УДК 536.24:699.86 DOI: 10.15587/1729-4061.2020.194330

Разработка инженерной методики теплотехнического расчета ограждающей конструкции с воздушными камерами и теплоотражающим покрытием

У. С. Сулейменов, А. О. Костиков, Р. А. Риставлетов, М. А. Камбаров, Р. Б. Кудабаев, А. Л. Воронцова

Роботу присвячено розробці інженерної методики теплотехнічного розрахунку огороджувальних конструкцій з утеплювачем, в якому організовані повітряні камери з тепловідбивним покриттям.

Інженерна методика полягає у визначенні приведеного опору теплопередачі огороджувальної конструкції на основі розрахунку температурного поля в ній. Для знаходження температурного поля розглядається одновимірна задача теплопровідності в багатошаровій огороджувальній конструкції. Теплотехнічні неоднорідності, які викликані наявністю повітряних камер, що чергуються з прошарками матеріалу утеплювача, враховані в математичній моделі за рахунок ефективного коефіцієнта теплопровідності відповідного шару. Даний коефіцієнт враховує конвективну та променисту складові телопередачі через повітряні камери. Отримано вираз для визначення його значення, який залежить від значень температури на стиках відповідного шару з сусідніми шарами огороджувальної конструкції. Запропоновано ітераційну процедуру, що дозволяє з використанням даного виразу знаходити температурне поле в огороджувальній конструкції, що розглядається. Як вихідні дані в цій процедурі використовуються геометричні та теплофізичні характеристики елементів огороджувальної конструкції, а також температури повітря всередині і зовні приміщення і коефіцієнти тепловіддачі на відповідних поверхнях.

Інженерна методика верифікована шляхом порівняння з результатами тривимірного CFD-моделювання, яке детально враховує вільноконвективний рух в повітряних камерах і теплообмін випромінюванням між термічно неоднорідними стінками повітряної камери. Показано, що застосування одновимірної математичної моделі замість детальної тривимірної призводить до погрішностей, що не перевищують 2,5 %.

В результаті порівняльного розрахункового аналізу показано ефективність застосування запропонованого утеплювача з повітряними камерами з тепловідбивним покриттям в порівнянні з традиційними підходами до утеплення огороджувальних конструкцій. Розрахунки виконані для випадку найбільш холодної п'ятиденки в умовах кліматичної зони Шимкента (Республіка Казахстан)

Ключові слова: утеплювач з повітряними камерами, тепловідбивне покриття, приведений опір теплопередачі огороджувальної конструкції

1. Введение

Постоянное подорожание углеводородных ископаемых топлив, а также исчерпаемость их в обозримом будущем, является причиной развития энергосберегающих технологий и альтернативной энергетики. Для постсоветских стран особенно остро эта проблема стоит в жилищно-коммунальном секторе. Подавляющее большинство зданий, которые проектировались и возводились во время существования СССР при наличии бросовых цен на энергоносители, в реалиях рыночной экономики оказались неэффективными с точки зрения энергосбережения. Современные нормативные документы предъявляют повышенные требования к теплозащитным характеристикам ограждающих конструкций, которые необходимо учитывать при проектировании новых и термомодернизации существующих зданий. В связи с этим является актуальной задача поиска новых высокоэффективных подходов к снижению теплопотерь через ограждающие конструкции.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Проблеме энергосбережения в коммунальном хозяйстве посвящено немало работ. Например, вопросы энергосбережения при отоплении зданий затрагиваются в [1–9]. Один из основных путей снижения теплопотерь при отоплении зданий является повышение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. В настоящее время в качестве самого простого подхода к снижению теплопотерь рассматривается использование многослойных ограждающих конструкций, в которых наряду с несущими слоями присутствуют слои утеплителя.

Так, статье [1] исследована энергоэффективность домов в условиях канадского климата. Высокие показатели сопротивления теплопередаче стен в этих домах достигнуты за счет применения многослойных конструкции с воздушными зазорами. Вместе с тем, применение полиэтилена в таких конструкциях может привести к нарушению воздухообмена и образованию конденсата. В работе [2] рассмотрена целесообразность нанесения теплоотражающего покрытия. Вместе с тем, там отмечено, что эффективность такого покрытия во многом зависит от климатических условий, а также указано на недостаточность действенных методик расчета таких конструкций. Авторы работы [3] провели расчетное сравнение двухслойных ограждающих конструкций, работающих в различных климатических условиях. Однако используемый ими программный комплекс является коммерческим продуктом.

В статье [4] рассматриваются вопросы домов нулевого энергопотребления и почти нулевого энергопотребления. Вместе с тем, результаты их исследования во много основываются не экспериментальных данных, а не на подробном расчете теплоограждающих конструкций с учетом всех теплотехнических неоднородностей.

Автор работы [5] уделил внимание разработке путей снижения теплопотерь зданий с учетом различных климатических зон Турции. Однако он остановился только на определении оптимальной толщины теплоизоляции, без анализа возможных теплотехнических неоднородностей в ней и их влияния на тепловые потери. Вместе с тем, как указано в [6], использование традиционных теплоизолирующих материалов, особенно в условиях резко континентального климата, зачастую существенно увеличивает себестоимость ограждающих конструкций. Иными словами, возросшие капитальные затраты на утепление не окупаются в приемлемые сроки за счет снижения энергопотребления здания.

В статье [7] приведены результаты детального трехмерного моделирования переноса тепла и пара в ограждающих конструкциях в зоне теплотехнических неоднородностей, вызванных мостиками холода. Однако их модель базируется на использовании двух нестационарных уравнений переноса – для тепла и для пара. Вследствие этого расчет в воздушных прослойках ограждающих конструкций, где присутствует движение воздуха, становится невозможным. В работе [8] авторы используют метод конечных объемов для расчета теплового состояния не только ограждающих конструкций, но и всего здания в целом. Авторы статьи [9] для оценки теплового потока через многослойную ограждающую конструкцию решали задачу нестационарной теплопроводности с учетом суточных колебаний температуры наружного воздуха и инсоляции. Полученные результаты валидировались путем сравнения с данными инфракрасной термографии на внешней поверхности ограждающей конструкции. Вместе с тем, следует заметить, что в [7–9], как и в других работах, использующих трехмерное и/или нестационарное моделирование, применяется довольно сложный математический аппарат. Это накладывает на конечного пользователя требования очень высокой квалификации в области построения моделей теплофизических процессов, применения численных методов для их решения, создания и верификации программного обеспечения, анализа результатов. Поэтому рядовому проектировщику ограждающих конструкций желательно иметь упрощенную инженерную методику.

В подавляющем числе случаев низкая теплопроводность строительных материалов как тех, которые применяются в несущих слоях, так и тех, которые формируют теплоизолирующие слои, обусловлена наличием в их структуре микрообъемов, заполненных воздухом. Снизить материалоёмкость, а, следовательно, и стоимость теплоизоляции без ущерба по отношению к теплоизолирующим свойствам, а зачастую и повысив их, можно за счет применения воздушных прослоек. Основная проблема при проектировании теплоизоляции в данном случае заключается в минимизации количества тепла, передаваемого через воздушную прослойку. Как известно [10], при теплопереносе через воздушную прослойку работают все три механизма передачи тепла – теплопроводность, конвекция и излучения. Основным путем снижения конвективной составляющей является выбор такой толщины воздушной прослойки, чтобы минимизировать или полностью исключить свободноконвективное течение в ней в результате температурного перепада на противоположных стенках. Как известно [10], в вертикальных плоских воздушных прослойках свободноконвективное течение отсутствует, если число Релея не превосходит 10⁴. Для снижения лучистой составляющей теплопередачи через воздушную прослойку рекомендуется либо наносить теплоотражающие покрытия на её стенки (наиболее распространенный вариант в строительстве – алюминиевая фольга) либо применять систему экранирования. В работе по строительной теплофизике, например в [11], обоснована неэффективность применения воздушных прослоек более 5 см толщиной, а также отмечается, что применение сплошной вентилируемой воздушной прослойки приводит к значительным теплопотерям вследствие образования в ней развитого свободно-конвективного течения. Избежать этого можно за счет разделения воздушной прослойки на обособленные воздушные камеры.

Следует отметить, что в последнее время на рынке появилось довольно много новых теплоизоляционных материалов, в том числе и с воздушными прослойками и теплоотражающими покрытиями. Вместе с тем, их производители либо не приводят конкретные числовые характеристики, отражающие теплозащитные свойства таких материалов, либо данная информация носит заангажированный характер.

В действующих в строительстве нормативных документах приводятся рекомендации относительно расчета сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции. Для простейшего случая ограждающей конструкции в виде многослойной стенки с однородными слоями используется формула последовательных термических сопротивлений:

$$R = \frac{1}{\alpha_{int}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{ext}},$$
(1)

где R – сопротивление теплопередаче многослойной ограждающей конструкции, °C·м²/Вт; α_{int} – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности ограждающий конструкции, Вт/(м².°С); δ_i – толщина *i*-го слоя, м; λ_i – коэффициент теплопроводности материала *i*-го слоя, Вт/(м.°С); α_{ext} – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности ограждающий конструкции.

Во многих случаях применение формулы (1) невозможно вследствие теплотехнических неоднородностей (несплошная воздушная прослойка) или по другим причинам (например, нелинейность задачи). Тогда эти же нормативные документы рекомендуют проводить расчет температурного поля в выделенном фрагменте ограждающей конструкции, после чего приведенное сопротивление теплопередаче рассчитывается по формуле

$$R = (T_{int} - T_{ext})A/Q, \tag{2}$$

где T_{int} – расчетная температура внутреннего воздуха, °C; T_{ext} – расчетная температура наружного воздуха, °C; A – площадь поверхности рассматриваемого фрагмента ограждающего покрытия, м²; Q – суммарный тепловой поток, проходящий через рассматриваемый фрагмент конструкции, Вт.

Следует отметить, что расчет температурного поля в ограждающей конструкции с воздушными прослойками связан с решением нелинейной задачи теплопроводности. В случае теплотехнической неоднородности или наличия конвективного течения в воздушных прослойках эта задача будет двухмерной или трехмерной. Решение таких задач требует достаточно высокой квалификации в области применения численных методов интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных или в области использования готового коммерческого программного обеспечения для решения задач гидрогазодинамики и тепломассообмена. Кроме того, сам процесс решения подобных задач может потребовать достаточно больших трудозатрат и/или дорогостоящих коммерческих программных продуктов. Вместе с тем, в проектных организациях спросом пользуются довольно простые расчетные методики, которые в достаточно короткий срок могут дать результат, в том числе и в случае многовариантных расчетов.

Таким образом, можно сделать вывод, что создание высокоэффективных утеплителей для ограждающих конструкций на основе воздушных прослоек с теплоотражающими покрытиями по-прежнему остаётся востребованным на строительном рынке. При этом разработчик должен иметь инженерную методику для их теплотехнического расчета. Данная методика, с одной стороны, должна быть довольно простой, чтобы её могли использовать работники, не имеющие высокой научной квалификации. С другой стороны, она не должна приводить к существенным погрешностям вследствие введенных в математическую модель упрощений.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка инженерной методики теплотехнического расчета ограждающих конструкций с утеплителем, содержащим воздушные камеры с теплоотражающим покрытием, а также расчетное обоснование его эффективности.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

 – сформировать математическую модель теплофизических процессов, происходящих в многослойной ограждающей конструкции, в которой используется утеплитель рассматриваемой структуры;

– разработать инженерную методику расчета температурных полей в подобных ограждающих конструкциях и их сопротивлений теплопередаче, основанную на применении одномерной задачи теплопроводности;

 провести сравнительные расчеты ограждающей конструкции с рассматриваемым утеплителем и традиционных ограждающих конструкций.

4. Математическая модель многослойной ограждающей конструкции с воздушными камерами и теплоотражающим покрытием

В Южно-Казахстанском государственном университете им. М. Ауэзова предложены принципы создания высокоэффективного утеплителя из экструдированного пенополистирола (ЭПС) с воздушными камерами с теплоотражающими покрытиями. Воздушные камеры в плите пенополистирола организуются путем выемок, имеющих форму параллелепипеда, размер которых в вертикальном направлении соответствует размеру плиты пенополистирола. Ширина и глубина всех выемок одинакова, и они отделены друг от друга промежутками пенополистирола одинаковой ширины. На одну из трех поверхностей выемки, которая параллельна поверхности плиты, наносится теплотражающее покрытие из алюминиевой фольги. При монтаже такой плиты в многослойной ограждающей конструкции выемки замыкаются с четвертой стороны поверхностью соседнего слоя ограждающей конструкции, в результате чего формируются регулярно расположенные воздушные камеры, имеющие форму параллелепипеда, вертикальный размер которых намного превосходит их ширину и глубину δ4 (рис. 1). На поверхность соседнего слоя ограждающей конструкции, замыкающего выемку в пенополистирольной плите, при необходимости также может быть нанесено теплоотражающее покрытие, в результате чего экранированными оказываются две противоположные поверхности воздушной камеры. Производство плит с такими выемками и нанесенным теплоотражающим покрытием достаточно легко организовать в условиях имеющегося предприятия, изготавливающего теплоизоляционные материалы из ЭПС.



Рис. 1. Схема многослойной ограждающей конструкции с высокоэффективным утеплителем: 1 – внутренний отделочный слой, 2 – несущий слой, 3 – сплошной пенополистирол, 4 – воздушные камеры в пенополистироле, 5 – наружный отделочный слой

Инженерную методику теплофизического расчета будет строить таким образом, чтобы она была основана на решении одномерной задачи теплопроводности в ограждающей конструкции с использованием эффективной теплопроводности, которая учитывает конвективную составляющую теплопередачи в воздушных камерах, пренебрегая теплотехнической неоднородностью, вызванной чередующимися воздушными камерами и промежутками ЭСП между ними.

Пронумеруем слои последовательно, начиная с 1, от самого внутреннего к самому наружному. В математической модели слой утеплителя из ЭПС, в котором организованы прямоугольные воздушные камеры, разобьем на два слоя. Первый – слой сплошного ЭПС, в котором отсутствуют воздушные полости, второй – слой, в котором воздушные камеры, чередующиеся с промежутками ЭПС, занимают всю его толщину.

Математическую модель теплофизических процессов для рассматриваемой многослойной ограждающей конструкции будем строить исходя из следующих допущений.

Считаем, что между слоями имеется идеальный тепловой контакт. Толщиной теплоотражающих покрытий будем пренебрегать, а само покрытие рассматривать как серое тело [10] с заданным коэффициентом поглощения.

Линейный размер воздушных камер в вертикальном направлении намного превосходит линейные размеры в двух других направлениях и ширины промежутков ЭПС между воздушными камерами. Иными словами, считаем, что в вертикальном направлении слой теплоизоляции термически однороден. Остальные слои ограждающей конструкции будем принимать термически однородными во всех направлениях.

В воздушных камерах согласно [10] не будем рассматривать подробную математическую модель конвективного теплопереноса, содержащую уравнения движения Навье–Стокса. Будем описывать эти прослойки как однородное изотропное тело, с эффективной теплопроводностью, которая учитывает и кондуктивную и конвективную составляющие теплопередачи через эту прослойку. Тепловой поток за счет лучистого теплообмена между стенками воздушной камеры, параллельными внешней и внутренней поверхности ограждающей конструкции, представим в виде кондуктивного теплового потока за счет введения эффективной теплопроводности. При этом камера рассматривается как однородное изотропное тело. Переотражением на двух оставшихся стенках воздушной камеры будем пренебрегать.

Также будем пренебрегать неравномерностью температурного поля в горизонтальном направлении вдоль ограждающей конструкции, вызванной теплотехнической неоднородностью в виде чередующихся воздушных камер и промежутков ЭПС между ними. В силу последнего допущения слой, состоящий из чередующихся воздушных камер и промежутков ЭПС, будем рассматривать как однородное изотропное тело с эффективной теплопроводностью. Данная эффективной теплопроводность будет учитывать все три механизма передачи тепла (кондуктивный через ЭПС и кондуктивный, конвективный и лучистый через воздушную камеру).

Описанные допущения позволяют задачу теплопередачи через любую из исследуемых ограждающих конструкций рассматривать в одномерной стационарной постановке.

Для определения эффективной теплопроводности слоя с воздушными камерами выделим в ограждающей конструкции фрагмент, который в горизонтальном направлении вдоль ограждающей конструкции имеет линейный размер *h*, соответствующий повторяющейся геометрии теплотехнической неоднородности. Иными словами, в данном направлении будем рассматривать одну воздушную камеру с примыкающим к ней промежутком ЭПС между камерами. Таким образом,

$$h = h_{\rm B} + h_{\rm II},\tag{3}$$

где $h_{\rm B}$ – ширина воздушной камеры, $h_{\rm n}$ – ширина промежутка ЭПС между соседними воздушными камерами. Направим пространственную ось x в направлении из помещения наружу, поместив начало отсчета на внутреннюю поверхность ограждающей конструкции. Тогда, введя для толщины *i*-го слоя ограждающей конструкции обозначение δ_i , можно записать следующие выражения

$$x_0 = 0, \ x_k = \sum_{i=1}^k \delta_i, \ x_n = \sum_{i=1}^n \delta_i,$$
(4)

где x_0 – координата внутренней поверхности ограждающей конструкции; x_k – координата стыка слоёв с номерами x_k и x_{k+1} ; x_n – координата внешней поверхности ограждающей конструкции; n – число слоёв.

Запишем для каждого слоя одномерное линейное стационарное уравнение теплопроводности

$$\lambda_k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad x_{k-1} < x < x_k, \quad k = 1, \dots, n,$$
(5)

где λ_k – коэффициент теплопроводности (истинной для слоёв без воздушных прослоек или эффективной для слоёв с воздушными прослойками); T=T(x) – пространственное изменение температуры ограждающей конструкции.

На стыке слоёв в силу идеального теплового контакта выполняются соотношения, описывающие равенство температуры и теплового потока:

$$T\Big|_{x=x_{k}=0} = T\Big|_{x=x_{k}=0}, \quad k = 1, \dots, n-1, \quad (6)$$

$$\lambda_{k} \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=x_{k}=0} = \lambda_{k+1} \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=x_{k}=0}, \quad k = 1, \dots, n-1. \quad (7)$$

Конвективный теплообмен ограждающей конструкции с окружающей воздушной средой описывается следующими граничными условиями:

- на внутренней поверхности ограждающей конструкции

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=0} = \alpha_{int} \left(T\Big|_{x=0} - T_{int}\right),\tag{8}$$

– на наружной поверхности ограждающей конструкции

$$\lambda_n \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=x_n} = \alpha_{ext} \Big(T\Big|_{x=x_n} - T_{ext}\Big).$$
⁽⁹⁾

Для упрощения последующих записей введем следующие обозначения для температур стыков слоев, а также наружной и внутренней поверхности ограждающей конструкции: $T_k=T(x_k), k=0, 1, ..., n$.

Найдем выражение для эффективной теплопроводности $\lambda_{3,k}$ слоя, состоящего из чередующихся воздушных камер и промежутков ЭПС.

Поскольку воздушная камера рассматривается как однородное изотропное тело, расположенное в слое *k*, то согласно закону Фурье плотность теплового потока, проходящего через него, будет иметь следующий вид

$$q_{\rm B} = -\lambda_{_{3.{\rm B}.k}} \frac{\partial T}{\partial x},\tag{10}$$

где $\lambda_{3.B.k}$ – эффективная теплопроводность воздушной камеры.

В силу одномерности задачи и отсутствия внутренних источников тепла частная производная от температуры по пространственной координате в выражении (10) может быть точно записана в виде конечной разности:

$$q = -\lambda_{\text{3.B.k}} \frac{T_k - T_{k-1}}{\delta_k} = \lambda_{\text{3.B.k}} \frac{T_{k-1} - T_k}{\delta_k}.$$
(11)

С другой стороны, при рассмотрении воздушной камеры тепловой поток можно представить в виде суммы двух составляющих – кондуктивно-конвективной и лучистой:

$$q_{\rm B} = q_{\rm K} + q_{\rm J}, \tag{12}$$

где q_{κ} – плотность кондуктивно-конвективной составляющей теплового потока; q_{π} – плотность лучистой составляющей теплового потока.

Согласно [10] в вертикальных воздушных прослойках между плоскими стенками, кондуктивно-конвективный теплоперенос при естественной конвекции можно адекватно описывать математическими моделями для неподвижных слоёв, используя понятие эффективного коэффициента теплопроводности λ_{κ} , который определяется следующим образом:

$$\lambda_{\kappa} = \lambda_{B} \text{ при Ra} < 10^{4},$$

 $\lambda_{\kappa} = \lambda_{B} \cdot 0,062 \cdot \text{Ra}^{1/3} \text{ при } 10^{4} < \text{Ra} < 10^{4},$
(13)
 $\lambda_{\kappa} = \lambda_{B} \cdot 0,22 \cdot \text{Ra}^{1/4} \text{ при } 10^{7} < \text{Ra} < 10^{10},$

где $\lambda_{\rm B}$ – истинное значение коэффициента теплопроводности воздуха;

$$Ra = \frac{g\delta^3\beta\Delta T}{v}Pr$$

– число Релея; *g* – ускорение свободного падения; δ – толщина воздушного зазора, которая в рассматриваемом случае равна толщине слоя δ_k ; β – коэффициент объемного термического расширения, который для воздуха в случае нормальных условий можно принимать равным 1/273 °C; ΔT – разность температур на противоположных стенках воздушной прослойки (в рассматриваемом случае $\Delta T = T_{k-1} - T_k$); ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха при осредненных значениях температуры и давления в воздушной прослойке; Pr – число Прандтля.

Значения $\lambda_{\rm B}$, v и Pr при использовании выражений (13) берутся при осредненных значениях давления и температуры воздуха в воздушной камере. Давление можно принять равным 1 бар, а в качестве определяющей температуры рассматривать среднее арифметическое значений температуры на стенках воздушной камеры: $(T_{k-1}+T_k)/2$.

Таким образом

$$q_{\kappa} = -\lambda_{\kappa} \frac{\partial T}{\partial x}.$$
(14)

Плотность лучистой составляющей теплового потока согласно [10] может быть найдена из выражения

$$q_{\pi} = \varepsilon \sigma_0 \Big(T_{k-1}^4 - T_k^4 \Big), \tag{15}$$

где σ₀=5,67·10⁻⁸ Вт/(м²·K⁴) – постоянная Стефана–Больцмана; ε – приведенная степень черноты, которая в случае двух плоских параллельных стенок большой протяженности может быть вычислена согласно выражению

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon_{k-1}} + \frac{1}{\varepsilon_k} - 1;$$

 ε_{k-1} и ε_k – степень черноты стенок (в рассматриваемом случае –твердых поверхностей на соответствующих стыках слоев ограждающей конструкции); температуры T_{k-1} и T_k берутся в Кельвинах.

Подставляя (11), (14) и (15) в (12) и используя для (14) ту же самую конечноразностную запись частной производной от температуры, что и в (11), получим

$$\lambda_{\text{\tiny 3.B.k}} \frac{T_{k-1} - T_k}{\delta_k} = \lambda_{\kappa} \frac{T_{k-1} - T_k}{\delta_k} + \varepsilon \sigma_0 \Big(T_{k-1}^4 - T_k^4 \Big), \tag{16}$$

откуда имеем

$$\lambda_{_{\mathfrak{3}.\mathfrak{B}.k}} = \lambda_{_{\mathrm{K}}} + \frac{\delta_{_k} \varepsilon \sigma_0 \left(T_{_{k-1}}^4 - T_k^4 \right)}{T_{_{k-1}} - T_k}.$$
(17)

Величину эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{3,k}$. для всего слоя, состоящего из чередующихся воздушных камер и промежутков ЭПС, найдем, рассмотрев тепловой поток, проходящий через выделенный фрагмент рассматриваемого слоя произвольной высоты *L*, ширина которого описывается формулой (3). Его можно представить в виде суммы двух потоков

$$Q = Q_{\rm B} + Q_{\rm II},\tag{18}$$

где $Q_{\rm B}$ – тепловой поток через воздушную камеру в выделенном фрагменте слоя, $Q_{\rm II}$ – тепловой поток через промежуток ЭПС, расположенный между соседними воздушными камерами.

Тепловой поток через воздушную камеру можно представить в виде

$$Q_{\rm B} = q_{\rm B} \cdot h_{\rm B} \cdot L, \tag{19}$$

где $q_{\rm B}$ определяется согласно (11).

Тепловой поток через промежуток ЭПС можно записать как

$$Q_{\Pi} = q_{\Pi} \cdot h_{\Pi} \cdot L, \tag{20}$$

где

$$q_{\rm m} = -\lambda_{\rm m} \frac{\partial T}{\partial x}$$

– плотность теплового потока через промежуток ЭПС; λ_{π} – теплопроводность ЭПС.

Так же как и в (11) представим $q_{\rm n}$ в виде конечной разности:

$$q_{\pi} = \lambda_{\pi} \frac{T_{k-1} - T_k}{\delta_k}.$$
(21)

Подставляя (21) в (20), (11) в (19) и полученные выражения в (18), имеем

$$Q = \lambda_{_{\mathfrak{I},\mathsf{B},k}} \frac{T_{k-1} - T_k}{\delta_k} \cdot h_{_{\mathsf{B}}} \cdot L + \lambda_{_{\mathsf{I}}} \frac{T_{k-1} - T_k}{\delta_k} \cdot h_{_{\mathsf{I}}} \cdot L.$$
(22)

С другой стороны, если вести речь о теплопередаче через однородный изотропный слой с эффективной теплопроводностью $\lambda_{3,k}$, тепловой поток через него, с учетом конечно-разностного представления частной производной от температуры по пространственной координате, можно записать как

$$Q = -\lambda_{\mathfrak{s},k} \frac{\partial T}{\partial x} \cdot h \cdot L = \lambda_{\mathfrak{s},k} \frac{T_{k-1} - T_k}{\delta_k} \cdot h \cdot L.$$
(23)

Сопоставляя (22) и (23), с учетом (3) имеем

$$\lambda_{\mathfrak{s},k} \frac{T_{k-1} - T_{k}}{\delta_{k}} \cdot \left(h_{\mathfrak{s}} + h_{\mathfrak{n}}\right) \cdot L = \lambda_{\mathfrak{s},\mathfrak{s},k} \frac{T_{k-1} - T_{k}}{\delta_{k}} \cdot h_{\mathfrak{s}} \cdot L + \lambda_{\mathfrak{n}} \frac{T_{k-1} - T_{k}}{\delta_{k}} \cdot h_{\mathfrak{n}} \cdot L, \qquad (24)$$

откуда

$$\lambda_{_{\mathfrak{I},k}} = \frac{\lambda_{_{\mathfrak{I},\mathsf{B},k}} \cdot h_{_{\mathsf{B}}} + \lambda_{_{\mathsf{I}}} \cdot h_{_{\mathsf{I}}}}{h_{_{\mathsf{B}}} + h_{_{\mathsf{I}}}},\tag{25}$$

где $\lambda_{3.B.k}$ вычисляется согласно (17) с учетом (13).

Данные математические модели позволяют найти распределение температуры по толщине ограждающей конструкции T=T(x), $0 < x < x_n$.

5. Инженерная методика расчета температурных полей в ограждающих конструкциях

Поскольку задача рассматривается в стационарной постановке, то в силу отсутствия внутренних источников или стоков тепла в многослойной ограждающей конструкции плотность теплового потока, проходящего через неё, не зависит от пространственной координаты. Поэтому, зная сопротивление теплопередаче, плотность теплового потока *q*, проходящего через ограждающую конструкцию можно определить либо непосредственно из определения термического сопротивления:

$$q = \frac{T_{\text{int}} - T_{ext}}{R}.$$
(26)

Согласно закону Фурье

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}.$$
(27)

Подставляя выражение (26) с учетом (27) в правую часть (8), получим

$$-\frac{T_{\text{int}} - T_{ext}}{R} = \alpha_{\text{int}} \left(T \big|_{x=0} - T_{\text{int}} \right), \tag{28}$$

Аналогично (9) даёт

$$\frac{T_{\text{int}} - T_{ext}}{R} = \alpha_{ext} \left(T \big|_{x = x_n} - T_{ext} \right).$$
⁽²⁹⁾

Из (28) получаем выражение

$$T|_{x=0} = T_0 = T_{\text{int}} - \frac{T_{\text{int}} - T_{ext}}{\alpha_{\text{int}}R},$$
 (30)

(31)

которое с учетом (26) даёт

$$T_0 = T_{int} - q/\alpha_{int}$$
.

Из определения термического сопротивления R_k для k-го слоя имеем

$$T_k = T_{k-1} - q \cdot R_k, \tag{32}$$

где *R*_k вычисляется как

$$R_k = \frac{\delta_k}{\lambda_k},\tag{33}$$

Для слоя, состоящего из чередующихся воздушных камер и промежутков ЭПС, в (33) следует использовать эффективную теплопроводность $\lambda_{3,k}$, определяемую согласно (25). Величины, стоящие в правой части выражения (25), зависят от числа Релея и лучистой составляющей плотности теплового потока. Эти две величины, в свою очередь, определяются разностью температур (соответственно, в первой или четвертой степени) на стенках воздушной камеры. Так как значения этих температур также являются искомыми задачи, то непосредственное применение формулы (25) для расчета окончательного значения эффективной теплопроводности слоя невозможно. Чтобы решить эту проблему воспользуемся подходом, который позволит в процессе итераций уточнять упомянутые температуры и эффективную теплопроводность слоя.

В начале каждой текущей итерации по формуле (33) определяется текущее значение термического сопротивления слоя, состоящего из чередующихся воздушных камер и промежутков ЭПС. При этом в качестве λ_k используется текущее значение эффективной теплопроводности данного слоя. Для её нахождения вычисления осуществляются, исходя из значений температуры T_{k-1} и T_k , которые были найдены на предыдущей итерации. Для самой первой итерации в качестве начального приближения для λ_k можно использовать значение теплопроводности ЭПС. В результате такого подхода можно согласно (1) определить текущее значение приведенного сопротивления теплопередачи R всей ограждающей конструкции. Зная его, по формуле (26) определяется текущая величина плотности теплового потока q, проходящего через ограждающую конструкцию, а затем текущие температуры на поверхностях ограждающей конструкции и на стыках её слоев согласно (31) и (32).

После этого выполняется проверка условия останова итераций и, в случае необходимости, осуществляется переход к следующей итерации. Итерации прекращаются, когда расхождения между значениями температуры в характерных точках на предыдущей и текущей итерациях становятся меньше наперед заданной погрешности. В качестве таких характерных точек можно использовать внутреннюю и внешнюю поверхности ограждающей конструкции и все стыки слоев. Однако можно учесть тот факт, что нелинейность, которая оказывает основное влияние на скорость сходимости итерационного процесса, присуща лишь слою, состоящему из воздушной прослойки или содержащему воздушные камеры. Поэтому число проверяемых условий останова итераций можно сократить, ограничившись лишь двумя точками, соответствующими границам слоя, где присутствует данная нелинейность.

Таким образом, вышеизложенная методика позволяет определить значения температуры на поверхностях ограждающей конструкции и на стыках её слоев, плотность теплового потока через ограждающую конструкцию и её приведенное сопротивление теплопередаче. После нахождения этих значений, в случае необходимости, используя линейную интерполяцию, можно найти распределение температуры в любой точке ограждающей конструкции.

Заметим, что предлагаемую инженерную методику можно использовать для решения задач теплотехнического анализа и проектирования ограждающих конструкций с другими изоляционными материалами, или в которых воздушные камеры организуются в несущем слое.

6. Обсуждение результатов: верификация методики и сравнительные теплотехнические расчеты различных ограждающих конструкций

Для того чтобы обосновать эффективность предлагаемого утеплителя с воздушными камерами и теплоотражающими покрытиями, была проведена сравнительная оценка с традиционными схемами ограждающих конструкций (рис. 2). Было расемотрено пять схем ограждающих конструкций. Схема 1 – трехслойная стена с однородными несущим, наружным и внутренним отделочными слоями без утеплителя (рис. 2, *a*). В Схеме 2 между несущим и наружным отделочным слоем добавлен сплошной слой утеплителя из ЭПС (рис. 2, *б*). В Схеме 3 в отличие от Схемы 2 в качестве утеплителя рассматривалась сплошная замкнутая воздушная прослойка (рис. 2, *в*). В Схеме 4 в качестве утеплителя между несущим слоем и наружной отделочным слоем использовался слой предлагаемого утеплителя с воздушные камеры находились вблизи наружной отделки (рис. 1). Схема 5 отличалась от Схемы 4 тем, что слой утеплителя был развернут таким образом, что воздушные камеры примыкали к несущему слою. Геометрические и теплофизические характеристики указанных слоев приведены в табл. 1.



Рис. 2. Традиционные ограждающие конструкции: *a* – Схема 1; *б* – Схема 2; *в* – Схема 3; 1 – внутренний отделочный слой, 2 – несущий слой, 3 – пенополистирол, 4 – воздушная прослойка, 5 – наружный отделочный слой

Таблица	1
гаолица	Т

V			U U
Характеристики	слоев с	гражлающих	конструкции
r		- F	

	Тол	Ши- ри- на, см	Коэффи- циент теп-	Степень черноты		
Описание	на, см		лопровод- ности,	без теплоот- ражающего	с теплоотра- жающим по-	
			Вт/(м⋅К)	покрытия	крытием*	
Внутренний отделочный слой – цементно-песчаная штукатурка	1	_	0,76	Ι	—	
Несущий слой – кладка из кера- мического кирпича	38	_	0,58	0,93	0,03	
Утеплитель – сплошной ЭПС	5	0,03				
Утеплитель – сплошная воздуш- ная прослойка	5	0,03	—	Ι		
Предла- Сплошной ЭПС	3,5	_	0,03	0,9	0,03	
гаемый Чередующиеся по- утеплитель лосы ЭПС/воздух	1,5	1/5	_	_	_	
Цементно-песчаная штукатурка			0,76	0,91	0,03	

Примечание: * – алюминиевая фольга

Расчеты для Схем 3–5 проводились для различных вариантов нанесения теплоотражающего покрытия: без покрытия, покрытие на одной стенке воздушной камеры, покрытие на двух противоположных стенках воздушной камеры.

Перед проведением сравнительных расчетов предложенная инженерная методика и созданное программное обеспечение, которое её реализовывает,

были верифицированы путем сравнения расчетных данных, полученных для Схемы 4 с результатами CFD-моделирования. В последнем случае построенная трехмерная компьютерная модель подробно учитывала свободно-конвективное движение воздуха в воздушных камерах за счет использования уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу в приближении Буссинеска. В трехмерную CFD-модель также был включен теплообмен излучением между всеми четырьмя стенками воздушной камеры с учетом локального изменения температуры на каждой стенке. Результаты данного сравнения показали, что полученные при трехмерном CFD-моделировании вариации температуры в пределах каждого стыка слоев, которые возникают вследствие теплотехнической неоднородности, не превосходят 1 °C. При этом различие в значениях средней температуры на каждом стыке слоев, полученной в результате CFD-моделирования и предлагаемой инженерной методики не превосходит 0,8 °C. При этом расхождение в рассчитанных значениях сопротивления теплопередачи составляет не более 2,5 %. Таким образом, можно сделать вывод, что предлагаемая расчетная методика, основанная на решении одномерной задачи теплопроводности через ограждающую конструкцию, не даёт существенных погрешностей по сравнению с подробным трехмерным CFD-моделированием. Вследствие этого данную инженерную методику можно использовать для инженерных расчетов при проектировании систем теплоизоляции предлагаемого типа.

С использованием данной инженерной методики проведено сравнение указанных пяти ограждающих конструкций. При этом рассматривались условия установившегося стационарного температурного режима. В качестве исходных данных на внутренней и наружной поверхностях ограждающей конструкции были выбраны значения согласно действующим в Республике Казахстан государственным нормативам в области архитектуры, градостроительства и строительства:

- температура воздуха внутри помещения - 20 °C;

– температура наружного воздуха – –15 °С (что соответствует наиболее холодной пятидневке с обеспеченностью 0,92 в условиях климатической зоны Шымкента);

– коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях ограждающей конструкции – 8,7 и 23 Вт/(м².°С).

В табл. 2 приведены полученные расчетные результаты.

Как видно из результатов расчета, ограждающая конструкция в высокоэффективного утеплителя из ЭПС, в котором организованы воздушные камеры (схемы 4, 5) приводит к существенному снижению теплопотерь по сравнению со схемами 1, 3. В сравнении с ограждающей конструкцией, в которой в качестве утеплителя используются сплошные плиты ЭПС (схема 2), утеплитель из ЭПС с воздушными камерами снижает теплопотери лишь в случае нанесения теплоотражающего покрытия на стенки воздушных камер. В этом случае приведенное сопротивление теплопередачи ограждающей конструкции увеличивается на 2,8 % по сравнению со схемой 2. Проведенные дополнительные расчётные исследования показали, что в случае применение двух слоев ЭПС с воздушными камерами приведенное сопротивление теплопередачи ограждающей конструкции увеличивается более чем 6 % по сравнению с вариантом утепления сплошным ЭПС аналогичной толщины.

Заметим, что нанесение второго теплоотражающего покрытия не даёт существенного выигрыша по снижению теплопотерь по сравнению с односторонним покрытием (сопротивление теплопередаче при этом увеличивается лишь на 0,4 %). Очевидно, это вызвано тем, что при расчетах рассматривался вариант покрытия с довольно низкой степенью черноты (0,03). В реальных конструкциях степень черноты может быть больше этого идеального значения. Поэтому в дальнейшем необходимо проводить дополнительные исследования, по влиянию величины степени черноты покрытия на теплоизолирующие свойства соответствующего слоя ограждающей конструкции. На основании этих исследований можно делать вывод и целесообразности нанесения второго теплоотражающего покрытия на противоположной поверхности воздушной камеры.

В случае схем 4 и 5 температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и внутренней поверхностью ограждающей конструкции составляет 1,8 °C для варианта утеплителя без теплоизолирующего покрытия и 1,6 °C для варианта с теплоизолирующим покрытием. Эти значения не превосходят нормируемой величины данного параметра (4,0 °C для наружных стен жилых зданий, лечебно-профилактических и детских учреждений), приведенного государственных нормативы в области архитектуры, градостроительства и строительства Республики Казахстан.

Анализ полученных результатов показывает, что нанесение теплоотражающего покрытия на поверхность воздушной камеры приводит к увеличению числа Релея в ней. Так, в случае схемы 4 при рассматриваемых конструктивных и режимных параметрах в результате нанесения теплоизолирующего покрытия с одной стороны воздушной камеры число Релея увеличивается на 115 % (с 1615 до 3475). В случае нанесения теплоизолирующего покрытия на двух противоположных поверхностях воздушной камеры – на 120 % (с 1615 до 3553). Очевидно, что это вызвано увеличением перепада температур на её поверхностях. Этот факт необходимо учитывать, чтобы при проектировании эффективных утеплителей с теплоотражающими покрытиями нанесение последних на поверхности воздушных полостей не привело к превышению числа Релея критического значения 10⁴. При больших числах Релея в воздушной камере в дополнение к лучисто-кондуктивному способу передачи тепла начинают проявляться эффекты теплопередачи, вызванные свободноконвективным движением воздуха.

Приведенные в табл. 2 значения температур подтверждают физически объяснимый факт, вызванный повышением термического сопротивления слоя утеплителя в результате нанесения теплоотражающего покрытия. А именно – в варианте исполнения утеплителя с теплоизолирующим покрытием стенок воздушных камер температура в слоях ограждающей конструкции, которые расположены между воздушной камерой и отапливаемым помещением, выше, чем в варианте исполнения утеплителя без теплоизолирующего покрытия. Для слоев ограждающей конструкции, которые расположены по направлению от воздушных камер наружу, наблюдается обратная картина – нанесение теплоотражающего покрытия снижает в них температуру.

Таблица 2					
Значения тепл	офизических і	параметр	ов в ог	раждающей	конструкции

Π		Схема	Cxe		Схема 3		Схема 4			Схема 5		
Пара	мегр	1	ма 2	$B0^*$	B1*	$B2^*$	$B0^*$	B1*	B2*	$B0^*$	B1*	B2*
Приведе противле лопере, (°С·м	нное со- ение теп- даче <i>R</i> , ²)/Вт	0,67	2,50	1,04	1,34	1,36	2,23	2,56	2,57	2,20	2,55	2,56
Плотност вого по Вт/	гь тепло- тока, <i>q</i> , /м ²	42,00	14,0 0	33,69	26,07	25,8 0	15,73	13,68	13,60	15,93	13,75	13,65
Эффекти: мическо тивлени утеплите. (°С·м	вное тер- е сопро- ие слоя ля <i>R</i> ₃ + <i>R</i> ₄ , ²)/Вт	_	_	0,21	0,51	0,52	1,39	1,73	1,74	1,36	1,71	1,73
Число	Релея	_	_	$1,17.1 \\ 0^5$	$2,24 \cdot 1$ 0^5	$2,27 \cdot 10^5$	1615	3475	3553	1322	3179	3264
Темпера внутрен верхно	атура на ней по- сти, °С	15,17	18,3 9	16,13	17,00	17,0 3	18,19	18,43	18,44	18,17	18,42	18,43
Темпера- тура на стыке слоев	<i>T</i> ₁ , °C	14,62	18,2 1	15,68	16,66	16,6 9	17,99	18,25	18,26	17,96	18,24	18,25
	<i>T</i> ₂ , °C	-12,90	9,03	-6,39	-0,42		7,68	9,28	9,35	7,52	9,23	9,31
	<i>T</i> ₃ , °C	_	- 14,3 0	-13,31	-13,69	- 13,7 1	-10,66	-6,68	-6,51	4,38	1,73	1,61
	<i>T</i> ₄, °C	-	_	_ /	-	-	-14,21	-14,32	-14,32	-14,20	-14,31	_ 14,32
Темпера наружной ности	атура на й поверх- и, °С	-13,17	_ 14,3 9	-13,54	-13,87	- 13,8 8	-14,32	-14,41	-14,41	-14,31	-14,40	 14,41

Примечания: * – вариант расчета в зависимости от наличия/отсутствия теплоотражающего покрытия: В0 – теплоотражающее покрытие отсутствует; В1 – теплоотражающее покрытие нанесено на одной стенке воздушной камеры; В2 – теплоотражающее покрытие нанесено на двух противоположных стенках воздушной камеры

Также отметим, что для схемы 5 характерны положительные значения температуры воздуха в воздушных камерах, в отличие от схемы 4. Однако в случае схемы 5 воздушные камеры расположены ближе к внутренней поверхности ограждающей конструкции, вследствие чего относительная влажность воздуха там может быть больше, чем в воздушных камерах ограждающей конструкции, выполненной по схеме 4. Поэтому вопрос сравнения ограждающих конструкций, выполненных по схемам 4 и 5, в плане расчета точки росы и выявления возможных зон образования конденсата требует дальнейшей проработки.

7. Выводы

1. Сформирована математическая модель теплофизических процессов, происходящих в многослойной ограждающей конструкции, в которой используется утеплитель из экструдированного пенополистирола с воздушными камерами, на поверхность которых нанесено теплоотражающее покрытие. Для записи математическая модель в одномерной постановке использован подход, в котором теплотехническая неоднородность, вызванная чередующимися воздушными камерами и прослойками экструдированного пенополистирола, описывается эффективным коэффициентом теплопроводности, соответствующего слоя многослойной ограждающей конструкции. Получено выражение для данного коэффициентом теплопроводности, зависящее от соотношения значений температуры на поверхностях воздушной камеры.

2. Разработана инженерная методика расчета температурных полей в подобных ограждающих конструкциях и их сопротивлений теплопередаче. Данная методика основана на итерационном пересчете эффективного коэффициента теплопроводности для слоя утеплителя с воздушными камерами. Предложенная методика может также быть использована для решения задач теплотехнического анализа и проектирования ограждающих конструкций с другими изоляционными материалами, или в которых воздушные камеры организуются в несущем слое.

3. Разработанная инженерная методика верифицирована путем сравнения результатов расчета с результатами, полученными при трехмерном CFDмоделировании теплопередачи через соответствующую ограждающую конструкцию. В последнем случае подробно учитывались свободно-конвективное движение воздуха в воздушных камерах и теплообмен излучением между термически неоднородными стенками воздушной камеры. Результаты верификации показали, что применение предлагаемой инженерной методики, основанной на решении одномерной задачи теплопроводности, не приводит к существенным погрешностям в определении приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции. Отклонение от расчетного значения, полученного на основе расчета температурных полей с использованием трехмерного СFD-моделирования, не превосходит 2,5 %. Сравнительные расчеты показали, что наличие воздушных камер с теплоотражающими покрытиями в 5сантиметровой плите из экструдированного пенополистирола снижает теплопотери на 2,8 % по сравнению с вариантом утеплителя без воздушных камер. При нанесении теплоизоляции с воздушными камерами в два слоя экономия увеличивается до 6 % по сравнению с вариантом утепления сплошным экструдированным пенополистиролом аналогичной толщины

Литература

1. Orr, H., Wang, J., Fetsch, D., Dumont, R. (2012). Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon. Journal of Building Physics, 36 (3), 294–307. doi: https://doi.org/10.1177/1744259112460748

2. D'Orazio, M., Di Perna, C., Di Giuseppe, E., Morodo, M. (2012). Thermal performance of an insulated roof with reflective insulation: Field tests under

hot climatic conditions. Journal of Building Physics, 36 (3), 229–246. doi: https://doi.org/10.1177/1744259112448181

3. Aldawi, F., Alam, F., Date, A., Alghamdi, M., Aldhawi, F. (2013). A new house wall system for residential buildings. Energy and Buildings, 67, 403–418. doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.019

4. Thomas, W. D., Duffy, J. J. (2013). Energy performance of net-zero and near net-zero energy homes in New England. Energy and Buildings, 67, 551–558. doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.047

5. Bolattürk, A. (2006). Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. Applied Thermal Engineering, 26 (11-12), 1301–1309. doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.10.019

6. Gorshkov, A. S., Vatin, N. I., Rymkevich, P. P., Kydrevich, O. O. (2018). Payback period of investments in energy saving. Инженерно-строительный журнал, 2, 65–75. doi: http://doi.org/10.18720/MCE.78.5

7. Iodice, P., Massarotti, N., Mauro, A. (2016). Effects of Inhomogeneities on Heat and Mass Transport Phenomena in Thermal Bridges. Energies, 9 (3), 126. doi: https://doi.org/10.3390/en9030126

8. Yang, S., Pilet, T. J., Ordonez, J. C. (2018). Volume element model for 3D dynamic building thermal modeling and simulation. Energy, 148, 642–661. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.156

9. Marino, B. M., Muñoz, N., Thomas, L. P. (2018). Calculation of the external surface temperature of a multi-layer wall considering solar radiation effects. Energy and Buildings, 174, 452–463. doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.008

10. Кутателадзе, С. С. (1990). Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 367.

11. Богословский, В. Н. (2006). Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М.: ABOK Северо-Запад, 400.