящиеся в рамках программы энергоэффективного строительства в Республике Беларусь), прогноз для энергоэффективных зданий 2015-2020 гг и 2020 – 2030 гг. постройки. По прогнозу затраты тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение снизятся от 67 кВтч/м² в год до 12 кВтч/м² в год для энергоэффективных зданий 2020 -2030 гг. строительства. Прогноз строился на предположении, что с течением времени изменяются как составляющие теплового баланса жилых зданий, так и экономически оправданные энергоэффективные технические средства для снижения тепловых потерь жилых зданий. Рассмотрим обоснованность прогноза изменения составляющих теплового баланса. Начнем с мощности внутренних источников тепла. Снижение этой величины связано с двумя процессами:

- Уменьшением заселенности жилого фонда зданий (с 21м²/чел до 30м²/чел в 2020 г), связанной с реализацией программы жилищного строительства в стране;
- Снижением мощности электроприборов, обусловленных техническим прогрессом, в т. ч., переходом к энергосберегающему освещению.

Второе – тепловые потери через ограждающие конструкции зданий. Для существующих в 2009 г. условий оптимальным является сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий около 5 м²°C/Вт [61]. По существующим нормативам оно равно 3,2 м²°C/Вт [1]. С увеличением стоимости энергоносителей, повышение степени утепления зданий можно считать неизбежным, что приведет к уменьшению тепловых потерь через наружные ограждения.

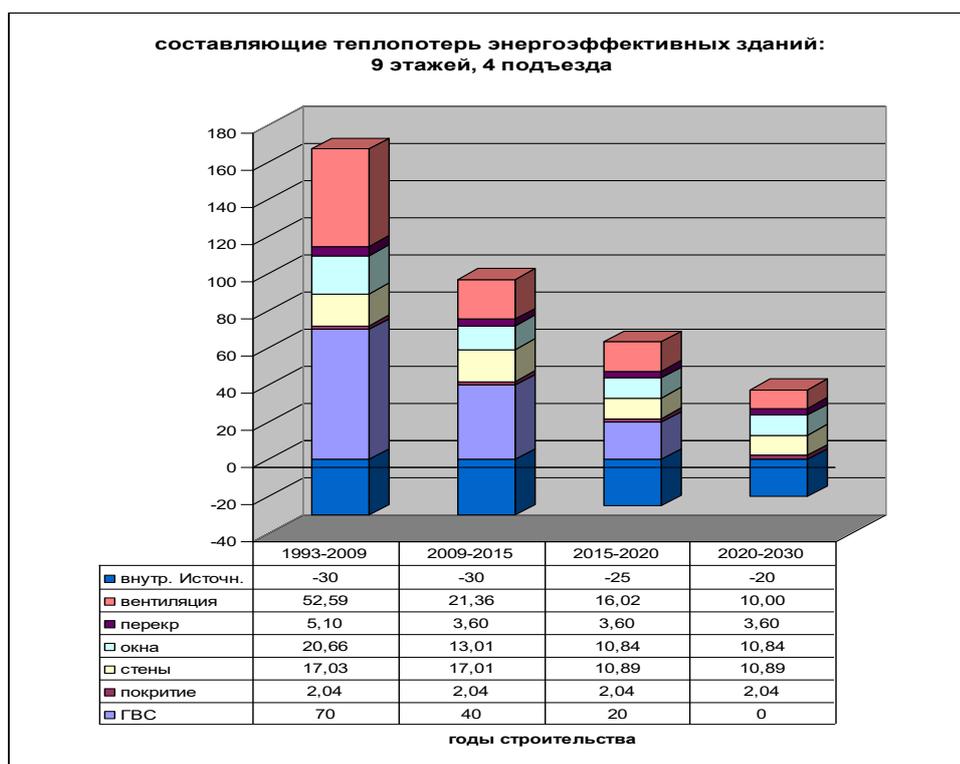


Рисунок 3 - Составляющие теплового баланса энергоэффективных зданий в развитии.

Уже выпускаются окна с сопротивлением теплопередаче более $1,4 \text{ м}^2\text{С/Вт}$. От современных энергоэффективных окон они отличаются наполнением стеклопакета, вместо аргона используют ксенон или криптон. При использовании нового поколения энергоэффективных окон будут снижены тепловые потери через них, как это указано на рис. 5.

Снижение удельных тепловых потерь с воздухообменом можно прогнозировать как за счет использования более эффективных теплообменников, так и за счет повышения качества строительства, что увеличит герметичность зданий, и снижения кратности воздухообмена по мере уменьшения заселенности зданий.

Уменьшение затрат тепла на горячее водоснабжение зданий в нынешнем поколении энергоэффективных зданий достигается использованием системы утилизации тепла сточных вод [10]. Дальнейшее снижение может быть достигнуто использованием солнечной энергии, вначале – тепловых солнечных коллекторов, а затем фотоэлектрических элементов.

В итоге, в зданиях 15 – 20 гг. постройки можно прогнозировать около 40 кВтч/м^2 в год, а в энергоэффективных зданиях следующего поколения – менее 15 кВтч/м^2 в год. Причем, уже сегодня при строительстве энергоэффективных зданий необходимо закладывать технические решения,

обеспечивающие возможность подключения энергоэффективных модулей по мере развития технико-экономических условий их применения.

Основным критерием эффективности энергосберегающих мероприятий является срок окупаемости затрат. Используя результаты, полученные в [61], можно показать, что для заданного срока окупаемости при известных экономических условиях отношение стоимости энергии, сэкономленной за год эксплуатации к затратам на выполнение энергосберегающего мероприятия должно быть равно:

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{Z_0} = \frac{(\alpha \cdot (1+r))^n \cdot (\alpha \cdot (1+r) - (1+r_1))}{(\alpha \cdot (1+r))^n - (1+r_1)^n}, \quad (8)$$

На рис. 4 приведено значение зависимости отношения $\Delta \mathcal{E}/Z_0$, рассчитанное из (8), с значениями переменных, приведенных в таблице 3 от срока окупаемости затрат.

В таблице 6 приведены сроки окупаемости энергосберегающих мероприятий. Из приведенных данных можно сделать вывод, что в современном варианте энергоэффективного здания, задав срок окупаемости менее 10 лет, нецелесообразно использовать только фотоэлектрические элементы, срок использования которых подойдет через 4 – 9 лет.

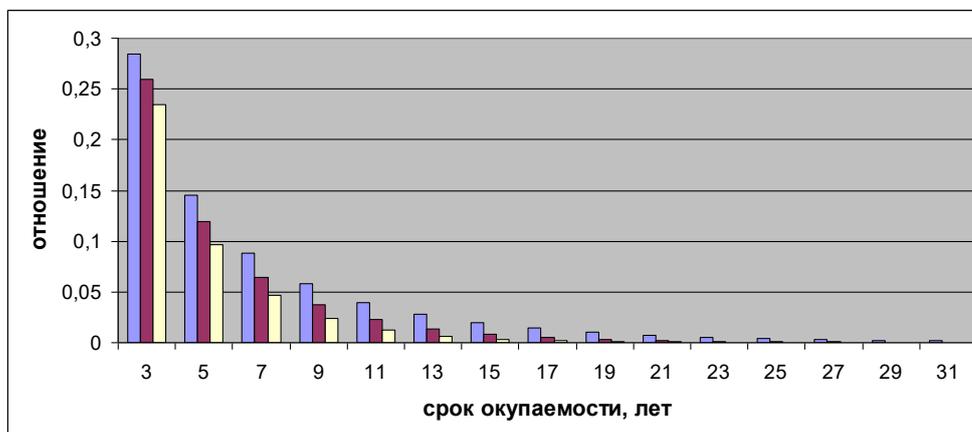


Рисунок 3 -Зависимости отношения $\Delta \mathcal{E}/Z_0$ от срока окупаемости затрат

Таблица 6 Срок окупаемости мероприятий в зависимости от изменения стоимости энергии. $\alpha = 0,88$; $r=0,13$.

| Энергоэффективная технология | Отношение $\Delta \mathcal{E}/Z_0$ | Срок окупаемости, n, лет | | |
|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|------------|------------|
| | | $r_1=0,15$ | $r_1=0,25$ | $r_1=0,36$ |
| | | | | |

| | | | | |
|--|------|----|----|----|
| утилизатор тепла сточных вод | 0,4 | <3 | <3 | <3 |
| утепление до $R=5 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ | 0,06 | 9 | 7 | 6 |
| солнечный коллектор | 0,06 | 9 | 7 | 6 |
| рекуператор тепла | 0,04 | 11 | 9 | 7 |
| фотоэлектрические элементы | 0,01 | 19 | 14 | 11 |

Из результатов, приведенных в таблице 6 и данных на графике рис. 3 можно сделать вывод, что в стране созданы технико-экономические условия для строительства энергоэффективных зданий с оболочкой, утепленной до $5 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$, системой приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла вентиляционных выбросов, солнечным коллектором и утилизацией тепла сточных вод. В то же время, следующей энергоэффективной системой может стать система электроснабжения с использованием фотоэлектрических батарей. Ее время, предположительно, начнется с 2020 г.

Выводы

Жилой фонд зданий потребляет при эксплуатации около 40% вырабатываемой в стране тепловой энергии. Это делает задачу экономии топлива для выработки энергии на отопление и горячее водоснабжение одной из важнейших в энергетической политике.

Основное направление развития зданий в сторону минимизации потребления тепловой энергии для нужд эксплуатации должно решаться путем развития технологии строительства энергоэффективных зданий. Анализ мирового развития этого направления строительства позволил определить достоинства и недостатки различных подходов к решению этой проблеме и сформулировать понятие энергоэффективного здания как системы с оптимальным для существующих технико-экономических условий уровнем потребления тепловой энергии и возможностью дальнейшего дополнения оборудованием, снижающим расход энергии при эксплуатации.

Такая формулировка обеспечивает возможность проектирования энергоэффективного здания с оптимальными энергетическими параметрами на момент строительства и с возможностью сохранять оптимальности с течением времени по мере развития энергоэффективных технологий.

Технико-экономический анализ существующих в стране условий строительства показал своевременность строительства энергоэффективных зданий.

Для развития энергоэффективного строительства актуальны следующие задачи:

- определение существующего и прогнозирование теплоэнергетического баланса зданий;
- оптимизация теплозащитных свойств оболочки здания с учетом климатических и архитектурных особенностей и соотношения экономии энергии к затратам;
- поддержания оптимальных температурно - влажностных условий путем выбора рациональной системы принудительной приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла вентиляционных выбросов;
- оптимизация конструкции теплообменника – рекуператора обеспечивающей эффективную работу в конкретных условиях проектирования;
- разработка оптимальных решений использования возобновляемых источников энергии и утилизация вторичных энергоресурсов в энергоснабжении здания;
- корректировка существующей нормативной базы проектирования;
- экспериментальное строительство энергоэффективных зданий и мультипликация полученного опыта.

Источники

1 Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. Гос. Ин-т стандартизации и сертификации, 2006. – 35 с.

- 2 Российская Федерация: СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий
- 3 Казахстан: МСН 2.04-02-2004 Тепловая защита зданий
- 4 Украина: ДНБ В.2.6-31:2006 Конструкции зданий и сооружений. Тепловая изоляция зданий
- 5 Сармунен П. Энергоэффективность зданий. Ситуация в Финляндии Инженерно-строительный журнал, №10, 2010 г., с.22-36
- 6 Сеппанен О. Требования к энергоэффективности зданий в странах ЕС/ Энергосбережение №7, 2010, с 15-21
- 7 Строительные нормы и правила Российской Федерации. Строительные нормы и правила. Тепловая защита зданий: СНиП 23-02-2003. – Нормативы по теплозащите зданий ТСН 23-313-2000 Тюменской области. Тюмень 2000г.
- 8 Прохоров, В.И. Проблема единства технологической эффективности, энергосбережения и экологической чистоты в инженерных системах жизнеобеспечения. Концепция. Методология. Решения. / В. И. Прохоров // Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях. Сб. докл. Четвертой научно – практической конференции, НИИСФ, Москва, 1999 г. / Научно-исследовательский институт строительной физики. – М.: 1999. – с.11-36.
- 9 **Богословский**
- 10 Данилевский, Л.Н. Принципы проектирования и инженерное оборудование энергоэффективных жилых зданий /Л. Н. Данилевский. // Бизнесофсет,– Минск, 2011.- 375 с.
- 11 Данилевский, Л.Н. Повышение энергоэффективности зданий / Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2005. – №4 – с.106-108
- 12 Данилевский, Л.Н. К вопросу о снижении уровня теплопотерь здания / Л.Н. Данилевский // Опыт Белорусско-Германского сотрудничества в строительстве. – Минск: НПООО Стринко, 2000. – с. 76-77
- 13 Данилевский, Л.Н. Тенденция развития современного энергосберегающего строительства / Л.Н. Данилевский // Опыт

Белорусско-Германского сотрудничества в строительстве. – Минск: НПООО Стринко. – 2000. – с.83-85

- 14 Werner, J., Laidig, M. Gute Luft will geplant sein. / J. Werner, M. Laidig. . – Impuls-Programm Hessen, Institut Wohnen und Umwelt. – Darmstadt, 2006. – S.86.
- 15 Васильев, Г. П., Тимофеев, Н. А. Энергетический потенциал вентиляционных выбросов жилых зданий в Москве / Г. П. Васильев, Н. А. Тимофеев // АВОК, №4. – 2009. – с.24 – 28.
- 16 Seppanen, O. Энергоэффективные системы вентиляции для обеспечения качественного микроклимата помещений / O. Seppanen. // АВОК, № 5. – 2000. – с. 26 – 31.
- 17 Алексеева, И. Ю. Регулируемая система вентиляции для жилых помещений / И.Ю. Алексеева // АВОК, № 5. – 2001. – с. 50 – 52.
- 18 Werner, J. , Laidig, M. Stand der Entwicklung und Erfahrungen mit Passivhausluftungssystemen / J. Werner, M. Laidig. // Passivhaustagung, №4. – 2002. – S. 1 – 12.
- 19 Богословский, В.Н., Покотилов, В. В. Системы микроклимата экспериментального многоквартирного жилого дома с эффективным использованием энергии / В.Н.Богословский, В. В. Покотилов // Проблемы строительной теплофизики систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях. Сб. докл. Четвертой научно – практической конференции, НИИСФ, Москва, 1999 г. / Научно-исследовательский институт строительной физики. – М.: 1999. – с.11-36.
- 20 Данилевский, Л.Н. Перераспределение световых потоков для оптимизации освещения помещения. Перспективы использования осветительных систем на основе не изображающие оптики. / Л.Н. Данилевский // Материалы научно-технической конференции. – Минск, 1997. – с. 3-19
- 21 Данилевский, Л.Н. Энергетические характеристики зданий как результат случайных воздействий на параметры микроклимата в квартирах и

- погрешностей строительного процесса / Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2011. – №6, с.
- 22 Feist, W. Das kostengünstige Passivhaus – Proektbeschreibung / W.Feist // Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser. Protokollband. Darmstadt. – 1996. – №1. –1996. – s. 9 - 21
- 23 Данилевский, Л.Н. Измерение фактических энергетических характеристик жилых зданий / Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2006. – №1 – с.118 - 123
- 24 Danilevski, L. Perspectives of the passive house standard in Belarus / L. Danilevski // 8 Europäische Passivhaustagung, Krems, Österreich, 2004, s.631-634
- 25 Данилевский, Л.Н. Пассивный дом – Итоги и перспективы. ч. 1. / Л.Н. Данилевский // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – №10 – с.72-73
- 26 Данилевский, Л.Н. Пассивный дом – Итоги и перспективы. ч. 2. / Л.Н. Данилевский // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2006. – №11 –с.64-65
- 27 Данилевский, Л.Н. Пассив в актив / Л.Н. Данилевский //Архитектура и строительство. – 2000. – №1. – с. 37-39
- 28 Данилевский, Л.Н. Пассивный дом – основное направление энергоэффективного строительства / Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2006. – №5 – с.106-108
- 29 Данилевский, Л.Н. Эффективное использование систем вентиляции в современных зданиях / Л.Н. Данилевский // Энергоэффективность. – 2002. – №5 – с.19-20
- 30 Данилевский, Л.Н. Системный подход к энергосбережению в жилых зданиях / Л.Н. Данилевский // Опыт Белорусско-Германского сотрудничества в строительстве. – Минск: НПООО Стринко, 2000. – с. 108-111

- 31 Feist, W. Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser / W.Feist - Verlag das Beispiel, 2001.
- 32 Von Weizsäcker, E.U., Lovins, A. B., Lovins, L.H. Faktor Vier / E.U. von Weizsäcker, A. B. Lovins, L.H. Lovins. – München, 1996. – 352 s.
- 33 Feist, W. Passivhaus – Faktor 10 zum Anfassen / W. Feist //Passivhaustagung 10-11. März 2000. – №4. – Kassel, 2000. – s.11 – 19.
- 34 Feist, W. Passivhäuser –Behandlichkeit ohne Heizung / W. Feist // Passivhaus-tagung.22-23 November 1996. - №1. – Passivhausinstitut, 1996. – s. 29 – 40.
- 35 Feist, W., Peper, S., Görg, M. GEPHEUS – Proektinformation № 35/ W.Feist, S. Peper, M. Görg. – Technische Endbereich: Hannover, 2001.
- 36 Spieler, A. Passiv-Verwaltungsgebäude: Erste Betriebserfahrungen mit dem Wagner-Passiv-Solarhaus / A. Spieler // Passivhaustagung 10-11. März 2000. – №4. – Kassel, 2000. – s.435-441.
- 37 Данилевский, Л.Н. Пассивный или Энергоэффективный? / Л.Н. Данилевский // Теплоэнергоэффективные технологии. – 2010. – № 1-2. – с. 20-23
- 38 Данилевский, Л.Н. От пассивного к энергоэффективному дому / Д.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2010. – № 3 – с.61 - 63
- 39 Строительная климатология: СНБ 2.04.02-2000– Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. Гос. Ин-т стандартизации и сертификации, 2003. – 81 с.
- 40 Табунщиков, Ю. А., Бродач, М. М., Шилкин, Н. В. Энергоэффективные здания / Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач, Н. В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.
- 41 Табунщиков, Ю.А. Энергоэффективное здание как критерий мастерства архитектора и инженера / Ю. А. Табунщиков. // АВОК. – 2001. – №2. – с.6-8, 10-11.
- 42 Граник, Ю. Г. , Магай, А. А., Беляев. В. С. Объемно-планировочные решения при формировании новых типов энергоэффективных жилых зданий

/ Ю. Г. Граник, А. А. Магай, В. С. Беляев. // Энергосбережение. – 2003. - № 4. – с. 79 – 81.

43 E.Juodis Energy efficient building: study material for architecture students // Juodis E./ Vilnius: Technika, 2009, s.79

44 Г. Бадьин Строительство и реконструкция малоэтажного жилого дома // Бадьин Г./ Санкт-Петербург, «БХВ_Петербург», 2011, 432 с.

45 И. Габриэль, Х.Ладенер Реконструкция зданий по стандартам энергоэффективного дома // Габриэль И., Ладенер Х./ «БХВ_Петербург», 2011,480 с.

46 Costa Andrea Integrated design process for affordable net-zero-energy buildings - 14.internationale Passivhaustagung 2010,Dresden,2010, S.485-488

47 Szalay Zsuzsa, Brophy Vivienne, Csoknai Tamas Limits to reducing energy use - 14.internationale Passivhaustagung 2010,Dresden,2010, S.491-496 »

48 Елохов А. Е. Отчет о проведенном туре в Германию «Пассивный дом – миф или реальность» Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 11-12 апреля 2012 г., Москва, с.115-119

49 Ronacher Herwig Passivhaus und EnergiePlusHaus – Potenziale für Regionaltypische Architectur- 14.internationale Passivhaustagung 2010,Dresden,2010, S.525-526

50 Regner Pia Erkenntnisse aus der Nachbetreuung der Plusenergie-Dreifach-Sporthalle - 14.internationale Passivhaustagung 2010,Dresden,2010, S.203-208

51 Панитков О.И. Первый Активный дом в Австрии как часть программы Модельный Дом 2010 Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 6-7 апреля 2011 г., Москва, с.23-25

52 Леонова В. А. Развитие индивидуального домостроения в России: проект «Активный дом» Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 6-7 апреля 2011 г., Москва, с.26-29

- 53 Елохов А. Е. Развитие концепции пассивного дома. Пилотные проекты в РФ.» Технологии проектирования и строительства энергоэффективных зданий Passive House, 3-4 апреля 2013 г., Москва, с.57-64
- 54 Селиванов, Н. П. Энергоактивные здания / Н.П.Селиванов, А. И. Мелуа, С. В. Заколей и др. – М.: Стройиздат. – 1988. – 376 с.
- 55 Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в народном хозяйстве СССР. – М.: АН СССР, 1966.
- 56 Гагарин, В.Г. Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий / В.Г. Гагарин // АВОК. – 2009. – №1. – с. 10-16.
- 57 Богословский, В. Н. Аспекты создания здания с эффективным использованием энергии / В.Н. Богословский // АВОК – 2000 – №5 – с. 34 – 39.
- 58 Табунщиков, Ю.А. Энергоэффективные здания: мировой и отечественный опыт / Ю. А. Табунщиков // Энергия, экономика, техника, экология. – 2004. – № 10. – с. 20 – 29.
- 59 Дмитриев, А. Н., Табунщиков, Ю. А., Ковалев, И. Н., Шилкин, Н. В. Руководство по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия / А. Н. Дмитриев, Ю. А. Табунщиков, И. Н. Ковалев, Н. В. Шилкин. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. – 120 с.
- 60 Справочная правовая система «Консультант плюс».
- 61 Данилевский, Л.Н. Методика расчета экономической целесообразности энергоэффективных мероприятий / Л.Н. Данилевский // Строительная наука и техника. – 2009. – № 6. – с. 12 – 17.

СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ

Одно из направлений снижения теплотерь через ограждающие конструкции связаны с разработкой и использованием новых теплоизоляционных материалов с коэффициентом теплопроводности на порядок меньшим, чем у традиционной теплоизоляции [1], например, вакууммированных [2-16]. Второе - создание систем теплоизоляции с управляемым пропусканием теплового потока [17-27].

По первому направлению используются свойства вакуума как идеальной теплоизоляции. Во многих работах для обеспечения вакуума в конструкциях предлагается использовать полые металлические вакуумные изоляционные панели [12-14]. Однако, обеспечить высокую степень вакуума в пространстве панели в течение срока эксплуатации достаточно сложно, а появление даже небольшого давления (10^{-3} - 10^{-4} бар) приводит к существенному ухудшению теплоизоляции. К тому же, значительная доля тепла в таких панелях передается через стенки металлической оболочки.

Теоретические и экспериментальные предпосылки систем порошковой вакуумной теплоизоляции были созданы в 60-е годы прошлого века, см., например, [3, 4], а теплоизоляция использовалась в криогенной технике. Вторично интерес к этому типу теплоизоляции пробудился в связи со строительством «пассивных» зданий. В конце 90-х годов были выпущены первые промышленные партии нового материала с целью использования в строительстве [5-13]. В качестве наполнителя вакуумных изоляционных панелей используют пористые или волокнистые материалы, например, мелкие порошки или аэрогели, а также волокнистая теплоизоляция. Чем меньше размеры пор или пустот материала и разветвленнее его структура, тем раньше в нем достигается

условие высокого вакуума и лучше его теплофизические свойства [2]. Так в микропористом материале с размером пор 10^{-8} м механизм передачи тепла через молекулы воздуха практически исключается уже при давлении 10 мбар. Вакуумные изоляционные панели с различным типом наполнителей имеют сравнимые характеристики при высоких уровнях вакуума. Значительная разница между ними появляется при увеличении внутреннего давления до 1-10мбар [3-6].

Оболочки современных вакуумных изоляционных панелей содержат алюминиевую фольгу толщиной 3-10 мкм, на которую для увеличения механической прочности с обеих сторон наносят тонкий слой пластика. Пластик с низкой температурой плавления наносят на внутреннюю поверхность фольги, которую при изготовлении панели заваривают. Такие оболочки имеют хорошие барьерные характеристики. Наполнитель поддерживает стенки, ограничивает движение газовых молекул и обеспечивает заданную форму панели. Теплофизические характеристики и продолжительность жизни панели зависят от свойств наполнителя, начального уровня вакуума, проницаемости оболочки, эффективности адсорбентов, размеров панели, условий ее эксплуатации. Такие панели производят в Западной Европе и они используются в строительной практике.

Технология вакуумных изоляционных панелей стала коммерчески доступной с появлением дешевых наполнителей на основе легких пористых материалов. В Германии, США получены материалы наполнителей с коэффициентом теплопроводности $0,0022 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и плотностью меньше $10 \text{ кг}/\text{м}^3$, т. е. их теплофизические характеристики в 5-10 раз превосходят характеристики лучших теплоизоляционных материалов [28]. Их использование позволит увеличить полезную площадь жилья за счет уменьшения толщины утеплителя, снизив при этом уровень теплопотерь в 5-6 раз.

Еще одно направление развития снижения тепловых потерь зданий через ограждающие конструкции связано с активной теплоизоляцией, когда ограждающая конструкция играет активную роль в формировании параметров внутренней среды помещений [17-27].

Наиболее наглядным примером может служить ограждающая конструкция с наличием воздушной прослойки и прозрачного ограждения перед ней [18,19]. В солнечную погоду даже в зимний период температура в прослойке может существенно превышать наружную. В то же время, нет установившейся практики и отработанных технических решений использования этого обстоятельства с целью снижения затрат на отопление эзданий.

На наш взгляд, идеальная теплоизоляционная система должна, в какой-то степени, напоминать живой организм и в широких пределах изменять коэффициент теплопередачи в зависимости от условий окружающей среды [23-27]. При понижении наружной температуры теплоизоляционная система должна снизить теплотери из здания, при повышении температуры воздуха ее термическое сопротивление может уменьшиться. В летнее время поступление солнечной энергии в здание также должно зависеть от наружных условий.

Теплоизоляционная система, обладающая сформулированными выше свойствами, может быть выполнена в виде теплоизоляционного слоя с вентилируемой воздушной прослойкой. При движении в прослойке воздуха с температурой более высокой, чем в соответствующей точке стены с обычной теплоизоляционной системой, величина температурного градиента в слое теплоизоляции от стены до прослойки уменьшается по сравнению с теплоизоляцией без прослойки, что уменьшает потери тепла из здания через стену. Уменьшение теплотерь из здания будет компенсировано теплом, отдаваемым потоком воздуха в прослойке. Следовательно, температура воздуха на выходе из прослойки будет меньше, чем на входе. В качестве источника энергии для повышения температуры прокачиваемого воздуха возможно использование тепла грунта под зданием путем использования

почвенного теплообменника [23-25] или вентиляционных выбросов здания [26-27]. Для эффективного использования энергии почвы предполагается, что система вентиляции в воздушной прослойке должна быть замкнутой, без подсоса атмосферного воздуха. В этом случае необходимо решить проблему, связанную с миграцией влаги из помещения в прослойку и возможностью ее конденсации.

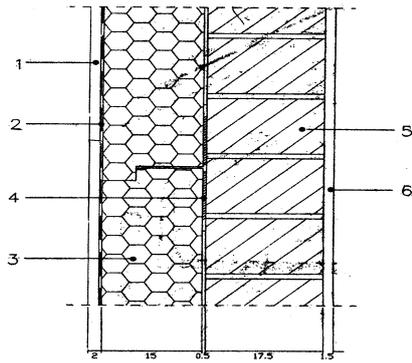
1 Воздушная прослойка в системах теплоизоляции зданий

На рисунках 1 и 2 приведены две конструкции наиболее часто используемых систем наружного утепления зданий [29]. Недостатками системы на рисунке 1 можно считать сезонность выполнения работ и увлажнение утеплителя в процессе эксплуатации из-за миграции пара из жилых помещений и частичной конденсации в слое теплоизоляции, что приводит к снижению теплозащитных свойств системы.

Конструкция теплоизоляционной системы с вентилируемой воздушной прослойкой на рисунке 2 позволяет выполнение работ круглый год. Вентиляция воздушной прослойки обеспечивает снижение количества влаги в утеплителе. К недостаткам можно отнести необходимость наряду с использованием утеплительных материалов применять дополнительные ограждения, обеспечивающие зазор для движущегося воздуха.

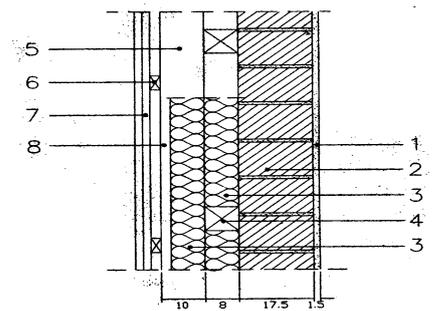
Известна система вентиляции, в которой воздушная прослойка примыкает непосредственно к стене здания [30, 31]. Теплоизоляция выполнена в виде трехслойных панелей: внутренний слой – теплоизоляционный материал, наружные слои – алюминий и алюминиевая фольга. Такая конструкция защищает утеплитель от проникновения влаги, так что его свойства не ухудшаются в любых условиях эксплуатации. Такая конструкция позволяет экономить до 20% утеплителя по сравнению с обычными системами [29]. Недостатком является необходимость вентиляции прослойки наружным воздухом для удаления влаги, мигрирующей из помещений здания [30, 31]. Это приводит к тому, что тепловые потери через нижнюю часть теплоизоляции увеличиваются, так как холодному наружному воздуху, поступающему в прослойку через отверстия внизу системы необходимо некоторое время для нагрева до установившейся температуры.

Наружная стена



1. Структурная штукатурка.
2. Армирующая сетка.
3. Изоляционная плита фасада (с секционными пазами или без них).
4. Клеящее вещество.
5. Стеновой материал.
6. Внутренняя штукатурка.

Навесной фасад, крестовидная обрешётка.



1. Внутренняя штукатурка.
2. Кирпичная кладка.
3. Минераловата.
4. Горизонтальный ригель.
5. Вертикальная стойка.
6. Обрешётка.
7. Облицовка фасада.
8. Воздушный зазор.

Рисунок 1 - Невентилируемая
конструкция теплоизоляционной
системы

Рисунок 2 - Вентилируемая
конструкция теплоизоляционной
системы

В то же время, возможна система теплоизоляции аналогичного с [30,31] типа с замкнутой воздушной прослойкой [25]. Движение воздуха в прослойке необходимо для удаления влаги. Решив задачу удаления влаги другим способом, получим систему теплоизоляции с замкнутой воздушной прослойкой без указанных выше недостатков.

С этой целью в [32, 33] предложена система теплоизоляции, имеющая вид, представленный на рисунке 3. Для удаления пара из прослойки в ней предусмотрены паропроницаемые вставки 4, выполненные из теплоизоляционного паропроницаемого материала, обеспечивающего равномерность утепления в системе, например, минеральной ваты.

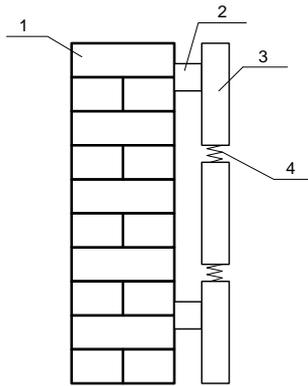
Для давления насыщенного пара в прослойке можно записать [34]:

$$P_{нас} = 611 \exp(17.543T / (241.2 + T)), \quad (1)$$

Пренебрегая термическим сопротивлением воздуха в прослойке, средняя температура внутри прослойки равна:

$$T_{пр.} = \frac{R_2 T_{in} + R_1 T_{out}}{R_1 + R_2}, \quad (2)$$

где R_1 и R_2 – сопротивление теплопередаче стены и теплоизоляции соответственно, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$.



1 – стена здания; 2 – крепежные элементы; 3 – теплоизоляционные панели;
4 – паропроницаемые и теплоизоляционные вставки

Рисунок 3 - Теплоизоляция с паропроницаемыми вставками

Для пара, мигрирующего из помещения через стену здания, можно записать уравнение:

$$\frac{dm_1}{dt} = k_{m1} S_1 (P_{in} - P) \quad (3)$$

где P_{in} и P – соответственно парциальное давление пара в помещении и прослойке; S_1 – площадь наружной стены здания, м²;

k_{m1} - коэффициент паропроницаемости стены, (м²·ч·Па)/мг, равный :

$$k_{m1} = \frac{1}{R_{m1}}, \quad R_{m1} = \mu_1 / l_1; \quad (4)$$

где μ_1 – коэффициент паропроницаемости материала стены, мг/(м·ч·Па);

l_1 – толщина стены, м.

Для пара, мигрирующего из воздушной прослойки через паропроницаемые вставки в теплоизоляции здания, можно записать уравнение:

$$\frac{dm_2}{dt} = k_{m2} S_2 (P_{out} - P) \quad (5)$$

где P_{out} , P – парциальное давление пара в наружном воздухе и прослойке соответственно, Па; S_2 – площадь паропроницаемых теплоизоляционных

вставок в теплоизоляции здания m^2 ; k_{nn2} - коэффициент паропроницаемости вставок, равный:

$$k_{nn2} = \frac{1}{R_{nn2}}, \quad R_{nn2} = \mu_2 / l_2, \quad (6)$$

где μ_2 – коэффициент паропроницаемости материала вставки, мг/(м·ч·Па);

l_1 – толщина вставки, м.

Приравняв правые части уравнений (3) и (5) и решив полученное уравнение для баланса пара в прослойке относительно P , получим значение давления пара в прослойке в виде:

$$P = \frac{k_{nn1} P_{in} + k_{nn2} \varepsilon P_{out}}{k_{nn1} + k_{nn2} \varepsilon}, \quad (7)$$

где $\varepsilon = S_2 / S_1$.

Записав условие отсутствия конденсации влаги в воздушной прослойке в виде неравенства:

$$P < P_{нас}, \quad (8)$$

и решив его, получим требуемое значение отношения суммарной площади паропроницаемых вставок к площади стены:

$$\varepsilon \geq k_{nn1} (P_{in} - P_{нас}(T)) / (k_{nn2} (P_{нас}(T) - P_{out})). \quad (9)$$

В таблице Д.1 приложения Д.1 приведены расчетные данные для некоторых вариантов ограждающих конструкций. В расчетах предполагается, что коэффициент теплопроводности паропроницаемой вставки равен коэффициенту теплопроводности основной теплоизоляции в системе.

Предложенная в [32] методика позволяет выполнить расчет конструкции теплоизоляции с замкнутой воздушной прослойкой. Для некоторых конструкций стены, как в первом примере из таблицы Д.1 приложения Д.1, можно обойтись без паропроницаемых вставок. В других случаях площадь паропроницаемых вставок незначительна относительно площади утепляемой стены.

2 Система теплоизоляции с управляемыми теплотехническими характеристиками

Более широкие возможности для управления свойствами теплоизоляционной системы дает вентилируемая воздушная прослойка.

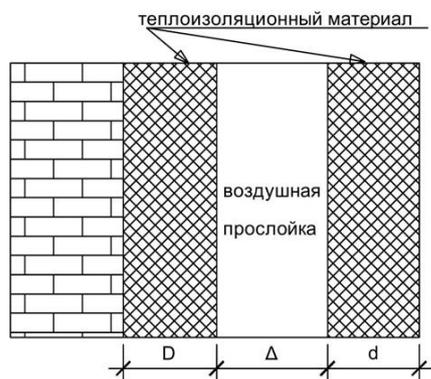
Известны активные теплоизоляционные системы, особенности которых позволяют включать их в систему энергоснабжения зданий [20-22]. Их свойства могут изменяться с изменением условий окружающей среды, обеспечивая постоянный уровень теплопотерь из здания.

Таковыми свойствами может обладать теплоизоляционная система с прозрачным наружным слоем [20, 22] или с вентилируемой воздушной прослойкой [23 – 27]. В первом случае используется солнечная энергия, а во втором дополнительно может использоваться энергия тепла грунта с использованием грунтового теплообменника или энергия вентиляционных выбросов.

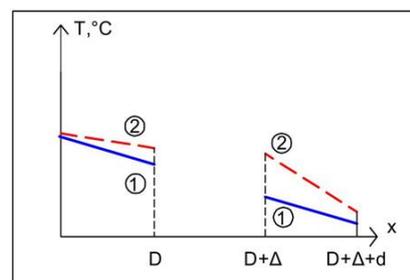
В системе с прозрачной теплоизоляцией [20, 22] при низком положении солнца его лучи практически без потерь проходят к стене, нагревают ее, снижая тем самым теплопотери из помещения. В летнее время, при высоком положении солнца над горизонтом, солнечные лучи практически полностью отражаются от стены здания, предотвращая перегрев здания. В [20] с целью уменьшения обратного теплового потока теплоизоляционный слой выполнен в виде сотовой структуры, играющей роль ловушки для солнечных лучей. Недостатком такой системы является невозможность перераспределения энергии по фасадам здания и отсутствие аккумулирующего эффекта. К тому же, эффективность этой системы прямо зависит от уровня солнечной активности.

Идеальная теплоизоляционная система должна, в какой-то степени, напоминать живой организм и в широких пределах изменять свои свойства в зависимости от условий окружающей среды. При понижении наружной температуры теплоизоляционная система должна снизить теплопотери из здания, при повышении температуры наружного воздуха ее термическое сопротивление может уменьшиться. В летнее время поступление солнечной энергии в здание также должно зависеть от наружных условий. Предлагаемая в [23 – 27] теплоизоляционная система во многом обладает

сформулированными выше свойствами. На рисунке 4 представлена стена с предлагаемой теплоизоляционной системой.



а)



- ① - ход изменения температуры в системе теплоизоляции с замкнутой воздушной прослойкой
- ② - ход изменения температуры в системе теплоизоляции с вентилируемой воздушной прослойкой

б)

Рисунок 4 –а)- Теплоизоляционная системы, б)-температурные графики

Теплоизоляционный слой выполнен с вентилируемой воздушной прослойкой. На рисунке 4 б представлен температурный график в теплоизоляционном слое без и с наличием воздушной прослойки. При движении в прослойке воздуха с температурой более высокой, чем в соответствующей точке графика (а), величина температурного градиента в слое теплоизоляции от стены до прослойки уменьшается по сравнению с теплоизоляцией без прослойки, что уменьшает потери тепла из здания через стену. Уменьшение теплопотерь из здания будет компенсировано теплом, отдаваемым потоком воздуха в прослойке. Физическая модель задачи расчета теплопотерь через стену с вентилируемой воздушной прослойкой указанного типа представлена на рисунке 5.

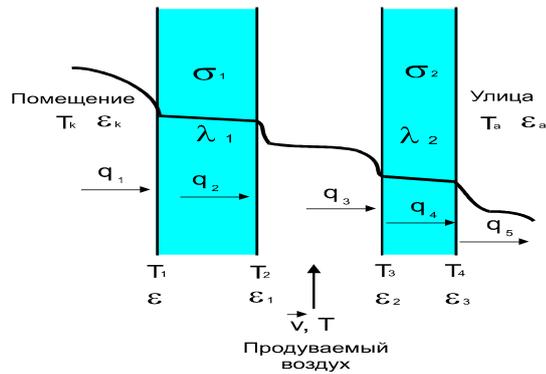


Рисунок 5 - Расчетная схема теплопотерь через ограждающую конструкцию

Уравнение теплового баланса для этой модели имеет следующий вид:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 . \quad (10)$$

При расчете тепловых потоков учитывается кондуктивный, конвективный и радиационный механизмы переноса тепла:

$$q_1 = \varepsilon \sigma (T_k^4 - T_1^4) + \alpha_k (T_k - T_1); \quad (11)$$

$$q_2 = \lambda_1 (T_1 - T_2) / \delta_1 ; \quad (12)$$

$$q_3 = \varepsilon_{12} \sigma (T_2^4 - T_3^4) + \alpha_0 (T_2 - T_3); \quad (13)$$

$$q_4 = \lambda_2 (T_1 - T_2) / \delta_2 ; \quad (14)$$

$$q_5 = \varepsilon \sigma (T_4^4 - T_a^4) + \alpha_a (T_4 - T_a). \quad (15)$$

где q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 – тепловой поток от помещения к внутренней поверхности ограждающей конструкции, через основную стену, через воздушную прослойку через слой теплоизоляции за прослойкой, от внешней поверхности ограждающей конструкции в атмосферу, Вт/м², соответственно

$\lambda_{1,2}$ - коэффициенты теплопроводности слоев теплоизоляции Вт/(м·°С);

ε - приведенная степень черноты.

Формула (14) записана для случая, когда воздух в прослойке неподвижен. В том случае, когда в прослойке со скоростью v движется воздух с температурой T_v , вместо q_3 рассматриваются два потока: от продуваемого воздуха к стене:

$$q_3' = \varepsilon_{12} \sigma (T_2^4 - T_3^4) + \alpha_0 (T_2 - T_v); \quad (16)$$

и от продуваемого воздуха к экрану:

$$q_3'' = \varepsilon_{12} \sigma (T_2^4 - T_3^4) + \alpha_0 (T_v - T_3); \quad (17)$$

Тогда система уравнений распадается на две системы:

$$q_1 = q_2 = q_3'; \quad (18)$$

$$q_4 = q_5 = q_3'' . \quad (19)$$

Коэффициент теплообмена выражается через число Нуссельта:

$$\alpha = \lambda \cdot \text{Nu} / L; \quad (20)$$

где L – характерный размер.

Формулы для вычисления числа Нуссельта брались в зависимости от ситуации. При расчете коэффициента теплообмена на внутренней и внешней поверхностях ограждающих конструкций использовались формулы из [34]:

$$\text{Nu} = [0.825 + 0.38 \cdot \text{Ra}^{1/6} / [1 + (0.492 / \text{Pr})^{9/16}]^{8/27}]^2 ; \quad (21)$$

где $\text{Ra} = \text{Pr} \cdot \text{Gr}$ – критерий Релея; $\text{Gr} = g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 / \nu^2$ – число Грасгофа.

При определении числа Грасгофа в качестве характерного перепада температуры выбиралась разность между температурой стенки и температурой окружающего воздуха. За характерный размер принимались: высота стены и толщина прослойки. При расчете коэффициента теплообмена α_0 внутри замкнутой воздушной прослойки для вычисления числа Нуссельта использовалась формула из [34]:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.105 \cdot \text{Ra}^{0.3}, \text{ Ra} \leq 10^6; \\ \text{Nu} = 0.4 \cdot \text{Ra}^{0.2}, \text{ Ra} > 10^6; \end{array} \right. \quad (22)$$

Если же воздух внутри прослойки двигался, для вычисления числа Нуссельта использовалась более простая формула [34]:

$$\text{Nu} = 0.018 \cdot \text{Re}^{0.2}, \quad (23)$$

где $\text{Re} = v \cdot \delta / \nu$ - число Рейнольдса,

δ - толщина воздушной прослойки.

Значения числа Прандтля Pr , кинематической вязкости ν и коэффициента теплопроводности воздуха λ_v в зависимости от температуры рассчитываются путем линейной интерполяции табличных значений из [34].

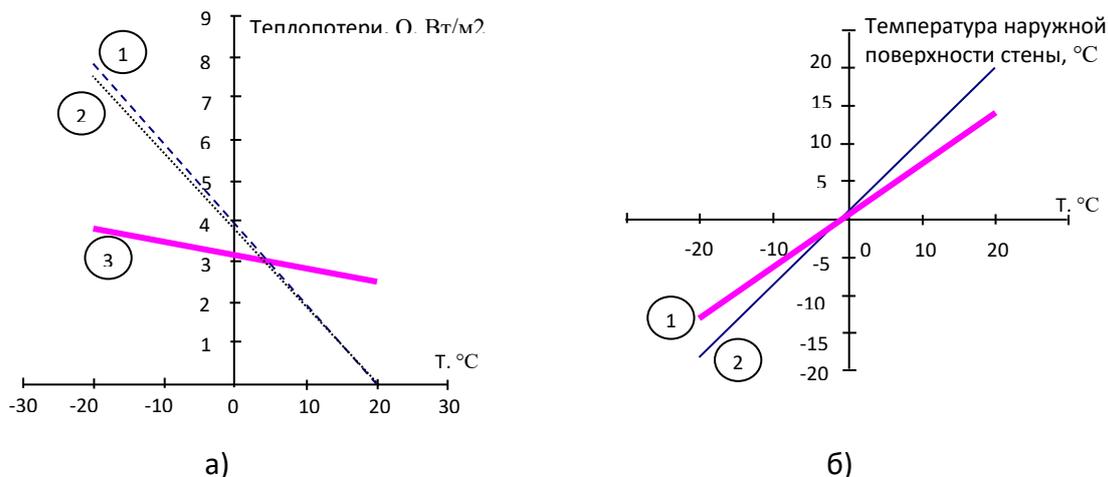
Система уравнений (17) – (20) решалась численно путем итерационного уточнения температур T_1, T_2, T_3, T_4 . Была разработана математическая программа, листинг которой приведен в приложении Д.2. Для численного моделирования была выбрана теплоизоляционная система на основе теплоизоляции типа пенополистирол с коэффициентом теплопроводности, равным $0,04 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$. Температура воздуха на входе прослойки предполагалась равной 8°C . Общая толщина теплоизоляционного слоя предполагалась равной 20 см .

Толщина прослойки d равна 1 см . На рисунке 6 а представлены графики зависимости удельных теплотерь через слой обычной теплоизоляции, при наличии замкнутой воздушной прослойки и с движением воздуха в ней.

Замкнутая воздушная прослойка почти не улучшает свойств теплоизоляции. Для рассмотренного случая наличие теплоизоляционной прослойки с движущимся потоком воздуха более чем вдвое снижает теплотери через стену при температуре наружного воздуха (-20°C). Эквивалентное значение сопротивления теплопередаче такой теплоизоляции для этой температуры равно $10,5 \text{ м}^2\cdot\text{°C/Вт}$, что соответствует слою пенополистирола более 40 см .

Эффективность теплоизоляционной системы возрастает по мере снижения температуры наружного воздуха. При повышении температуры наружного воздуха выше 4°C ее использование нецелесообразно, т.к. это приводит к повышению уровня теплотерь из здания. На рисунке 5.6б приведена зависимость температуры наружной поверхности стены от температуры наружного воздуха. В случае наличия воздушной прослойки для низких температур она выше, чем для обычной теплоизоляции, так как движущийся воздух отдает свое тепло как внутреннему, так и наружному

слоям теплоизоляции. При высокой наружной температуре такая теплоизоляционная система может играть роль охлаждающего слоя.



1 - обычная теплоизоляция, $D = 20$ см; 2 - в ней имеется воздушная щель шириной 1 см, 2 – 4 см, с неподвижным воздухом; 3 - скорость воздуха в прослойке 0,5 м/с

Рисунок 6 –Графики зависимости а)удельных теплотерь; б) температуры поверхности наружной стены от температуры воздуха

На рисунке 7 приведено значение температуры на выходе прослойки в зависимости от температуры наружного воздуха. Воздух в прослойке остывает, отдавая свою энергию ограждающим поверхностям.

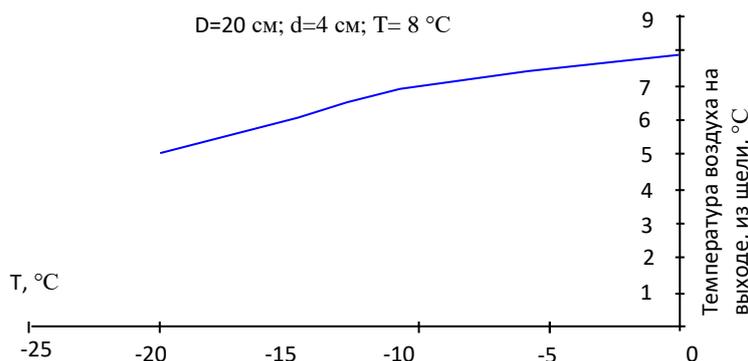


Рисунок 7 – Зависимость температуры на выходе прослойки от температуры наружного воздуха

На рисунке 8 представлена зависимость теплотерь от толщины наружного слоя теплоизоляции при минимальной наружной температуре. Очевиден минимум при $d=4$ см воздуха. В случае наличия воздушной

прослойки для низких температур температура воздуха выше, чем для обычной теплоизоляции, так как движущийся воздух отдает свое тепло как внутреннему, так и наружному слоям теплоизоляции. При высокой наружной температуре такая теплоизоляционная система может играть роль охлаждающего слоя.

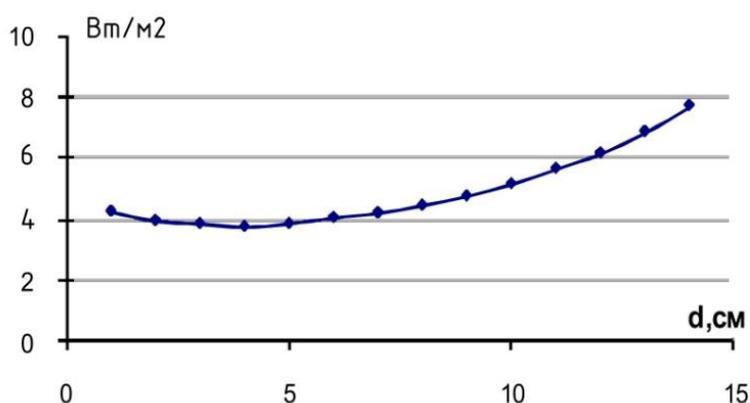


Рисунок 8 – Зависимость теплопотерь от толщины наружного слоя теплоизоляции при температуре наружного воздуха -24°C , Вт/м²

На рисунке 9а представлена зависимость теплопотерь для наружной температуры (-20°C) от скорости воздуха в прослойке. Повышение скорости воздуха выше 1 м/с несущественно влияет на свойства теплоизоляции.

Вентилируемая воздушная прослойка позволяет эффективно управлять уровнем теплопотерь через поверхность стены изменением скорости воздуха, что невозможно осуществить для обычной теплоизоляции

На рисунке 9б приведена зависимость скорости движения воздуха от наружной температуры для фиксированного уровня теплопотерь через стену. Предложенный подход к тепловой защите позволяет снижать энергоемкость вентиляционной системы по мере повышения температуры наружного воздуха.

В качестве источника энергии для повышения температуры воздуха в прослойке возможно использование грунтового теплообменника. Для эффективного использования энергии почвы целесообразно использовать

замкнутую систему вентиляции без подсоса атмосферного воздуха. Так как температура воздуха, поступающего в систему в зимнее время ниже температуры грунта, проблемы конденсации влаги здесь не существует. Одним из вариантов может быть использование энергии вентиляционных выбросов.

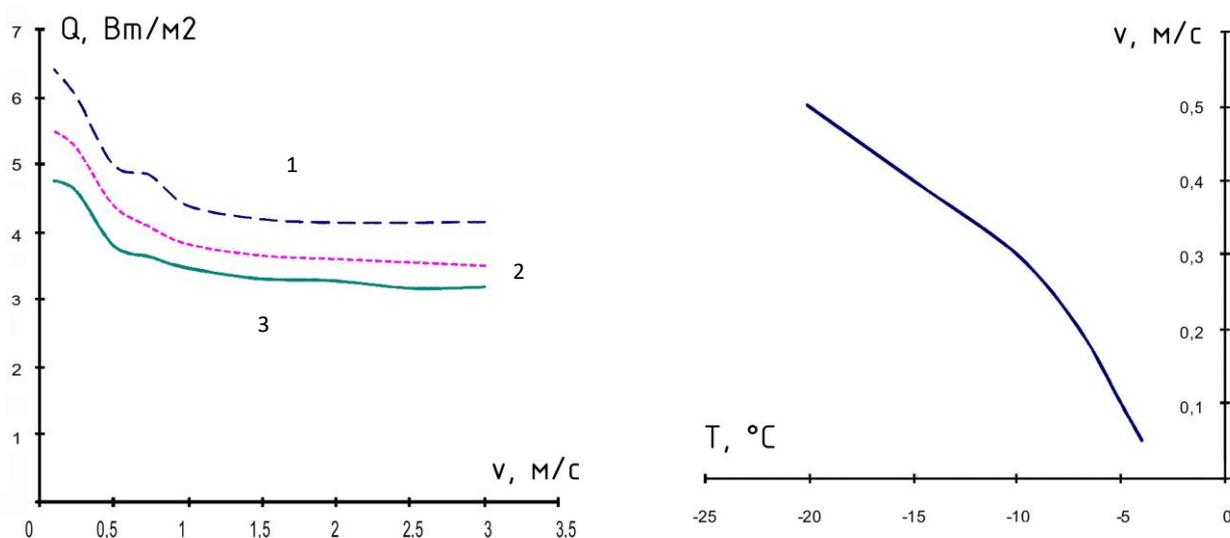


Рисунок 9 – а) Зависимость теплотерь от скорости воздуха для: 1. $d = 16$; 2. $d = 18$; 3. $d = 20$. б) Зависимость скорости движения воздуха от наружной температуры для фиксированного уровня теплотерь

Таким образом, предлагаемая система теплоизоляции с управляемыми теплофизическими характеристиками базируется на конструкции с теплоизоляционным слоем, имеющим две особенности:

- вентилируемую воздушную прослойку, параллельную ограждающей конструкции здания;
- источник энергии для воздуха внутри прослойки;
- систему управления параметрами потока воздуха в прослойке в зависимости от наружных погодных условий и температуры воздуха в помещении.

Наиболее эффективное использование системы активной теплоизоляции мы видим в сочетании использования двух источников

энергии: солнечной и тепла грунта. Если обратиться к системам с прозрачным теплоизоляционным слоем [35-37], становится очевидным стремление авторов реализовать идею теплового диода, т.е. решить задачу направленной передачи солнечной энергии к стене здания, приняв при этом меры, препятствующие движению теплового потока энергии в обратном направлении.

Один из возможных вариантов является конструкция с использованием прозрачной теплоизоляционной системы. Теплоизоляционная система на рисунке 10 имеет две воздушные прослойки. Одна из них находится между теплоизоляцией и прозрачным ограждением и служит для предотвращения перегрева здания. Для этой цели имеются воздушные клапана, соединяющие прослойку с наружным воздухом вверху и внизу теплоизоляционной панели. В летнее время и в моменты высокой солнечной активности при возникновении опасности перегрева здания заслонки открываются, обеспечивая вентиляцию наружным воздухом. Вторая воздушная прослойка примыкает к стене здания и служит для транспортировки солнечной энергии в оболочке здания. Такая конструкция позволит использовать солнечную энергию всей поверхностью здания в течение светового дня и обеспечить эффективную аккумуляцию солнечной энергии, так как аккумулятором выступает весь объем стен здания.

Возможно также использование традиционной теплоизоляции в системе. В этом случае в качестве источника тепловой энергии может служить грунтовый теплообменник, как это показано на рисунке 11. Воздух нагревается, проходя через грунтовый теплообменник и отдает свою энергию ограждающей конструкции [23 – 25].

В качестве варианта можно предложить для этой цели вентиляционные выбросы здания [26, 27]. В этом случае, для исключения конденсации влаги в прослойке удаляемый воздух необходимо пропустить через теплообменник, а в прослойку запустить наружный воздух, нагретый в теплообменнике. Из прослойки воздух может поступать в помещение для вентиляции, как это предложено в [26, 27].

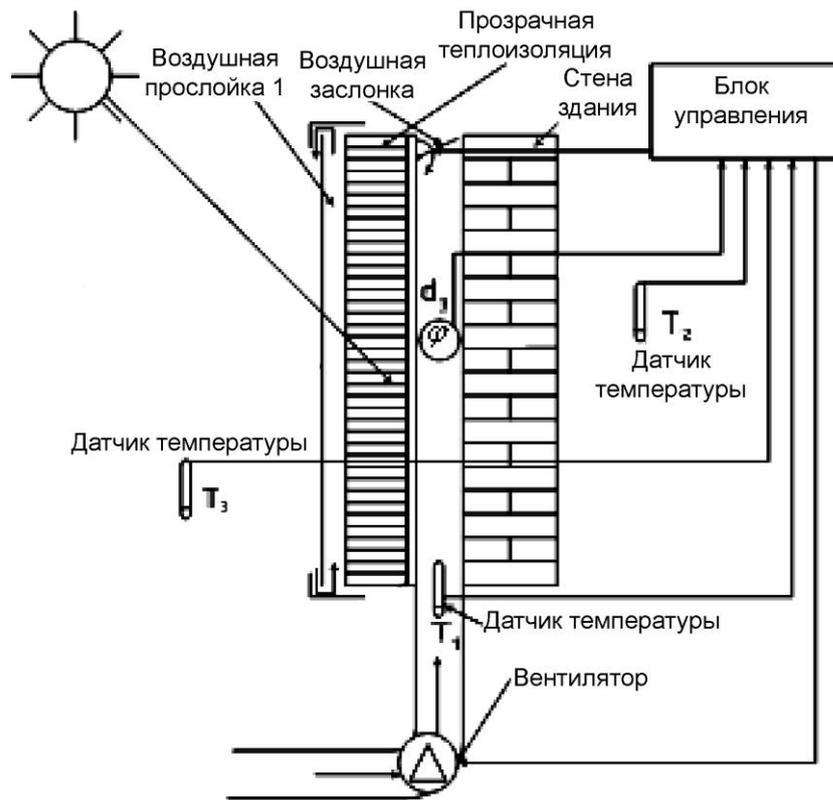


Рисунок 10 – Прозрачная теплоизоляционная система с вентилируемой воздушной прослойкой

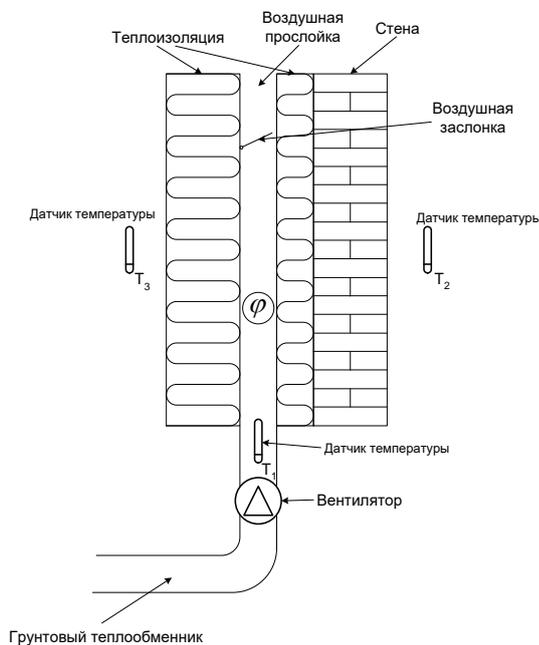


Рисунок 11 – Система теплоизоляции с грунтовым теплообменником

Необходимым элементом является автоматическая система управления теплообменом наружных ограждающих конструкций здания. На рисунке 12

представлена блок-схема системы. Управление происходит на основе анализа информации от датчиков температуры и влажности путем изменения режима работы или отключения вентилятора и открывания и закрывания воздушных заслонок.

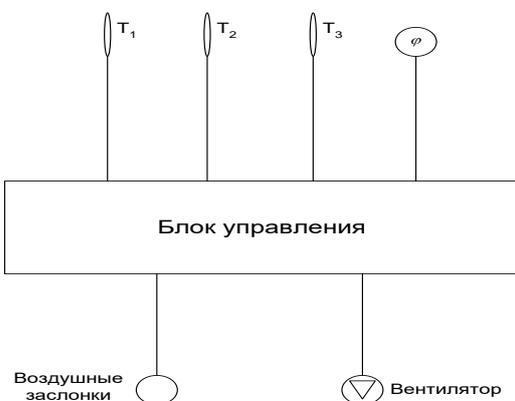


Рисунок 12 – Блок-схема системы управления

Блок-схема алгоритма работы вентиляционной системы с управляемыми свойствами представлена на рисунке 13.

На начальном этапе работы системы управления по измеренным значениям температуры наружного воздуха и температуры в помещениях в блоке управления выполняется расчет температуры в воздушной прослойке для условия неподвижного воздуха. Это значение сравнивается с температурой воздуха в прослойке южного фасада при конструкции теплоизоляционной системы рисунке 10 или в грунтовом теплообменнике при конструкции теплоизоляционной системы рисунке 11. Если значение расчетной температуры больше или равно измеренному, вентилятор остается выключенным, а воздушные заслонки в прослойке закрытыми. Если значение расчетной температуры меньше измеренного значения, включают циркуляционный вентилятор и открывают заслонки. В этом случае энергия нагретого воздуха отдается стеновым конструкциям здания, снижая потребность в тепловой энергии для отопления.

Одновременно измеряется значение влажности воздуха в прослойке. Если влажность приближается к точке конденсации, открывается заслонка, связывающая воздушную прослойку с наружным воздухом, что обеспечивает предотвращение конденсации влаги на поверхности стен прослойки.

Таким образом, предложенная система теплоизоляции позволяет реально управлять теплотехническими свойствами.

Испытание макета теплоизоляционной системы с управляемой теплоизоляцией путем использования вентиляционных выбросов здания.

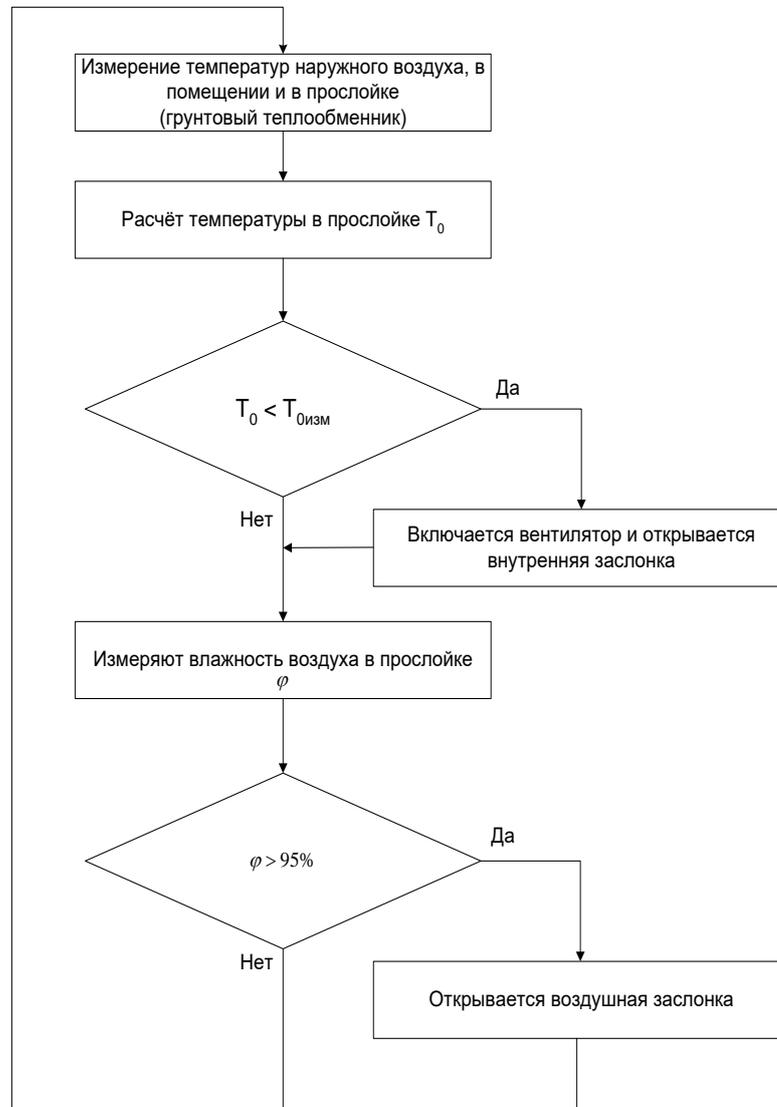


Рисунок 13 – Алгоритм управления коэффициентом теплопередачи в системе теплоизоляции

3 Вакуумная теплоизоляция

Перспективным направлением снижения коэффициента теплопроводности является создание вакуумных изоляционных панелей с

мелкодисперсными наполнителями, представленными в виде порошков или фибры, или их смесей [2-16].

При нормальных условиях коэффициент теплопроводности воздуха не зависит от давления. Переход к вакууму при понижении давления в газе характеризуется числом Кнудсена – Kn [3,4]

$$Kn = \frac{L}{d}, \quad (24)$$

где L – длина свободного пробега молекулы газа, м;

d – характерный размер полости, м.

Если давление газа достигло области значений, для которых средняя длина свободного пробега молекул L становится сравнимой с размерами полости, в которой газ заключен, то обычное понятие теплопроводности — явления, обусловленного столкновениями молекул, — теряет смысл. Именно поэтому для газа в данных условиях используется термин «теплопередача», а не теплопроводность.

В применении к пористым теплоизоляционным материалам термин теплопроводность носит условный, т. е. эквивалентный, характер, поскольку в них наблюдается не только чистая теплопроводность, как в однородных твердых телах. Передача теплоты в таких системах осуществляется посредством: кондуктивной теплопроводности твердого скелета, образующего пористую структуру материала; кондуктивной теплопроводности газа, находящегося в капиллярах или ячейках пор; излучения между стенками пор (радиационная теплопроводность); конвекции вследствие перемещения газа в пористой структуре изоляции [38,39]

Эффективная теплопроводность является сложной функцией, зависящей от многих факторов: температуры, давления газа в порах, размера пор, степени черноты стенок капилляров и ячеек и др., оказывающих различное влияние на величину коэффициента теплопроводности [39,40].

Переносу теплоты теплопроводностью в дисперсных средах посвящено большое число исследований, обзор которых приведен в работах [40].

Кинетическая теория газов дает следующее соотношение между теплопроводностью λ_r газа в свободном виде и его теплопроводностью $\lambda_{п}$ в пористом материале:

$$\lambda_n = \lambda_2 \frac{d_{\text{эфф}}}{d_{\text{эфф}} + L} = \lambda_2 \frac{1}{1 + Kn}, \quad (25)$$

где λ_n – теплопроводность газа в пористом материале, Вт/(м² К);

λ_2 – теплопроводность газа в свободном виде, Вт/(м² К);

$d_{\text{эфф}}$ – средняя длина свободного пробега, м;

L – длина свободного пробега, м; λ – теплопроводность, Вт/(м² К);

Kn – число Кнудсена.

Следовательно, перенос тепла теплопроводностью газа в пористом материале уменьшается как при увеличении длины L пробега молекул, то есть снижении давления, так и при уменьшении размеров пор.

Размеры пор в материалах, применяемых для создания вакуумно-порошковой изоляции, обычно меньше 10 мкм, иногда доходя до нескольких нанометров. Теплопередача газа в таких материалах начинает уменьшаться уже при давлениях, близких к атмосферному, а при давлении 10^{-3} - 10^{-4} бар становится настолько незначительной, что ею можно пренебречь. Это одно из основных достоинств вакуумно-порошковой изоляции.

Производство вакуумных теплоизоляционных панелей, ВИП, освоено на текущий момент многими Западноевропейскими фирмами. Технология производства и рецептура заполнителя является ноу-хау фирм-производителей.

Была поставлена задача разработки технологии и освоения производства отечественных ВИП.

В качестве наполнителя вакуумных теплоизоляционных панелей был использован пирогенный кремнезем Орисил [41], ранее не использовавшийся в качестве наполнителей вакуумных панелей, но являющийся конкурентом по физико-техническим и ценовым параметрам пирогенной кремневой кислоты SiO₂ производства Dyshelman SALES MANAGER HDK или Vasurog® RP (Германия).

В настоящее время ведущим производителем пирогенного кремнезема на территории СНГ и стран Восточной Европы является ООО "Орисил" (Украина). Орисил - высокодисперсный, высокоактивный, пирогенный

диоксид кремния (химическая формула - SiO_2), получаемый пламенным гидролизом четыреххлористого кремния (SiCl_4) высокой чистоты. Продукт пожаро- и взрывобезопасен, не оказывает общетоксического действия. Орисил представляет собой чистый аморфный непористый диоксид кремния с наноразмером частиц **от 5 до 40 нм**. Частицы Орисила образуют физические хлопьевидные агрегаты, поэтому объём Орисила на 98% заполнен воздухом: если истинная плотность SiO_2 составляет $2,2 \text{ г/см}^3$, то кажущаяся плотность Орисила - 40 - 60 г/л.

"Орисил" производит продукт марок 175, 200, 300 и 380 в уплотненном и неуплотненном виде. Размер частиц Орисила составляет 10 -40 нм для марок 175, 200; 5-20 нм для марки 300; 5-15 нм для марки 380. Орисил отличается низкой теплопроводностью и хорошими адсорбционными свойствами, особенно к полярным веществам. С химической точки зрения все свойства Орисила определяются наличием на его поверхности силанольных $^\circ\text{Si}-\text{OH}$ и силоксановых $^\circ\text{Si}-\text{O}-\text{Si}^\circ$ групп.

В настоящее время Орисил находит применение в самых различных областях, том числе и в качестве наполнителя в больших сосудах Дьюара для хранения аварийного запаса жидкого азота в нефтедобычи. Нормативные показатели Орисила представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Нормативные показатели Орисила

| Показатель | Орисил 175 | Орисил 200 | Орисил 300 | Орисил 380 |
|--|---|---|---|---|
| Внешний вид | Порошок белого цвета с голубоватым оттенком |
| Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$, по методу БЭТ | 175±25 | 200±25 | 300±30 | 380±40 |
| pH суспензии | 3,6-4,3 | 3,6-4,3 | 3,6-4,3 | 3,6-4,3 |
| Массовая доля влаги, %, не более | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Массовая доля диоксида кремния (SiO_2), %, не менее | 99,9 | 99,9 | 99,9 | 99,9 |

| | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Массовая доля оксида железа (Fe_2O_3), %, не более | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,003 |
| Массовая доля оксида алюминия (Al_2O_3), %, не более | 0,05 | - | - | - |
| Массовая доля диоксида титана (TiO_2), %, не более | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| Массовая доля крупных частиц (грита), %, не более | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |

Адсорберы используют для продления жизни вакуумных теплоизоляционных панелей. Они поглощают газы, выделяемые компонентами панели и проникающих через оболочку панели внутрь [42]. Вторым компонентом ВИП в качестве фибры и адсорбера был выбран углеволокнистый сорбент, выпускаемый РУП СПО «Химволокно» [42].

Его выбор обусловлен многофункциональностью применения и определялся следующими моментами:

- а) высоким уровнем адсорбции различных газов;
- б) высокой пористостью, которая находится в области микропор, что обеспечивает высокую крутизну изотермы адсорбции и обеспечивает высокий уровень термического сопротивления материала;
- г) структурой фибры, которая может быть использована как формоукрепляющий материал для порошковых наполнителей теплоизоляционных панелей;
- д) высоким уровнем поглощения инфракрасного излучения, в связи с чем, он может быть использован как поглотитель инфракрасного излучения для наполнителей теплоизоляционных панелей;
- е) производится в Беларуси и является импортозамещающим продуктом.

Углеродные волокна производят не более 5 компаний в мире (Германия, Австрия, Чехия, Индия, Беларусь). На РУП СПО «Химволокно» сосредоточена полная технологическая цепочка: от получения вискозных технических нитей до выпуска готовых углеродных материалов..

В теплоизоляционных панелях используется углеволокнистый сорбент-ткань «БУСОФИТ» и активированный углеволок «КАРБОПОН-АКТИВ», которые имеют следующие отличительные особенности:

- сделаны на основе ткани из вискозной технической нити.
- имеют более высокую динамика сорбции по сравнению с активированными углями.
- эффективно работают при низких концентрациях веществ.
- удобны в эксплуатации, регенерируются.
- удельная поверхность по ВЕТ 500-1500 м²/г; объем пор 0,3-0,8 см³/г;

Отходы сорбента производства РУП СПО «Химволокно» перерабатываются в мелкую фибру и смешиваются с мелкодисперсным кремнеземом. Вследствие того, что сорбент обладает более высокой пористостью, чем основной порошковый наполнитель, он усиливает теплоизолирующие свойства наполнителя, и увеличение доли его содержания в наполнителе повышает термическое сопротивление вакуумной теплоизоляционной панели.

К материалу вакуумного пакета в зависимости от условий эксплуатации предъявляются самые разные требования. Среди них: механическая прочность на разрыв, прокол, истираемость, химическая стойкость, выдерживание низких и высоких температур, свариваемость, защита от влаги, непроницаемость или выборочная проницаемость к газам, повышенное скольжение или прилипание, антистатичность и т.д. В вакуумных теплоизоляционных панелях используются многослойные ламинированные пленки (ламинирование алюминием или SiO_x). Возможны следующие слои:

- а) слой полиамида покрытый алюминием либо слой полиэстера покрытый алюминием (пароизоляция);
- б) слой поливинила (воздушный барьер);
- в) слой полиэстера покрытый алюминием;

г) слой термостойкого полиэтилена.

Многослойные пленки должны удовлетворять следующим требованиям:

а) воздухопроницаемость $\leq 0,1 \text{ см}^3/(\text{м}^2 \text{ год бар})$ (при $23 \text{ }^\circ\text{C}$, 75% о.в.);

б) паропроницаемость $\leq 0,5 \text{ г}/(\text{м}^2 \text{ год})$ (при условиях $38 \text{ }^\circ\text{C}$, 95% о.в.);

Пленки с такими характеристика предлагают несколько компаний, одна из которых Wipac Walsrode GmbH & Co KG (Германия). Компания Wipac Walsrode GmbH & Co KG предлагает следующие пленки, производимые специально для вакуумных панелей – COVEXX® BE M DL 105, COVEXX® BE M DL 165 и COVEXX® BE M DL 165 B2. Пленка состоит из нескольких слоев – металлизированный ПЭТ (ПЭТ), металлизированный ВОРР (БОПП) и слой термостойкого полиэтилена для запайки пакета.

В нашей стране есть предприятия производители пленок ПЭТ (РЭТ) и ВОРР (БОПП). Одним из ведущих производителей указанных пленок является ОАО «Могилевхимволокно». Белорусский производитель пленок ОАО «Могилевхимволокно» является по настоящее время одним из первых в рейтинге производителей по доле участия в общем объеме импорта БОПП-пленки в Россию.

Для производства образцов ВИП была использована пленка БОПП производства ОАО «Могилевхимволокно».

Технологические операции при производстве ВИП:

- Взвешивание порций порошка и фибры;
- Перемешивание порошка «Орисил» и фибры;
- Уплотнение полученной смеси на прессе с целью формирования ВИП;
- Прогрев с помощью инфракрасного излучателя;
- Укладка пакета в упаковку;
- Вакуумирование пакета и запаивание торцов.

Фотография образца ВИП представлена на рисунке 14.



Рисунок 14 – Лабораторный образец брикета наполнителя и вакуумной теплоизоляционной панели

С целью определения коэффициента теплопроводности полученных панелей были выполнены измерения на лабораторной установке методом определения теплового потока, как это представлено на рисунке 15.



Рисунок 15 – Общий вид экспериментальной установки

Состав экспериментальной установки для проведения измерений:

а) морозильная камера модели МК-140 со встроенным контролером управления режимами работы холодильного агрегата;

б) фасадная панель пенополистирола толщиной 80мм, с прямоугольными отверстиями для установки в них образцов вакуумных теплоизоляционных панелей;

в) измеритель теплового потока ИТП МГ 4.03 «Поток» трехканальный с датчиками измерения теплового потока и двух температур (наружной и внутренней)

Фасадная панель пенополистирола толщиной 80 мм и размером 860x560мм устанавливается вместо дверцы морозильной камеры. В панели полистирола вырезаны два прямоугольных отверстия 100x100мм и 300x300мм для установки в них испытуемых образцов вакуумных теплоизоляционных панелей размерами 100x100мм, 200x300мм, 200x200мм, 100x300мм, 100x200мм, 300x300мм.

Измерения значений температур и теплового потока выполнялись прибором ИТП-МГ4.03 «ПОТОК» предназначенным для измерения плотности тепловых потоков, проходящих через однослойные и многослойные ограждающие конструкции зданий и сооружений [6]. Толщина ВИП составила 28мм. Измеренное значение коэффициента теплопроводности равно 0,004 Вт/(м°К).

На рисунке 16 представлены графики зависимости значений температур, теплового потока и термического сопротивления ВИП от времени [16].

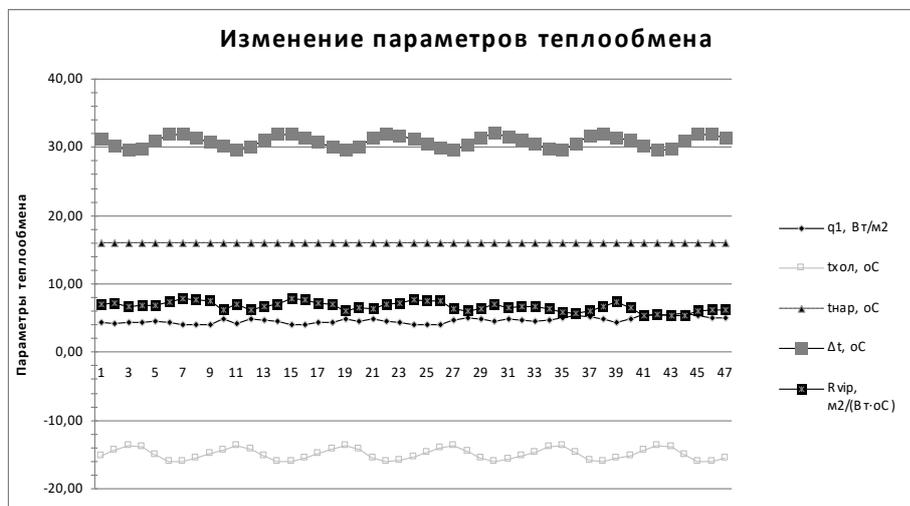


Рисунок 16 – Графики зависимости значений температур, теплового потока и термического сопротивления ВИП от времени

При измерении теплопроводности изготовленных ВИП было отмечено влияние на теплопроводность панели влажности наполнителей. Источником влаги в наполнителях ВИП является влажный воздух помещения, в которых

хранятся компоненты наполнителя - порошок и фибра. Теплопроводность ВИП с влажностью наполнителей, равной равновесной влажности воздуха помещения хранения компонентов наполнителя, достигает значений 0,012 Вт·м/°С, что в два-три раза превосходит «эффективную» теплопроводность вакуумной панели с сухим наполнителем. Это накладывает определенные требования на технологию хранения вакуумируемых материалов.

Окна, изготовленные в соответствии с патентами [63 - 65], были использованы при строительстве первых энергоэффективных зданий в Республике Беларусь. На основе полученного при эксплуатации окон опыта было подготовлено и введено в действие изменение №1 к нормативному документу [1], в соответствии с которым нормативное значение сопротивления теплопередаче окон в Республике Беларусь должно быть больше или равно $1 \text{ м}^2\text{°С/Вт}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Белорус. Гос. Ин-т стандартизации и сертификации, 2006. – 35 с.

2 Р. Фейнман, Р.Лейтон, М.Сэндс Фейнмановские лекции по физике. Т.4 / Р. Фейнман, Р.Лейтон, М.Сэндс. – М.: Мир, 1965.

3 Васильев, Л.Л. Теплопроводность неметаллических зернистых систем. Строительная теплофизика. / Л.Л. Васильев. – М.:Наука, 1966. – с.48-56.

4 Дульнев, Г.Н., Сигалова, Г.В. Теплопроводность моно и полидисперсных зернистых материалов. Строительная теплофизика / Г.Н.Дульнев Г.В. Сигалова. – М.: Энергия, 1966. – с.40 – 47.

5 Caps, R., Friscke, J. Konzepte für den Einsatz, von evakuirten Dämmungen bei Passivhäusern. / R.Caps, J Friscke // 4 Passivhaus Tagung, Kassel, 2000. – s. 171 – 177.

6 Caps, R., Friscke, J. Vakuumdämmungen in der Anwendung / R.Caps, J Friscke // 5 Passivhaus Tagung, Reutlingen, 2001 – s. 247 – 254

- 7 Binz, A. Hightech-Materialien von dem Durchbruch. / A. Binz // 9 Passivhaus Tagung, Ludvigshafen, 2005. – s.219 - 224.
- 8 Ferle, A. Einsatz von Vacuumdämmung in Hochbau. / A. Ferle // 8 Europäische Passivhaustagung 2004. Krems, Austria, 2004. – s. 171 – 177
- 9 Oehler, S. Münsterländer Hof renoviert. / S. Oehler // 9 Internationale Passivhaustagung 2006. Hannover, 2006. – s. 57 – 62.
- 10 Diefernbach, N. Modernisierung von Zweifamilienhäusern auf unterschiedliche energetische Standards unter einatz von Großelementen mit Vakuumdämmung. / N. Diefernbach // 9 Internationale Passivhaustagung 2006. Hannover, 2006. – s. 63 - 68.
- 11 Vacuum Insulation Panel Technology.- Porextherm Dämmstoffe GmbH: Vacupor Vacuum Insulation Panel Techno.
- 12 Кокоев, М.Н., Федоров, В.Т Теплоизоляционное изделие с предельно низкой материалоемкостью. / М.Н. Кокоев, В.Т, Федоров // Строительные материалы. – 1998. – №9
- 13 Вакуумное теплоизоляционное изделие: патент РФ 2144595, Бюл.№220.01.2000г. / М.Н. Кокоев, В.Т. Федоров
- 14 Кокоев, М.Н., Федоров, В.Т. Перспективы применения вакуумно-порошковой теплоизоляции в строительстве/ М.Н. Кокоев, В.Т. Федоров // Строительные материалы. – 1997. – №3.
- 15 Данилевский, Л.Н. Вакуумная теплоизоляция и перспективы использования в строительстве. / Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 2006. – №5 – с.114 –117
- 16 Данилевский, Л.Н. Вакуумная порошковая теплоизоляция. / Л.Н. Данилевский, В. М. Пилипенко, А. М. Черкашин // Архитектура и строительство. – 2011. – №1 – с.
- 17 Андерсон, Б. Солнечная энергия / Б. Андерсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 420 с.
- 18 Kerschberger, A. Solares Bauen mit transparenter Wärmedämmung / A. Kerschberger. – Bauverlag GMBH: Wiesbaden und Berlin, 1996. – 248s.

19 Brendel, C. , Perl, J. Transparente Wärmedämmung (TWD) zur Gebäudeheizung mit Sonnenenergie / C. Brendel, J. Perl. // BINE-Info. – 1990. – №2.- Bonn: Bine-Informationsdienst des Fachinformationszentrums, 1990.

20 Kerschberger, Alfred «Solares Bauen mit transparenter Wärmedämmung / Alfred Kerschberger // Systeme, Wirtschaftlichkeit, Perspektiven, BAUVERLAG GMBH, WEISBADEN UND BERLIN.

21 Peter O. Braun, Innovative Gebäudehüllen, Wärmetechnik,9, 1997. – s.510 – 514.

22 Die ESA-Solardassade – Dämmen mit Licht/ ESA-Energiesysteme,- 3.Passivhaustagung 19 bis 21 Februar 1999 Bregenz, s.177 – 182.

23 Данилевский, Л.Н. Пассивный дом как адаптивная система жизнеобеспечения / Л.Н. Данилевский, // Тезисы докладов международной научно-технической конференции От тепловой санации зданий – к пассивному дому. Проблемы и решения. Минск: 1996. – с.32 – 34,

24 Данилевский, Л.Н. Теплоизоляционная система с управляемыми свойствами для пассивного дома / Л.Н. Данилевский // Архитектура и строительство. – 1998. – №3 – с. 30, 31.

25 Данилевский, Л.Н. Теплоизоляция с управляемыми свойствами для зданий с низким уровнем теплопотерь / Л.Н. Данилевский // Сборник трудов ГП НИПТИС. – Минск, 1998. – с.13 – 27

26 Наружное вентилируемое ограждение здания: пат. 010822 Евраз. Патентное ведомство, МПК (2006.01) E04B 2/28, E04B 1/70 / Л.Н. Данилевский; заявитель ГП «Институт НИПТИС» - №20060978; заявл. 05.10.2006; опубл. 30.12.2008 // Бюллетень Евразийского патентного ведомства – 2008. - №6

27 Наружное вентилируемое ограждение здания: пат.11343 Респ. Беларусь, МПК (2006) E04B1/70, E04B2/28 / Л.Н. Данилевский; заявитель Государственное предприятие «Институт НИПТИС» - № 20060978; заявл. 05.10.2006; опубл. 30.12.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. Уласнасці – 2008.

- 28 Деменцов, В.И. Практическое применение высокоэффективного теплоизоляционного материала STYROFOAM / В.И. Деменцов // Строит, материалы. – 1996. – №6.
- 29 Данилевский, Л.Н. К вопросу о снижении уровня теплопотерь здания / Л.Н. Данилевский // Опыт Белорусско-Германского сотрудничества в строительстве. – Минск: НПООО Стринко, 2000. – с. 76-77
- 30 Рекомендации по проектированию и применению для строительства и реконструкции зданий. / Фасадная система ПОЛИАЛПАН. – ОАО ЦНИИЭП жилища. Москва, 2003, 90 с.
- 31 Проектирование и устройство системы утепления с вентилируемой воздушной прослойкой на основе панелей фасадных трехслойных: Р1.04.032.07. – Минск: 2007, 117 с.
- 32 Данилевский, Л.Н. Системы теплоизоляции зданий с воздушной прослойкой. / Л.Н. Данилевский, Б.И. Таурогинский // Строительная наука и техника. – 2011. - №1, с.
- 33 Данилевский, Л.Н. Система теплоизоляции здания / Л.Н. Данилевский, Б.И. Таурогинский // заявка № 20101614 от 19.01.2011г. МПК E04C 2/26
- 34 Мартыненко, О.Г., Соковишин, Ю.А. Свободно – конвективный теплообмен. Справочник. / О.Г. Мартыненко, Ю.А. Соковишин. – Минск: Наука и техника, 1982. – 400с.
- 35 Осипов, С. Н., Саука У.О. Сравнение способов предотвращения инееобразования на теплообменной поверхности рекуперативных теплоутилизаторов животноводческих помещений. / С. Н.Осипов, У.О.Саука // Известия академии наук Латвийской ССР, серия физических и технических наук. 1988. – №2. – с.77-84.
- 36 Осипов, С. Н., Саука У.О. Методика численного расчета незамерзающего теплообменника – утилизатора. / С. Н.Осипов, У.О.Саука // Известия академии наук Латвийской ССР, серия физических и технических наук. – 1986. – №2. – с.65-71.

- 37 Измерения в промышленности. Справочник, кн. 3 -
М.:Металлургия, 1990. – 344 с.
- 38 Васильев, Л.Л. Теплофизические свойства пористых материалов /
Л.Л. Васильев, С.А. Танаева.–Мн.: Наука и техника, 1971.– 267 с.
- 39 Каганер, М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур/
М.Г. Каганер.– М.: Машиностроение, 1966.– 275 с.
- 40 Чудновский, А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных
материалов/ А.Ф. Чудновский.– М.: Из. АН СССР, 1962.– 456 с.
- 41 Сайт украинской компании ОРИСИЛ [Электронный ресурс] .
2011. – Режим доступа: [http://www. orisil.ua](http://www.orisil.ua). – Дата доступа: 19.09.2011
- 42 Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и
дисперсные системы. / Ю.Г. Фролов. – М.: Химия, 1988. - 464 с.

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОПOTЕРЬ ЧЕРЕЗ ОКОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

1 Введение

Теплопотери через окна составляют до 20% суммарных теплопотерь здания. Поэтому в течение последних десяти лет сделано многое по созданию конструкций окон с пониженным уровнем теплопотерь. Основные направления совершенствования конструкций окон - совершенствование конструкции оконной коробки и стеклопакета. В странах Западной Европы [1-3] и в Республике Беларусь [4-8] на настоящий момент разработаны и выпускаются серийно окна с термическим сопротивлением более $1,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Такие окна позволяют строить в нашей климатической зоне здания с уровнем теплоснабжения $30 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ в год и ниже [5], т.е. сделать качественный скачок в области энергосбережения при эксплуатации зданий.

В [5,9] рассмотрены методы расчета и конструкции окон с использованием современных технологических приемов. Уменьшение теплопотерь через оконный проем достигается увеличением количества стекол - использованием однокамерных и двухкамерных стеклопакетов. В двухкамерных стеклопакетах снижается значение конвективной составляющей теплообмена по сравнению с однокамерным стеклопакетом при равной толщине стеклопакета. Снижение значения конвективной составляющей теплообмена можно достигнуть заполнением стеклопакета газом с низкой теплопроводностью – углекислым газом, аргоном, криптоном или ксеноном, использованием дистанцирующей рамки с низким термическим сопротивлением. Наиболее эффективно, однако технически труднореализуемо, вакуумирование межстекольного пространства.

Термическое сопротивление оконной коробки и переплета для окон должно быть равным или больше термического сопротивления стеклопакета. С этой целью оконный блок целесообразно изготавливать с использованием эффективного утеплителя, например, пенополистирола или пенополиуретана. В пластиковых окнах с этой целью увеличивают количество воздушных камер в профиле. Снижение радиационных теплопотерь через окна достигается нанесением на поверхность стекол селективно отражающих покрытий [10]. Такие покрытия должны обладать свойствами, обеспечивающими частотную зависимость коэффициента отражения с максимумом в инфракрасной области и минимумом в области видимого спектра. Это уменьшает лучистую составляющую теплопотерь из помещений в инфракрасном диапазоне излучения, обеспечивая хорошую прозрачность. Методы оптимизации

покрытий, обеспечивающие выполнение заданных характеристик окон сохраняют свою актуальность.

2 Оптимизация многослойных покрытий низкоэмиссионных стекол

Прозрачные отражатели тепла с заданными частотными характеристиками пропускания электромагнитного излучения состоят из тонких слоев металла или полупроводника, осажденных на стекле. Они представляют собой интерференционные покрытия.

Свойствами отражения инфракрасного излучения обладают тонкие слои металлов (золота, серебра) [10, 11], но они обладают также свойствами поглощением и отражением в видимой области спектра, поэтому непригодны для использования в случаях, когда требуется высокая передача видимого света. На рисунках 1 – 2 [12-14] представлены спектральные характеристики пропускания, отражения и поглощения слоя серебра при различных геометрических толщинах, а на рисунке 3 - слоя золота.

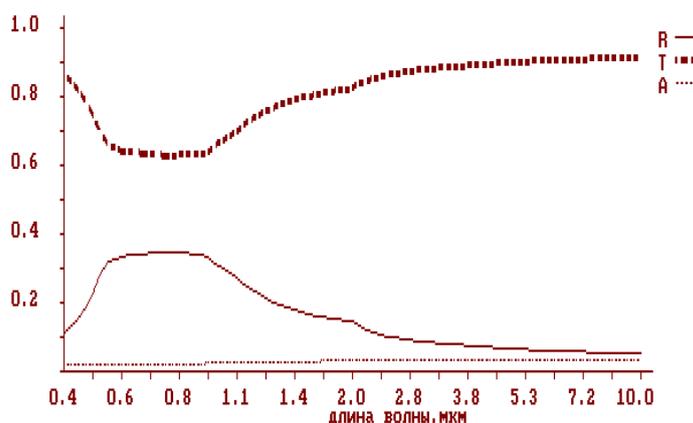


Рисунок 1 – Зависимости коэффициентов отражения (R), пропускания (T) и поглощения (A) слоя серебра толщиной $t=0.0125\text{мкм}$, расположенного на стеклянной подложке от длины волны (логарифмическая шкала)

Графики, приведенные на рисунках 20-21, показывают, что однослойные металлические покрытия из указанных металлов не обеспечивают выполнение сформулированных выше требований. Эти слои отражают электромагнитные колебания низкочастотной части видимого спектра и высокочастотной части инфракрасного излучения. К длинноволновой части инфракрасного излучения, в области длин волн около

10 мкм, характерной для теплового излучения из жилых квартир, коэффициент пропускания излучения увеличивается.

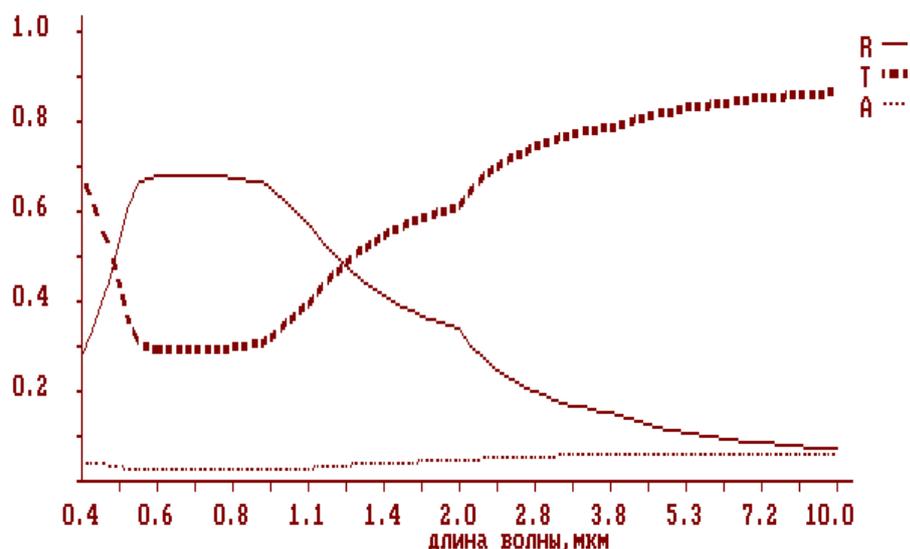


Рисунок 2 – Зависимости коэффициентов отражения (R), пропускания (T) и поглощения (A) слоя серебра толщиной $t=0.025$ мкм на стеклянной подложке от длины волны (логарифмическая шкала)

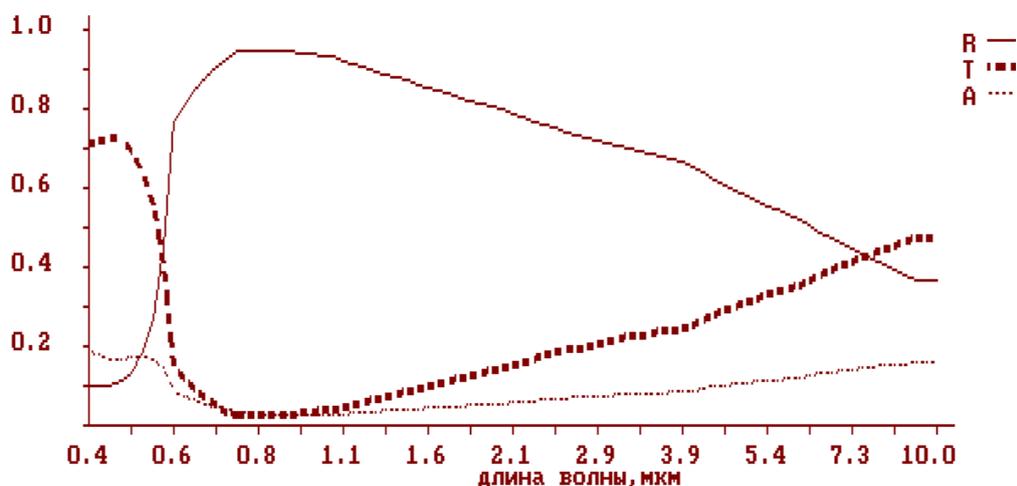


Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов отражения (R), пропускания (T) и поглощения (A) слоя золота толщиной $t=0.0083$ мкм, на стеклянной подложке от длины волны (логарифмическая шкала)

Проектирование покрытий с заданными спектральными характеристиками включает выбор структуры покрытия и последующее определение параметров слоев, обеспечивающих заданные оптические характеристики. Под оптическими характеристиками понимают спектральные

зависимости энергетических коэффициентов отражения R , пропускания T и поглощения A световой волны при отражении и прохождении многослойной структуры.

Задача проектирования многослойных интерференционных покрытий разбивается на две. Первая (прямая) задача заключается в расчете оптических характеристик покрытия с известной структурой и базируется на решении стационарного волнового уравнения в приближении плоских волн. К настоящему времени разработано большое число вычислительных схем, применяемых для расчета характеристик интерференционных покрытий. Наиболее распространенным является подход, основанный на вычислении тангенциальных составляющих векторов напряженности электрических и магнитных полей последовательно на всех границах слоев, образующих покрытие. Вторая задача (задача синтеза покрытия) является обратной по отношению к первой. До настоящего времени не разработан строгий метод решения этой задачи, пригодный для проектирования покрытий всех типов. Основные трудности, встречающиеся при выполнении этой задачи, связаны с необходимостью решения системы нелинейных уравнений. Решение таких систем в замкнутой форме удается получить в очень немногих случаях. С этим связано существование большого числа методов проектирования, ориентированных главным образом на решение частных задач.

В последние годы интенсивно разрабатываются компьютерные методы проектирования многослойных покрытий. Основным преимуществом компьютерных методов проектирования является то, что они, в принципе, позволяют учитывать точную математическую модель покрытия.

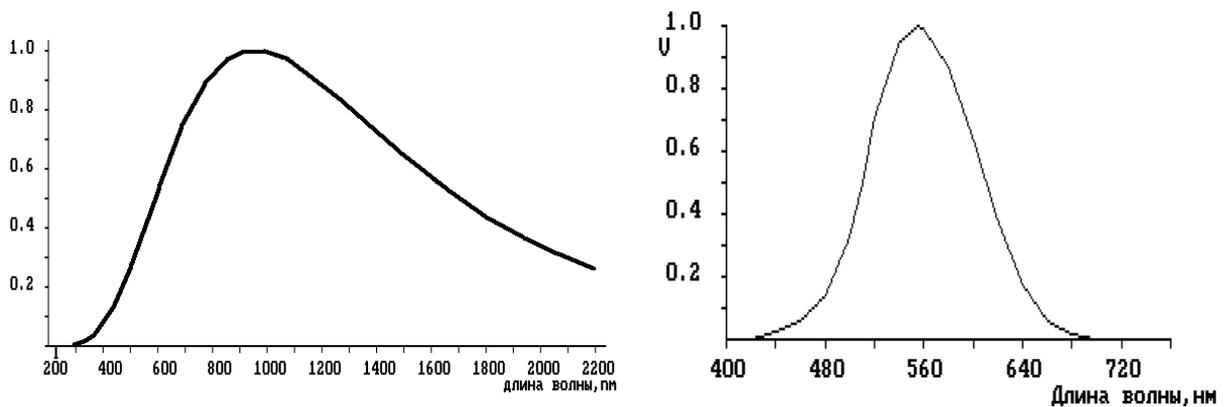
Конструктивными параметрами, определяющими оптические характеристики многослойных покрытий, являются оптические толщины d и показатели преломления n слоев покрытия. Численное проектирование удобно проводить, используя концепцию целевой функции, т. е. величины, которая выражается посредством одного только числа, она используется во многих методах, чтобы контролировать процесс вычислений.

Целевая функция есть функция всех конструктивных параметров оптимизированной системы. Возможно, например, определить ее как среднее квадратичное отклонение между требуемой спектральной характеристикой покрытия и получающейся спектральной характеристикой. Меньшее значение целевой функции выражает стремление характеристики системы к цели. В задаче оптимизации многослойных покрытий на стекле, обеспечивающих заданные свойства, целевая функция имеет вид:

$$F(\vec{d}, \vec{n}) = \frac{1}{N_k} \sum_k^{N_k} B_k(\lambda) \left(\int_{\lambda_{1k}}^{\lambda_{2k}} (R(\lambda, \vec{d}, \vec{n}) - R_0(\lambda))^2 d\lambda \right)^{1/2} + H(\vec{d}), \quad (1)$$

где $B_k(\lambda)$ - весовая функция отражения k -ого интервала, выбираемая с учетом требуемой спектральной характеристики, различная для разных спектральных интервалов; N_k - число рабочих подинтервалов длин волн; $\lambda_{1k}, \lambda_{2k}$ - соответственно, начальная и конечная длина волн k -ого рабочего интервала, м; $R(\lambda, \vec{d}, \vec{n})$ - расчетный энергетический коэффициент отражения покрытия; $\vec{n}(n_0, n_1, \dots, n_N, n_s)$ - вектор с координатами показателей преломления слоев и окружающих сред; $R_0(\lambda)$ - требуемое спектральное отражение покрытия; $\vec{d}(d_1, \dots, d_N)$ - вектор с координатами оптических толщин покрытия, м; N - число слоев; $H(\vec{d})$ - функция штрафа, реализующая технологические ограничения на толщины покрытия.

Весовая функция отражения в ИК области для случая теплоотражающего покрытия представляет собой распределение энергии спектра отражения ИК излучения и может представлять собой распределение Планка для черного излучателя [15] (3000°К) в ИК области (рисунок 4а).



а)

б)

Рисунок 4 – Спектральная плотность энергетической светимости излучателя Планка ($T = 3000\text{K}$) (а) и кривая спектральной чувствительности глаза (б)

В то время как для пропускания в видимой области эта весовая функция определяется кривой чувствительности глаза [16] (рисунок 4б) и/или распределением энергии спектра видимого излучения (рисунок 5) [16].

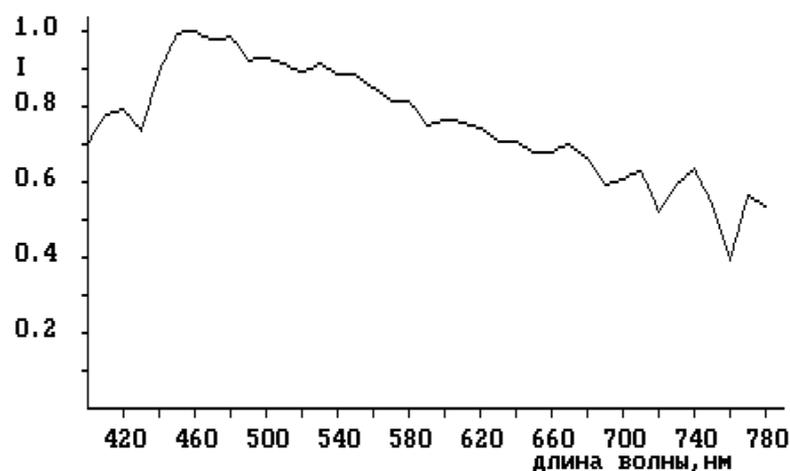


Рисунок 5 – Относительное спектральное распределение энергии стандартного излучения D65 МКО, идентичного рассеянному солнечному свету при облачном небе

С математической точки зрения тонкая пленка представляет собой плоскопараллельный бесконечно протяженный слой, толщина которого сравнима с длиной волны света. Для большинства практических применений многослойных систем достаточно хорошо выполняется предположение, что падающий свет описывается монохроматической плоской волной практически бесконечной шириной по сравнению с длиной волны, и каждый отдельный слой является однородным и изотропным. Тогда оптические свойства каждого j -го слоя полностью описываются комплексным показателем преломления

$$N_j = n_j - ik_j, \quad (2)$$

где n_j - действительная часть показателя преломления, k_j - коэффициент экстинкции и геометрической толщиной l_j . Тогда теорию оптических свойств многослойных пленочных систем с математической и вычислительной точки зрения можно рассматривать как совокупность основных определяющих соотношений. Существуют различные формы записи, используемые при расчете свойств тонких пленок, все они фактически связаны друг с другом и отличаются объемом вычислительной работы.

Расчет интерференционных явлений в данной работе проводился по формулам Бернинга [17]. Энергетические коэффициент отражения R , пропускания T и поглощения A m -слоистой системы соответственно равны:

$$R = |E_0^r / E_0^t|^2, \quad T = \text{Re}(\widehat{N}_{m+1}) / (n_0 |E_0^t|^2), \quad A = I - T - R, \quad (3)$$

где E_{0r} и E_{0t} - напряженность электрического поля отраженной и прошедшей волн, которые определяются следующими рекуррентными соотношениями:

$$E_{j-1}^t = 0.5((1 + \widehat{N}_j / \widehat{N}_{j-1})E_j^t \exp(i\Phi_j) + (1 - \widehat{N}_j / \widehat{N}_{j-1})E_j^r \exp(-i\Phi_j)), \quad (4)$$

$$E_{j-1}^r = 0.5((1 - \widehat{N}_j / \widehat{N}_{j-1})E_j^t \exp(i\Phi_j) + (1 + \widehat{N}_j / \widehat{N}_{j-1})E_j^r \exp(-i\Phi_j)), \quad (5)$$

$$E_m^t = 0.5(1 + \widehat{N}_{m+1} / \widehat{N}_m) \quad E_m^r = 0.5(1 - \widehat{N}_{m+1} / \widehat{N}_m), \quad (6)$$

$$\widehat{N}_j = N_j / \cos \Theta_j \quad (\text{p-поляризация}), \quad (7)$$

$$\widehat{N}_j = N_j \cos \Theta_j \quad (\text{s-поляризация}), \quad (8)$$

$$\Phi_j = (2\pi/\lambda) \cdot l_j \cdot N_j \cdot \cos \Theta_j \quad (\text{как для p-, так и для s- поляризации}) \quad (9)$$

$$di = li / \lambda. \quad (10)$$

В равенстве (3) $\text{Re}(\widehat{N}_{m+1})$ означает вещественную часть комплексной величины \widehat{N}_{m+1} . Выражение для $\cos \Theta_j$ имеет следующий вид:

$$\cos \Theta_j = \{[(p_j^2 + q_j^2)^{1/2} + p_j] / 2\}^{1/2} - i\{[(p_j^2 + q_j^2)^{1/2} - p_j] / 2\}^{1/2}, \quad (11)$$

$$p_j = 1 + (k_j^2 - n_j^2)[n_0 \sin \Theta_0 / (n_0 \sin \Theta_0 / (n_j^2 + k_j^2))^2], \quad (12)$$

$$q_j = -2n_j k_j [n_0 \sin \Theta_0 / (n_j^2 + k_j^2)]^2, \quad (13)$$

где Θ_0 - угол падения.

Минимизация целевой функции проводилась с использованием метода нелинейной минимизации Нелдера-Мида [18]. Такие методы в литературе называются методами поиска. Методы поиска не используют производные для минимизации целевой функции. В типичном методе поиска направление оптимизации определяется на основании предварительного вычисления целевой функции $F(\vec{x})$. Выбор метода поиска в применении к данной задаче, обусловлен тем, что, практическая постановка задачи - существование технологических ограничений на оптимизируемые параметры, большое количество экстремумов в области поиска, не дает возможности для

применения градиентных методов. Описание алгоритма оптимизации приведено в [11 - 13] и дано ниже.

3 Алгоритм оптимизации многослойных покрытий стекол

Предложенный Нелдером и Мидом метод минимизации целевой функции, в литературе называется методом поиска по деформируемому многограннику. При поиске минимума целевой функции $F(\bar{x})$ пробные вектора \bar{x} могут быть выбраны в точках пространства E_n (в n -мерном евклидовом пространстве переменных), находящихся в вершинах симплекса. Регулярным симплексом называется регулярный многогранник в E_n (множество $(n+1)$ равноудаленной точки в n -мерном пространстве). Идея метода поиска состоит в сравнении значений функции в $(n+1)$ вершинах симплекса и перемещение симплекса в направлении оптимальной точки с помощью итерационной процедуры. В первоначальных методах прямого поиска, регулярный симплекс использовался на каждом этапе. Нелдер и Мид предложили модификацию этого метода, допускающего, чтобы симплексы были неправильными. Симплекс перемещается с помощью четырех основных операций: отражения, растяжения, сжатия и редукции. Метод Нелдера-Мида является одним из самых эффективных при $n \leq 6$. Алгоритм вычислений, с использованием метода Нелдера-Мида, представлен на рисунок 6.

Целевая функция, взятая в виде (1), учитывает эффективное пропускание в ИК области $T_{ик}$ и эффективное пропускание в видимой области $R_{вид}$, которые получаются из расчетных спектров пропускания и отражения и весовых функций. Помимо $T_{ик}$ и $R_{вид}$, по известным спектрам пропускания и отражения можно также рассчитывать координаты цветности x и y теплозащитного покрытия. Координаты цветности покрытия определяются следующими выражениями [16]:

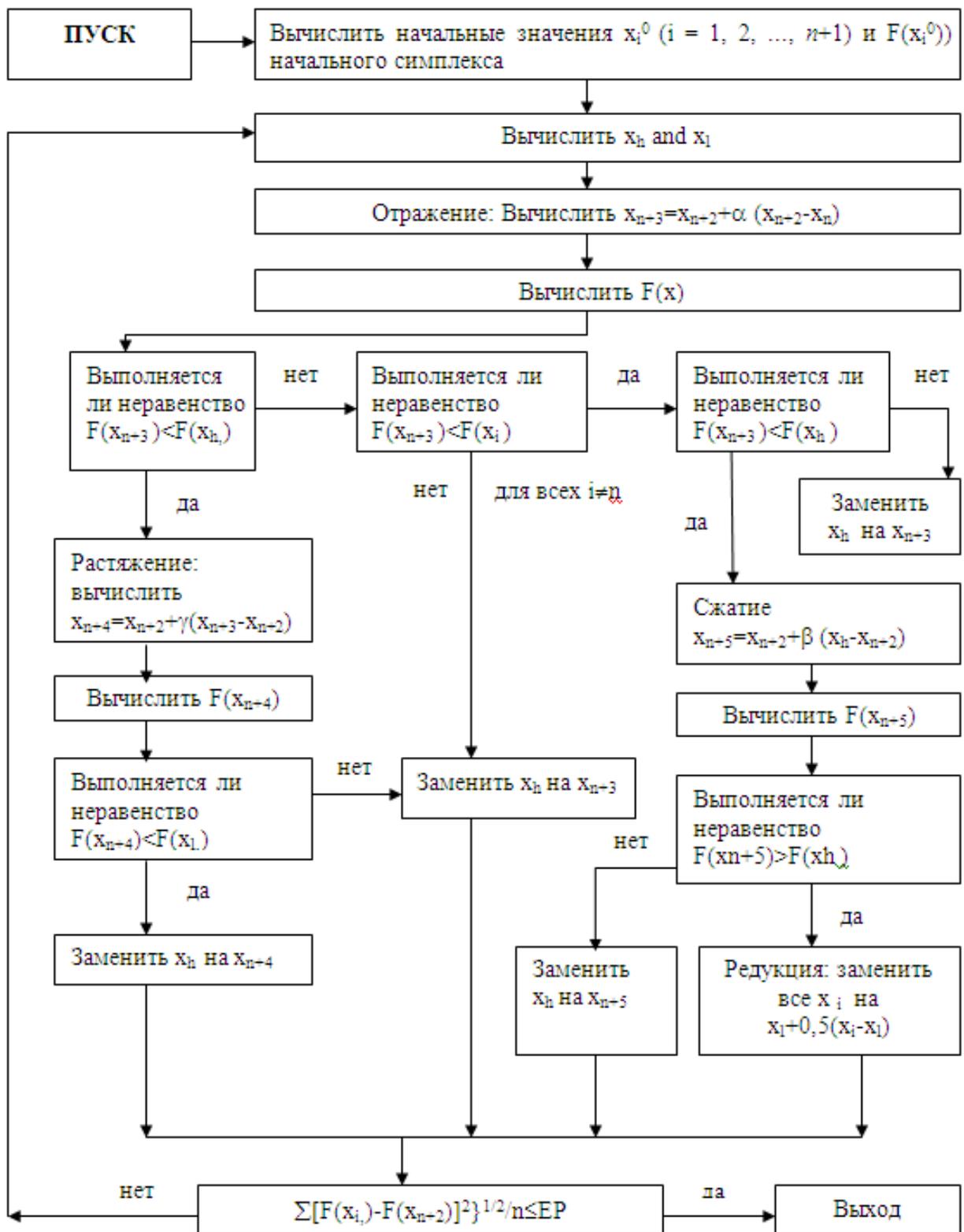


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма вычислений

$$x = X / (X + Y + Z), \quad y = Y / (X + Y + Z), \quad (14)$$

где X , Y , Z - координаты цвета покрытия, которые рассчитываются с использованием метода взвешенных ординат по формулам:

$$\begin{aligned}
 X &= K \sum_{\lambda=380}^{780} \varphi(\lambda) x(\lambda) \Delta\lambda, \\
 Y &= K \sum_{\lambda=380}^{780} \varphi(\lambda) y(\lambda) \Delta\lambda, \\
 Z &= K \sum_{\lambda=380}^{780} \varphi(\lambda) z(\lambda) \Delta\lambda, \\
 K &= 100 / \left(\sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda) y(\lambda) \Delta\lambda \right), \\
 \varphi(\lambda) &= S(\lambda) T(\lambda),
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

где $S(\lambda)$ - относительное спектральное распределение энергии стандартного излучения D65 МКО, идентичного рассеянному солнечному свету при облачном небе;

λ и $\Delta\lambda$ - соответственно длина волны и интервал длин волн;

$\bar{x}(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ - удельные координаты цвета в колориметрической системе МКО 1931Е.,

$T(\lambda)$ - спектральный коэффициент пропускания покрытия.

В программе $\Delta\lambda = 5\text{нм}$, это обеспечивало достаточную точность расчетов, если спектр $\varphi(\lambda)$ сильно меняется по длинам волн, то величина интервала длин волн $\Delta\lambda$ должна быть уменьшена.

Для получения покрытия, пропускающего белый цвет, координаты покрытия цветности покрытия должны быть примерно равны координатам цветности излучения D65 т.е., $x_0 = 0.313$, $y_0 = 0.329$. Для цветовых характеристик к целевой функции $F(\vec{d}, \vec{n})$ добавляется цветовой коэффициент, определенный выражением

$$\Phi = \frac{1}{2} \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}. \quad (16)$$

На рис. Д.1 приведена схема алгоритма вычислений.

Таким образом, целевая функция для оптимизации теплозащитного покрытия имеет вид:

$$F(\vec{d}, \vec{n}) = c_1 \cdot R_{\text{вид}} + c_2 \cdot T_{\text{ИК}} + c_3 \cdot \Phi, \quad (17)$$

где c_1, c_2, c_3 – постоянные величины.

Увеличивая c_1, c_2 или c_3 , можно сделать больший упор на хорошее пропускание видимого света, на высокое отражение ИК излучения или хорошие цветовые характеристики покрытия.

С использованием целевой функции $F(\vec{d}, \vec{n})$ было проведено численное проектирование конкретных теплозащитных покрытий с заданными спектральными характеристиками [12 - 14]. Целевая функция рассчитывалась с различными весовыми функциями в двух подынтервалах – видимом и ИК диапазоне длин волн. Показатели преломления слоев покрытия полагались заданными величинами, оптимизируемыми параметрами служили оптические толщины слоев покрытия. Поскольку эти величины должны быть реальными, то они должны удовлетворять некоторым ограничениям, которые реализовались в функции штрафов:

$$H(\vec{d}) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N (d_{\min} - d_i), & \text{если } d_i < d_{\min}, \\ \sum_{i=1}^N (d_i - d_{\max}) & \text{если } d_i > d_{\max}, \end{cases} \quad (18)$$

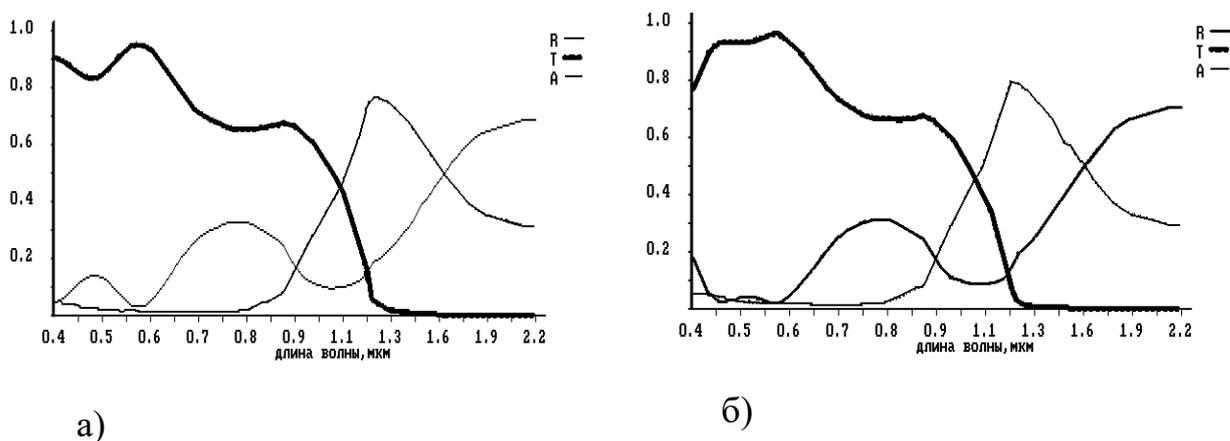
где d_{\min} и d_{\max} - соответственно, минимально и максимально возможные значения величин d_i .

Штрафы, взятые в виде (2) оказались достаточно сильными, так что все величины, получаемые в результате работы программы, всегда находятся в нужном диапазоне.

На рисунках 7 - 8 приведены примеры численного проектирования многослойных теплозащитных покрытий.

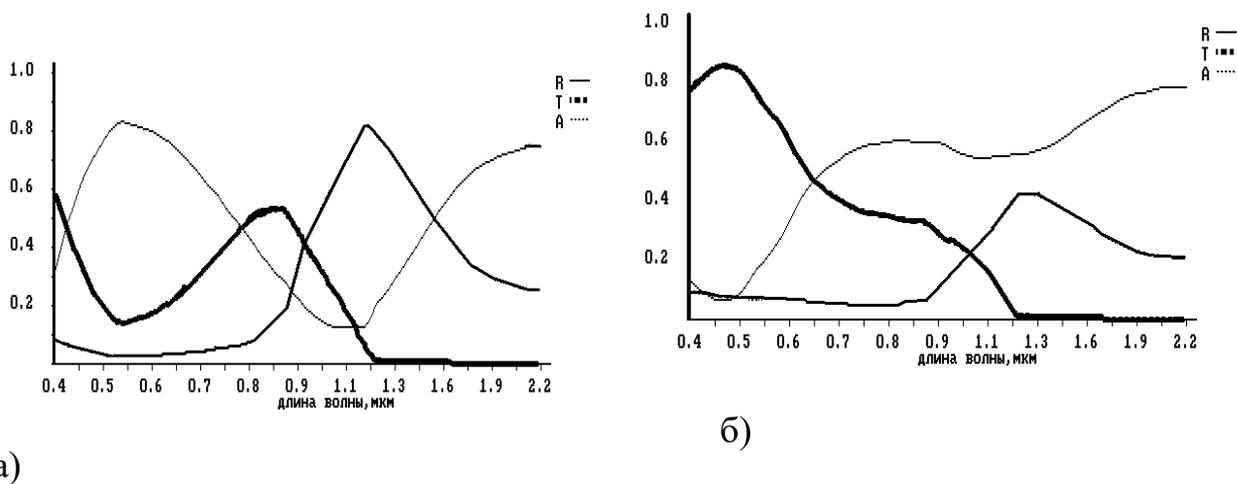
На рисунках 7 а) и 8 а) представлены покрытия, взятые в качестве начального приближения, на рисунках 7 б) и 8 б) - покрытия, полученные в результате работы программы. Из рисунка 7 б) 8 б) следует, что оптимизированные покрытия имеют более высокое пропускание в видимой области спектра, чем начальные приближения на рисунках 7 а) и 8 а). В инфракрасной области спектра пропускание покрытий близко к нулю. Следовательно, задача, поставленная при оптимизации, была достигнута.

С целью проверки оптимизационной модели в Институте физики НАН РБ на основании проведенных исполнителями НИОКР расчетов в лабораторных условиях были изготовлены и испытаны образцы стекол с напыленными слоями материалов, рассчитанных в процессе оптимизации. В частности, были изготовлены и испытаны образцы стекол с трехслойным покрытием окисью циркония-алюминия-окисью циркония, с однослойным напылением серебра, алюминия и индий-олова оксида.



Характеристики покрытия: : слой индий-олова оксида $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (1-й и 3-й), с оптическими толщинами $d = 0.125\lambda_0$, промежуточный слой (2-й) окиси кремния SiO_2 , опти $d = 0.125\lambda_0$, ($\lambda_0 = 0.8$ мкм) а - начальные значения, б) - результаты оптимизации

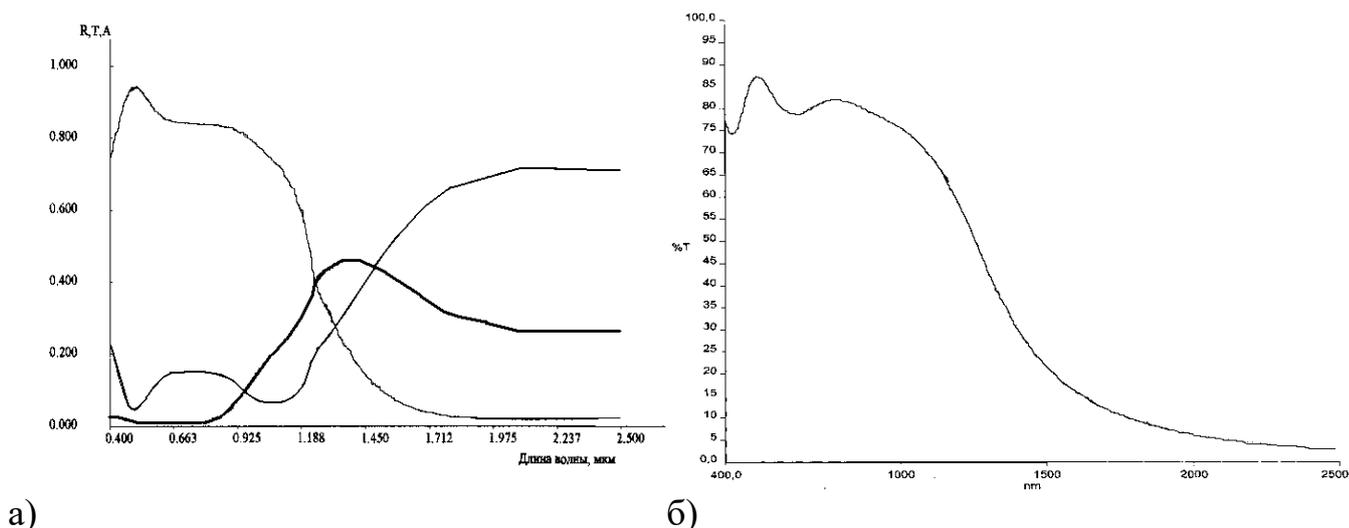
Рисунок 7 – Спектральные зависимости коэффициентов отражения (R) и пропускания (T) и поглощения (A) 3-слойного интерференционного покрытия,



Характеристикт покрытия: : слой индий-олова оксида $In_2O_3:Sn$ (1-й и 3-й), с оптическими толщинами $d = 0.125\lambda_0$, , и промежуточного слоя (2-й) серебра, толщиной $l = 0.0156\mu m$, ($\lambda_0 = 0.8 \mu m$. а) - начальные значения, б) - результаты оптимизации

Рисунок 8 – Спектральные зависимости коэффициентов отражения (R), пропускания (T) и поглощения (A) 3-слойного интерференционного покрытия

На рисунке 9а представлена расчетная, полученная по разработанному алгоритму, а на рисунке 9б - экспериментальная зависимости коэффициента пропускания опытного образца стекла с напылением слоя индий-олова оксида ($In_2O_3:Sn$) от длины волны падающего излучения.. Измерения коэффициента пропускания изготовленных образцов на рис. 9 б показали, что полученные результаты хорошо согласуются с результатами расчетов.



1-слойное покрытие из индий-олова оксида $In_2O_3:Sn$, на стеклянной подложке, оптическая толщина $d = 0.25\lambda_0$, $\lambda_0 = 0.5 \mu m$ а) -результаты оптимизации; б) – результат измерений оптических свойств изготовленного образца, в %.

Рисунок 9 – Спектральные зависимости коэффициентов отражения (R) пропускания (T) и поглощения (A)

Коэффициент пропускания стекол с покрытиями в видимой области спектра составляет 0,75-0,85, а в инфракрасной области спектра- 0,05 – 0,1. Измерения проводились на спектрометре SCAN043. Сравнение данных рисунке 9 а и рисунке 9 б показывает хорошее совпадение результатов для коэффициента пропускания, что доказывает корректность математической модели и программы расчета многослойных покрытий.

4 Расчет теплотехнических характеристик окон различной конструкции

Сопротивление теплопередаче прозрачной части окна состоит из сопротивлений теплоотдаче у внутренней со стороны помещения поверхности остекления, сопротивления теплопередаче собственно остекления окна, сопротивления теплопередаче воздушных промежутков между стеклами окна и сопротивления теплоотдаче у наружной поверхности остекления [1 – 3, 19]. Таким образом, полное сопротивление теплопередаче прозрачной части окна можно представить в виде выражения (19).

$$R_0 = R_g + R_n + \Sigma R_{en} + \Sigma R_{cm}, \quad (19)$$

где R_g - сопротивление теплоотдачи у внутренней со стороны помещения поверхности остекления, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

R_n - сопротивления теплоотдачи у наружной поверхности остекления, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

R_{en} - сопротивление теплопередаче воздушного промежутка, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

R_{cm} - сопротивление теплопередаче остекления, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

При определении сопротивления теплопередаче на внутренней и внешней поверхностях остекления и сопротивления теплопередаче воздушных промежутков между слоями стекла необходимо учитывать конвективную и радиационную составляющие процесса передачи тепла из помещения наружу. Значение сопротивления теплопередаче на внутренней поверхности остекления при этом определяется выражением:

$$R_g = \frac{1}{\alpha_g^k + \alpha_g^l}, \quad (20)$$

где α_g^k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$;

α_s^l - коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м² К);

Сопротивление теплопередаче замкнутых воздушных промежутков между слоями остекления может быть представлено в виде выражения

$$R_{en} = \frac{1}{\alpha_{en}^k + \alpha_{en}^l}, \quad (21)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением α_{en}^l в воздушной прослойке с учетом коэффициентов отражения на границах прослойки и многократного отражения излучения на границах прослойки можно записать в виде выражения:

$$\alpha_{en}^l = 5.67 \cdot \frac{(1-r_i)(1-r_j)}{1-r_i \cdot r_j} \cdot \left[\left(\frac{273+T_i}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+T_j}{100} \right)^4 \right] \frac{1}{T_i - T_j}, \quad (22)$$

где r_i, r_j – коэффициенты отражения на границах воздушной прослойки;

T_i, T_j – температуры на границах прослойки, °С.

Влияние конвекции на перенос теплоты через замкнутую воздушную прослойку характеризуют величиной ε_k , представляющей собой отношение эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{экв}$, учитывающего перенос теплоты через воздушный промежуток как теплопроводностью, так и конвекцией, к коэффициенту теплопроводности воздуха λ , т.е.

$$\varepsilon_k = \frac{\lambda_{экв}}{\lambda}, \quad (23)$$

Отношение ε_k является функцией произведения чисел Прандтля (Pr) и Грасгофа (Gr) [6,7] и может быть представлено в виде выражения

$$\varepsilon_k = 0.18 \cdot (\text{Pr} \cdot \text{Gr})_{\delta}^{0.25}, \quad (24)$$

Причем, в качестве характерного размера принята ширина воздушного промежутка δ , м.

Используя выражения (23) и (24) для коэффициента теплоотдачи воздушного промежутка, обусловленного конвекцией, можно записать выражение:

$$\alpha_{en}^k = \frac{\lambda_{экв}}{\delta} = \frac{0.18 \cdot \lambda \cdot (\text{Pr} \cdot \text{Gr})_{\delta}^{0.25}}{\delta}, \quad (25)$$

Учитывая, что в число Грасгофа в качестве множителя входит разность температур между границами воздушной прослойки ΔT , выражение (25) удобнее представить в виде выражения

$$\alpha_{en}^k = C_{en} \cdot \Delta T^{0.25}, \quad (26)$$

где величина C_{en} зависит только от значений физических характеристик газа, заполняющего воздушный промежуток.

С учетом выражений для чисел Прандтля и Грасгофа постоянную C_{en} можно записать в виде выражения

$$C_{en} = \frac{0.18 \cdot \lambda}{\delta} \cdot \left(\frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} \cdot \frac{g \beta \delta^3}{\nu^2} \right)^{0.25}, \quad (27)$$

где ν - кинематический коэффициент вязкости, м²/с;

c_p - теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг К);

g – ускорение свободного падения м/с²;

β - температурный коэффициент объемного расширения, К⁻¹.

Используя значения величин из [20], для различной толщины воздушного промежутка были вычислены значения коэффициента C_{en} [19]. Результаты вычислений приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Значения коэффициента C_{en} для различной толщины воздушного промежутка

| Толщина воздушного промежутка δ , м | C_{en} , Вт/(м ² К ^{5/4}) | | |
|--|--|----------------|--------|
| | Воздух | Углекислый газ | Аргон |
| 0.005 | 1.789 | 1.534 | 1.257 |
| 0.010 | 1.504 | 1.290 | 1.057 |
| 0.013 | 1.408 | 1.208 | 0.989 |
| 0.015 | 1.359 | 1.166 | 0.955 |
| 0.020 | 1.265 | 1.085 | 0.888 |
| 0.025 | 1.1965 | 1.026 | 0.840 |
| 0.030 | 1.143 | 0.980 | 0.803 |
| 0.035 | 1.100 | 0.943 | 0.7725 |
| 0.040 | 1.064 | 0.912 | 0.747 |
| 0.045 | 1.033 | 0.886 | 0.725 |
| 0.050 | 1.006 | 0.863 | 0.707 |

| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| 0.055 | 0.982 | 0.842 | 0.690 |
| 0.060 | 0.977 | 0.824 | 0.675 |
| 0.065 | 0.942 | 0.808 | 0.662 |
| 0.070 | 0.925 | 0.793 | 0.650 |
| 0.075 | 0.909 | 0.780 | 0.638 |
| 0.080 | 0.895 | 0.767 | 0.628 |
| 0.085 | 0.881 | 0.756 | 0.619 |
| 0.090 | 0.869 | 0.745 | 0.610 |

Приведенные выше выражения позволили рассчитать полное сопротивление теплопередаче стеклопакетов различной толщины при заполнении воздушных промежутков стеклопакета различными газами. С этой целью на языке программирования PASCAL была написана программа, которая методом последовательных итераций рассчитывала значения температур на всех поверхностях остекления с учетом конвективной и лучистой составляющих теплопередаче путем решения уравнения теплового баланса. Критерием окончания процесса вычислений температур на поверхностях стекол служило равенство теплового потока через остекление на внутренней и внешней сторонах остекления.

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4, \quad (28)$$

где q_1, q_2, q_3, q_4 — тепловой поток из комнаты к стеклопакету, в первом и втором воздушных промежутках стеклопакета, от стеклопакета наружу, соответственно, Вт/м²;

Значения тепловых потоков рассчитывали по формулам:

$$q_i = \Delta T_i / R_i \quad (29)$$

Одновременно с вычислением полного сопротивления теплопередаче R_0 стеклопакета определяли коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности стеклопакета $\alpha_в$ по и значения эквивалентных коэффициентов теплопроводности воздушных промежутков стеклопакета λ_1 и λ_2 , определяемых как отношение потока тепла через воздушный промежуток к разности температур на границах промежутка, умноженное на толщину воздушного промежутка. Причем, индекс 1 относится к промежутку, расположенному со стороны помещения.

$$\lambda_i = q_i \delta_i / \Delta T_i, \quad (30)$$

где δ_i — толщина i -го воздушного промежутка.

Характер зависимости сопротивления теплопередаче от величины расстояния между стеклами расстояния показан на рисунке 25 [19]. Анализ графиков на рисунке 10 показывает, что сопротивление теплопередаче стекло пакета с увеличением расстояния между стеклами увеличивается. Однако это увеличение не имеет линейной зависимости.

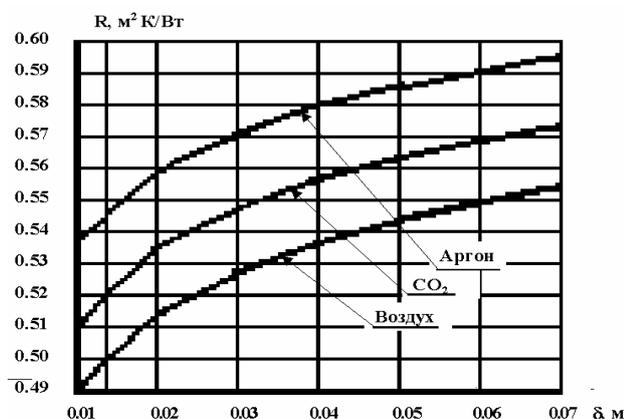


Рисунок 10 – Зависимость сопротивления теплопередаче стеклопакета от расстояния между стеклами

Результаты, представленные на рисунке 10, получены для значений коэффициентов отражения на всех поверхностях остекления стеклопакета равных 0,1. При стремлении коэффициентов отражения на границах воздушной прослойки стеклопакета к единице лучистая составляющая теплопередаче стремится к нулю. Нанесение покрытий на внутренние поверхности остекления стеклопакета, имеющих высокое значение коэффициента отражения в инфракрасной области спектра и высокое светопропускание в видимой области спектра, позволит удвоить значение сопротивления теплопередаче стеклопакета.

В таблице 2 приведены результаты вычислений теплотехнических характеристик двухкамерного стеклопакета с расстоянием между стеклами 13 мм при различных значениях коэффициента отражения внутренних поверхностей остекления.

Таблица 2 – Зависимость теплофизических величин стеклопакета от величины коэффициентов отражения поверхностей стекол

| Наименование | | Коэффициенты отражения внутренних поверхностей стекол | | | | | | |
|----------------|--|---|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.8 | 1.0 |
| Воздух | $R_0, \text{ м}^2\text{К/Вт}$ | 0.499 | 0.535 | 0.612 | 0.653 | 0.696 | 0.785 | 0.884 |
| | $\alpha_{\text{в}}, \text{ Вт.}(\text{м}^2\text{К})$ | 8.431 | 8.370 | 8.256 | 8.202 | 8.149 | 8.051 | 7.956 |
| | $\lambda_1, \text{ Вт.}(\text{м К})$ | 0.0844 | 0.0844 | 0.062 | 0.0566 | 0.0517 | 0.0437 | 0.0372 |
| | $\lambda_2, \text{ Вт.}(\text{м К})$ | 0.0778 | 0.0703 | 0.058 | 0.0537 | 0.0495 | 0.0427 | 0.0372 |
| Углекислый газ | $R_0, \text{ м}^2\text{К/Вт}$ | 0.519 | 0.561 | 0.651 | 0.700 | 0.752 | 0.866 | 0.996 |
| | $\alpha_{\text{в}}, \text{ Вт.}(\text{м}^2\text{К})$ | 8.395 | 8.329 | 8.204 | 8.144 | 8.086 | 7.973 | 7.864 |
| | $\lambda_1, \text{ Вт.}(\text{м К})$ | 0.0797 | 0.0710 | 0.057 | 0.0517 | 0.0468 | 0.0387 | 0.0321 |
| | $\lambda_2, \text{ Вт.}(\text{м К})$ | 0.0729 | 0.0653 | 0.053 | 0.0487 | 0.0446 | 0.0377 | 0.0321 |
| Аргон | $R_0, \text{ м}^2\text{К/Вт}$ | 0.545 | 0.594 | 0.703 | 0.765 | 0.831 | 0.984 | 1.169 |
| | $\alpha_{\text{в}}, \text{ Вт.}(\text{м}^2\text{К})$ | 8.353 | 8.281 | 8.140 | 8.072 | 8.005 | 7.873 | 7.742 |
| | $\lambda_1, \text{ Вт.}(\text{м К})$ | 0.0746 | 0.658 | 0.051 | 0.0463 | 0.0414 | 0.0331 | 0.0265 |
| | $\lambda_2, \text{ Вт.}(\text{м К})$ | 0.0675 | 0.0599 | 0.048 | 0.0432 | 0.0390 | 0.0321 | 0.0265 |

Результаты таблицы 2 хорошо согласуются с данными, приведенными в [1] и показывают, что даже при заполнении промежутков между стеклами воздухом при коэффициентах отражения внутренних поверхностей остекления равных единице общее сопротивление теплопередаче стеклопакета возрастает до значения $0.884 \text{ м}^2\text{К/Вт}$, а при заполнении межстекольных промежутков аргоном – до значения $1.169 \text{ м}^2\text{К/Вт}$.

Далее, с рассчитанными значениями эффективных коэффициентов теплопроводности воздушных промежутков с помощью программы TERM рассчитывалось распределение температуры в сечении оконного блока, при заполнении воздушных промежутков стеклопакета различными газами и при различных коэффициентах отражения внутренних поверхностей стеклопакета. Результаты получены для случая композитного материала, когда оконная коробка и переплет содержат внутри прослойку толщиной 30 мм из пористого пенополиуретана [19].

Были разработаны конструкции оконного профиля [21] и оконного блока [22, 23] с использованием комбинированного материала. Результаты

вычислений температурных полей и значения сопротивления теплопередаче для вариантов оконных конструкций с сопротивлением теплопередаче больше $1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ представлены на рисунках 11 -12.

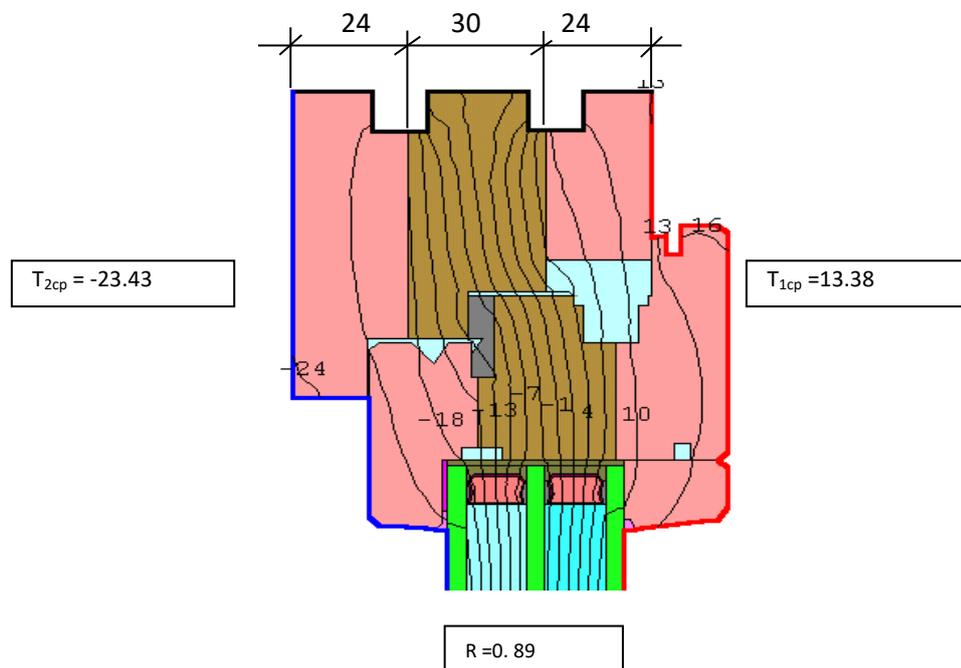


Рисунок 26– Расчетные характеристики окна с двухкамерным стеклопакетом, заполненным углекислым газом, при коэффициентах отражения внутренних поверхностей остекления близких к 1

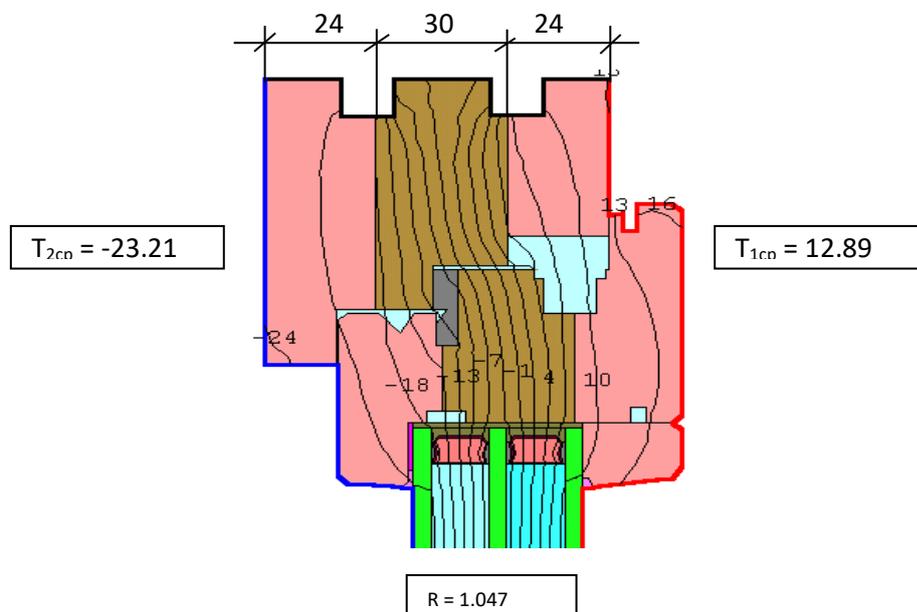


Рисунок 27 – Характеристики такого же окна с двухкамерным стеклопакетом, заполненным аргоном

Литература

- 43 Feist, W. Entwicklungen beim Passivhaus-Fenster / W. Feist // Passivhaus-Tagung, 12-20.02.99. - №3. – Bregeuz, 1999. – s. 231-241.
- 44 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten.- Teil 1.:Allgemeines (ISO 10077-1: 2006; Deutsche Fassung EN ISO 10077-1: 2006).
- 45 Franz Freund Aktuelles aus dem Bereich (Holz-) Fensterentwicklung. 8. Europäische Passivhaustagung. 16-17.04.2004. Krems. S.197 – 203.
- 46 Danilevski, L. Perspectives of the passive house standard in Belarus / L. Danilevski // 8 Europäische Passivhaustagung, Krems, Österreich, 2004, s.631-634
- 47 Данилевский, Л.Н. Естественное освещение и окна. Компромисс между светотехническими и теплотехническими характеристиками / Л.Н. Данилевский // Сб. материалов 2-й научно-практической конференции Энергоэффективные системы освещения в жилых, общественных и производственных зданиях 25 марта 1999. – Минск,1999. – с.38 – 41.
- 48 Данилевский, Л.Н. Окно с высокими теплофизическими характеристиками / Л.Н. Данилевский, Б.И. Таурогинский // Мастерская. – 2006. – №3
- 49 Данилевский, Л.Н. Окно с высокими теплофизическими характеристиками / Л. Н. Данилевский, Б.И. Таурогинский // Белорусский Строительный рынок. – 2002. – №23-24 – с.13 – 14
- 50 Данилевский, Л.Н. Новое поколение оконных конструкций / Л. Н. Данилевский, Б.И. Таурогинский // Строительный рынок. – 2006. – №1-2 – с.24 – 25
- 51 Feist, W. Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser / W.Feist - Verlag das Beispiel, 2001.
- 52 Kostlin, H., Frank, G. Dünnelelang-reflectiefilters / H. Kostlin, G. Frank // Philips Techn., 1983, V. 41, 7/8, s. 235- 248.

53 Berning, P. H. Theory and Calculation Optical Thin Films, Physics of Thin Films, v.1 / P.H. Berning. – New York, 1963.

54 Данилевский, Л.Н., Тимофеева, Г.И. Оптимизация покрытий теплозащитных стекол / Л.Н. Данилевский, Г.И. Тимофеева // Оконные технологии. – 2001. – №6 – с. 46-48.

55 Данилевский, Л.Н. Дом с минимальными теплопотерями для климатической зоны республики Беларусь. Оптимизация покрытий теплозащитных стекол / Л.Н. Данилевский, Г.И. Тимофеева // Материалы научно-технической конференции «Жилище XXI. Опыт проектирования и экспериментального строительства жилых зданий нового поколения». – Минск, 2000. – С. 28-33

56 Данилевский, Л.Н. Оптимизация покрытий теплозащитных стекол / Л.Н. Данилевский // Материалы научно-технической конференции «Опыт Белорусско-Германского сотрудничества в строительстве» / НПООО «Стринко». – Минск, 2000. – С. 129-135

57 Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.:Мир, 1982. – 520с.

58 Джадд, Г. Вышецки. Цвет в науке и технике. / Г. Джадд. – М.: Мир, 1978.

59 Даффи, Дж., Бекман, У. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. Даффи, У. Бекман –М.: Мир,1977. – 420 с.

60 Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование. / Д. Химмельблау. – М.; Мир, 1975.

61 Данилевский, Л.Н., Таурогинский Б.И. Теплофизические характеристики окон из комбинированного материала дерево-полиуретан-дерево / Л.Н. Данилевский, Б.И. Таурогинский // Строительная наука и техника. – 2006. – №5 – с. 8 – 15

62 Кузнецов, Н.И. Международная система единиц (СИ). / Н.И. Кузнецов. – Минск: Высшая школа, 1965. – 97с.

63 Конструкционный материал комбинированный клееный: пат. 1018 Респ. Беларусь, МПК7 E04C 2/00 / В.М Пилипенко, Л.Н.Данилевский, Б.И. Таурогинский, М.А. Ксенофонтов, А.С. Хатенко; заявитель Государственное предприятие «Институт НИПТИС», Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко – №20020284; заявл. 11.10.2002; опубл. 30.09.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. Уласнасці – 2003. - №4 – с.293

64 Оконный блок: пат. 1323 Респ.Беларусь, МПК7 E06B 3/00 / В.М. Пилипенко, Л.Н. Данилевский, Б.И. Таурогинский, М.А. Ксенофонтов, А.С. Хатенко; заявители Государственное предприятие «Институт НИПТИС», институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко - №20030273; заявл. 16.06.2003; опубл. 30.03.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. Уласнасці – 2004. - №1 – с.251

65 Оконный блок: пат 34603 Российск. Федерация, МПК7 E06B 3/00 / В.М. Пилипенко, Л.Н. Данилевский, Б.И. Таурогинский, М.А. Ксенофонтов, А.С. Хатенко; заявители Государственное предприятие «Институт НИПТИС», Институт прикладн. Физическ. проблем им. А.Н. Севченко - №2003120173/20; заявл.03.07.2003, опубл. 10.12.2003 // Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» / Роспатент – 2003. - №34, ч.3 – с.723 – 724