

УДК 536.2 : 699.86 + 697.1

Жовмир Н.М.*Институт технической теплофизики НАН Украины*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ДЛЯ АКТИВНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ

Наведено аналіз передачі теплоти через плоску стіну будівлі з активною теплоізоляцією та визначено термічні умови її функціонування. Розглянуто можливі режими роботи активної теплоізоляції при обігріві та охолодженні будівлі. Запропоновано залежності для розрахунку теплових потоків в стіні з активною теплоізоляцією. Запропоновано визначення енергетичної ефективності активної теплоізоляції та метод її розрахунку.

Приведен анализ передачи теплоты через плоскую стену здания с активной теплоизоляцией и определены термические условия ее функционирования. Рассмотрены возможные режимы работы активной теплоизоляции при обогреве и охлаждении здания. Предложены зависимости для расчета тепловых потоков в стене с активной теплоизоляцией. Предложено определение энергетической эффективности активной теплоизоляции и метод ее расчета.

Analysis of heat transfer in flat wall of building with active insulation was conducted and thermal conditions of its functioning were determined. Possible regimes of active insulation functioning at heating and cooling of building were regarded. Equations for calculation of heat flows in wall with active insulation were suggested. Energy efficiency of active insulation was defined and approach for its calculation was suggested.

q – поверхностная плотность теплового потока;
 R – термическое сопротивление;
 t – температура;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 δ – толщина.

Индексы нижние: ai – активная теплоизоляция;

e – снаружи здания;
 i – тепловая изоляция;
 in – внутри здания;
 low – низкопотенциальная теплота;
 max – максимальное значение;
 w – стена здания;
 wi – граница стены здания и теплоизоляции.

В климатических условиях Украины на обеспечение отопления производственных, административных и жилых зданий используется около 40 % топливно-энергетических ресурсов, потребляемых в стране [1]. С повышением цены топлив это приводит к ухудшению конкурентных позиций экономики, ложится тяжелым бременем на бюджеты организаций и домашних хозяйств.

Через наружные стены теряется до 60 % теплоты, затрачиваемой на отопление здания [1]. Из-за недостаточной теплоизоляции стен в помещениях формируется неблагоприятный микроклимат – низкая температура воздуха и стен, выпадение конденсата на стенах. В таких помещениях зачастую развиваются грибки, ведущие к разрушению конструкций стены и создающие угрозу здоровью обитателей, вызывая различные аллергические реакции. Не для экономии энергии, а именно из-за термовлажностного дискомфорта владельцы жилья утепляют стены квартир и домов за свои средства, не

дожидаясь плановых ремонтов зданий за государственный счет.

Актуальными задачами являются обеспечение теплового комфорта в зданиях и снижение затрат тепловой энергии на их обогрев. Эти задачи могут быть решены, главным образом, путем улучшения теплотехнических характеристик зданий. Действующими строительными нормами установлены повышенные требования к термическому сопротивлению ограждающих конструкций, выполнение которых обязательно при строительстве новых и капитальном ремонте существующих зданий [2] и теплоизоляции оборудования [3].

В отечественной практике, как правило, для снижения тепловых потерь выполняют теплоизоляцию стен зданий материалами с низкой теплопроводностью. Однако, наряду с обычной теплоизоляцией перспективным методом снижения затрат на отопление зданий может стать применение новых видов теплоизоляции – адаптивной и активной.

Адаптивная теплоизоляция предполагает изменение ее теплоизоляционных свойств с изменением теплового состояния изолируемого объекта. Примером адаптивной теплоизоляции может быть подъем волосяного покрова животных или распушивание оперения у птиц при снижении температуры. Наследуя природу, создаются адаптивные теплоизоляционные материалы для современной одежды и тепловую изоляции салонов автомобилей.

Активная тепловая изоляция состоит в снижении тепловых потерь объекта за счет подвода теплоты в слое покрывающей его теплоизоляции. В отечественной литературе этот прием известен как защитный обогрев и широко используется в различных областях техники. Примером может быть применение защитного обогрева для компенсации тепловых потерь при точных измерениях температуры тел, а также обогреваемые стекла автомобилей, обогреваемые белье и обувь. Подобным образом устроена система термостабилизации датчиков мюонов в проекте Large Hardron Collider [4]. В перечисленных примерах не уделяют особого внимания выбору источника энергии для обогрева теплоизоляции и, чаще всего, используют электрический нагрев как наиболее удобный.

В системах активной теплоизоляции зданий в слой изоляции можно подводить низкопотенциальную теплоту. Так в конструкции стены здания, описанной в патентной заявке [5], сбросной воздух из системы вентиляции здания пропускают по каналам, выполненным между стеной и ее теплоизоляцией, при этом воздух охлаждается, отдавая тепловую энергию и уменьшая тем самым потери энергии от здания.

В ФРГ в 2007 г построено здание колледжа Zollverein вблизи города Essen, которое оснащено системой активной теплоизоляции без применения обычных теплоизоляционных материалов. Многоэтажное здание имеет форму куба с длиной грани 35 метров. В железобетонных стенах фасадов и полах здания заложена система труб, по которым циркулирует теплоноситель – антифриз. В качестве источника тепловой энергии для обогрева этого здания используется вода с температурой 30 °С, откачиваемая с глубины 1000 м из угольной шахты, законсервированной еще в 1986 году. Все эти

годы откачка воды осуществлялась непрерывно для предотвращения обрушения шахты, а вода сбрасывалась в реку Emscher. В настоящее время в промежуточном теплообменнике шахтная вода отдает теплоту антифризу, который передает ее к стенам здания, обеспечивая компенсацию тепловых потерь здания и обогрев его внутреннего пространства. Охлажденная шахтная вода сбрасывается в реку. В летнее время по системе труб циркулирует охлажденный антифриз, что обеспечивает радиационно-конвективное охлаждение здания. Проект здания разработан Японской фирмой SANAA архитекторами Kayuzo Sejima и Ryue Nishizawa [6]. Авторы проекта критикуют в том, что они совсем не использовали обычных теплоизоляционных материалов для уменьшения тепловых потерь от стен здания, и не применили тепловых насосов для более глубокой утилизации энергии шахтной воды; тем не менее, созданная система отопления работает, используя почти бесплатную энергию.

Примером активной теплоизоляции может служить конструкция стен, применяемая в солнечных домах с низким энергопотреблением – так называемая стена Тромба. Суть решения состоит в том, что стена является многофункциональной – служит и несущим элементом здания, и в ней устроен аккумулятор солнечной тепловой энергии. Важно то, что тепловые потери от стенового аккумулятора внутрь помещения идут на его обогрев, а с наружной стороны компенсируют тепловые потери, которые были бы при обычной конструкции стены.

В упомянутых публикациях описано конструктивное устройство ряда систем активной теплоизоляции, но анализ термических условий ее функционирования и энергетической эффективности не приводится. Представляет интерес насколько практически возможно и энергетически целесообразно при реконструкции существующих зданий создавать системы активной теплоизоляции и, особенно, с использованием низкопотенциальной теплоты с температурой недостаточной для прямого её использования в системе отопления здания.

Рассмотрим элемент плоской стены здания толщиной δ_w , имеющей термическое сопротивление R_w . По наружной стороне стены устроена пассивная теплоизоляция толщиной δ_i , имеющая термическое сопротивление R_i . Для упрощения полагаем, что

коэффициенты теплопроводности материалов являются постоянными в рассматриваемом интервале температур. Коэффициенты теплоотдачи от наружной стены в окружающую среду α_e и от внутренней среды к стене α_{in} также принимаем постоянными. Пренебрегая контактными термическим сопротивлением между слоями, суммарное термическое сопротивление теплопередачи через стену можно рассчитывать по известной зависимости для стационарной теплопередачи через многослойную плоскую стенку. При заданных стационарных температурах воздуха внутри здания t_{in} и снаружи t_e , используя известные уравнения теплопередачи, можно рассчитать поверхностную плотность потока тепловых потерь через стену q и температуру на границе стены и внешней теплоизоляции t_{wi} :

$$q = \frac{t_{in} - t_e}{\frac{1}{\alpha_e} + R_i + R_w + \frac{1}{\alpha_{in}}}, \quad (1)$$

$$t_{wi} = t_e + q \left(\frac{1}{\alpha_e} + R_i \right) = t_e + \frac{t_{in} - t_e}{\frac{1}{\alpha_e} + R_i + R_w + \frac{1}{\alpha_{in}}} \left(\frac{1}{\alpha_e} + R_i \right). \quad (2)$$

Предположим, что на границе теплоизоляции и стены дополнительно устраивается система активной теплоизоляции, представляющая собой пластину с пренебрежимо малым термическим сопротивлением $R_{ai} \rightarrow 0$ и весьма малой толщины $\delta_{ai} \rightarrow 0$, так что суммарная толщина стены остается почти неизменной (см. рис. 1). Полагаем, что за счет циркуляции теплоносителя по каналам активной теплоизоляции обеспечивается поддержание постоянной температуры по толщине слоя активной изоляции t_{ai} .

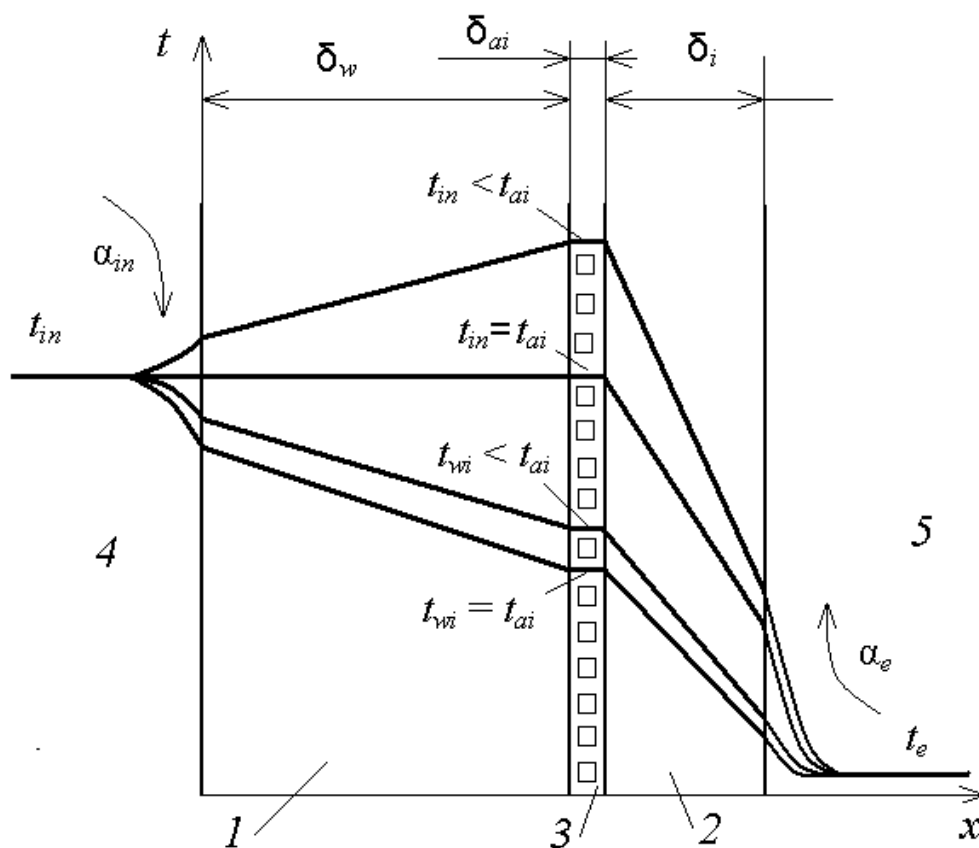


Рис. 1. Графики температурных полей в стене и слое теплоизоляции при отоплении здания при различных температурах слоя активной теплоизоляции t_{ai} . 1 — несущая стена здания, 2 — теплоизоляция наружная, 3 — активная теплоизоляция с каналами для низкопотенциального теплоносителя, 4 — внутренняя среда здания, 5 — окружающая среда.

Для стены с активной изоляцией тепловой поток от активной изоляции в окружающую среду q_e определится по зависимости:

$$q_e = \frac{t_{ai} - t_e}{\frac{1}{\alpha_e} + R_i} \quad (3)$$

С другой стороны тепловой поток от внутреннего пространства здания через стену к слою активной теплоизоляции q_{in} составит:

$$q_{in} = \frac{t_{in} - t_{ai}}{R_w + \frac{1}{\alpha_{in}}} \quad (4)$$

Равновесное состояние активной теплоизоляции будет достигнуто при подводе к ней потока тепловой энергии

$$q_{ai} = q_e - q_{in} \quad (5)$$

Рассматривая уравнения (1)...(5), можно выделить ряд возможных режимов эксплуатации активной изоляции.

Очевидно, что при обогреве здания функционирование активной теплоизоляции возможно при $t_{ai} > t_{wi} > t_e$. Возможные графики температурных полей в изолированной стене при отоплении здания показаны на рис. 1. Если температура слоя активной теплоизоляции больше температуры требуемой в помещении $t_{ai} \geq t_{in}$, тогда активная теплоизоляция полностью компенсирует тепловые потери в окружающую среду, а данный участок стены становится нагревательным элементом для внутреннего пространства здания. Однако в этом случае потери теплоты через наружную поверхность стены будут увеличены по сравнению со стеной без активной теплоизоляции. Именно такой вариант активной теплоизоляции реализован в здании колледжа Zollverein [6].

Если температура слоя активной теплоизоляции t_{ai} больше температуры, которая была бы на границе изоляционного слоя и стены без активной теплоизоляции t_{wi} , т.е. $t_{in} > t_{ai} > t_{wi}$, тогда активная теплоизоляция будет уменьшать тепловые потери от внутреннего пространства здания, уменьшая нагрузку на его систему отопления, но потери теплоты в окружающую среду будут увеличены за счет подвода энергии к активной теплоизоляции.

Если температура слоя активной теплоизоляции t_{ai} равна температуре, которая была бы на границе изоляционного слоя и стены без активной теплоизоляции t_{wi} , т.е. $t_{ai} = t_{wi}$, тогда активная теплоизоляция не влияет на тепловые потери здания. Это состояние активной теплоизоляции можно назвать выключенным, оно установится, если прекратить подвод энергии к слою активной изоляции.

При охлаждении здания функционирование активной теплоизоляции возможно при $t_{ai} < t_e$. В случае, когда температура слоя активной теплоизоляции t_{ai} меньше требуемой внутри здания температуры t_{in} , $t_{ai} < t_{in}$, рассматриваемый участок стены становится охлаждающим прибором для здания. В этом случае притоки теплоты, поступающие через наружную поверхность стены и отводимые системой хладоснабжения активной изоляции, будут увеличены по сравнению со стеной без активной теплоизоляции. Этот режим работы активной теплоизоляции реализуется при кондиционировании здания колледжа Zollverein. В холодильной технике подобный подход к охлаждению называют перехватом внешних теплопритоков.

При кондиционировании здания, в случае если температура слоя активной теплоизоляции t_{ai} меньше температуры, которая была бы на границе изоляционного слоя и этой же стены без активной теплоизоляции t_{wi} , т.е. $t_{in} < t_{ai} < t_{wi}$, тогда активная теплоизоляция будет уменьшать тепловые притоки от окружающего воздуха к внутреннему пространству здания, уменьшая нагрузку на его систему охлаждения.

Из рассмотрения приведенных выше выражений (1)...(5) для случая отопления здания следует, что со снижением температуры наружного воздуха требуемая температура теплоносителя, подаваемого в систему активной теплоизоляции, уменьшается. С другой стороны, увеличение термического сопротивления теплопередачи от активной теплоизоляции в окружающую среду, равно как и снижение термического сопротивления теплопередачи изнутри здания к активной изоляции, приводят к необходимости повышения температуры теплоносителя, подаваемого в систему активной теплоизоляции.

Целесообразность активной теплоизоляции состоит в том, что, подводя низкопотенциальную теплоту к активной изоляции, можно уменьшить

поток высокопотенциальной теплоты, подводимой к нагревательным приборам здания. При разработке активной изоляции можно полагать, что в ней может использоваться низкопотенциальная теплота непригодная для прямого использования в системе отопления здания. Преимущество системы активной теплоизоляции может быть и в том, что в ней может использоваться теплота имеющегося источника низкопотенциальной теплоты без применения теплового насоса.

На практике зачастую имеют источник низкопотенциальной теплоты с температурой выше температуры окружающей среды, но недостаточной для прямого использования в системах отопления. Например, вода систем охлаждения обычно имеет температуру 25...30 °С, грунтовые воды – от 4 до 12 °С, в зависимости от поры года и глубины горизонта, низкотемпературные геотермальные и шахтные воды – около 20 ... 30 °С. В некоторых случаях имеется низкопотенциальная теплота с температурой близкой к 0 °С, высвобождаемая при кристаллизации воды в ледогенераторе или водоеме, а также при замораживании массива влажного грунта.

Пусть имеется теплоноситель с температурой t_{low} , который будет подаваться в каналы активной теплоизоляции. Принимая, что в идеальном случае $t_{low}=t_{ai}$, а также условие $t_{ai} \geq t_{wi}$, то из уравнения (2) можно определить наивысшую температуру наружного воздуха $t_{e,max}$, ниже которой возможно функционирование системы активной изоляции при отоплении здания с использованием имеющейся низкопотенциальной теплоты:

$$t_{e,max} \leq \frac{t_{low} \left(\frac{1}{\alpha_e} + R_i + R_w + \frac{1}{\alpha_{in}} \right) - t_{in} \left(\frac{1}{\alpha_e} + R_i \right)}{R_w + \frac{1}{\alpha_{in}}}. \quad (6)$$

Значения термических сопротивлений стены R_w и теплоизоляции R_i значительно больше термических сопротивлений при конвективной теплоотдаче от внутренней среды к внутренней поверхности стены $1/\alpha_{in}$ и от наружной поверхности стены здания в окружающую среду $1/\alpha_e$, поэтому уравнение (6) можно записать в упрощенном, более удобном для практики виде:

$$t_{e,max} < t_{low} \left(\frac{R_i}{R_w} + 1 \right) - t_{in} \frac{R_i}{R_w}. \quad (7)$$

Рассмотрев приведенные выше уравнения, можно описать особенности отоплении здания, оснащенного системой активной изоляции. Когда снижение температуры наружного воздуха небольшое $t_e > t_{e,max}$, включать активную теплоизоляцию нецелесообразно, поскольку это приведет к повышению тепловых потерь из здания q_{in} . При выключенной активной теплоизоляции со снижением температуры наружного воздуха тепловые потери из здания q_{in} будут равны тепловым потерям здания без активной теплоизоляции q .

При значительном снижении температуры наружного воздуха $t_e < t_{e,max}$ достигается условие $t_{low} > t_{wi}$ и можно включать активную теплоизоляцию, при этом поток тепловых потерь изнутри здания q_{in} будет оставаться постоянным по величине. Поток тепловых потерь от наружной поверхности стены в окружающую среду q_e будет возрастать при снижении температуры наружного воздуха, причем он будет больше, нежели потери от стены без активной теплоизоляции q . Поток тепловой энергии, подводимой к активной теплоизоляции, со снижением температуры наружного воздуха возрастает от 0 при $t_{e,max}$ до значения q_{ai} , определяемого по уравнению (5).

Для иллюстрации энергетической эффективности активной изоляции рассмотрим практический пример. В здании необходимо поддерживать температуру воздуха $t_{in}=20$ °С. Кирпичная стена дома толщиной 0,4 м имеет термическое сопротивление $R_w=1,3$ м²·К/Вт. При утепляющем ремонте дома предполагается устройство наружной теплоизоляции толщиной 50 мм из материала с коэффициентом теплопроводности 0,04 Вт/м·К с внешним 10 мм защитным слоем материала, имеющего коэффициент теплопроводности 0,8 Вт/м·К. Результирующее термическое сопротивление теплоизоляции составляет $R_i = 1,2625$ м²·К/Вт. В соответствии с действующими строительными нормами [2] принимаем коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены в окружающую среду $\alpha_e = 23$ Вт/м²·К, и от внутреннего воздуха помещения к стенам $\alpha_{in} = 8,7$ Вт/м²·К. Суммарное сопротивление теплопередачи всей стены будет составлять 2,72 м²·К/Вт.

На рис. 2 линией 1-2-3 представлены данные о плотности потока тепловых потерь q через стену с обычной теплоизоляцией (без активной теплоизоляции), а также температура на границе стены и теплоизоляции t_{wi} в зависимости от температуры наружного воздуха, рассчитанные по формулам (1) и (2), соответственно.

Как альтернативный вариант рассматривается устройство между стеной и слоем теплоизоляции

дополнительной системы активной теплоизоляции, с подводом к ней низкопотенциальной теплоты с температурой, например $t_{low} = 10^\circ\text{C}$. Из уравнения (6) следует, что для рассматриваемой конструкции стены функционирование активной теплоизоляции, использующей низкопотенциальную теплоту с температурой $t_{low} = 10^\circ\text{C}$, возможно при температурах наружного воздуха ниже $t_{e,max} = 0,7^\circ\text{C}$.

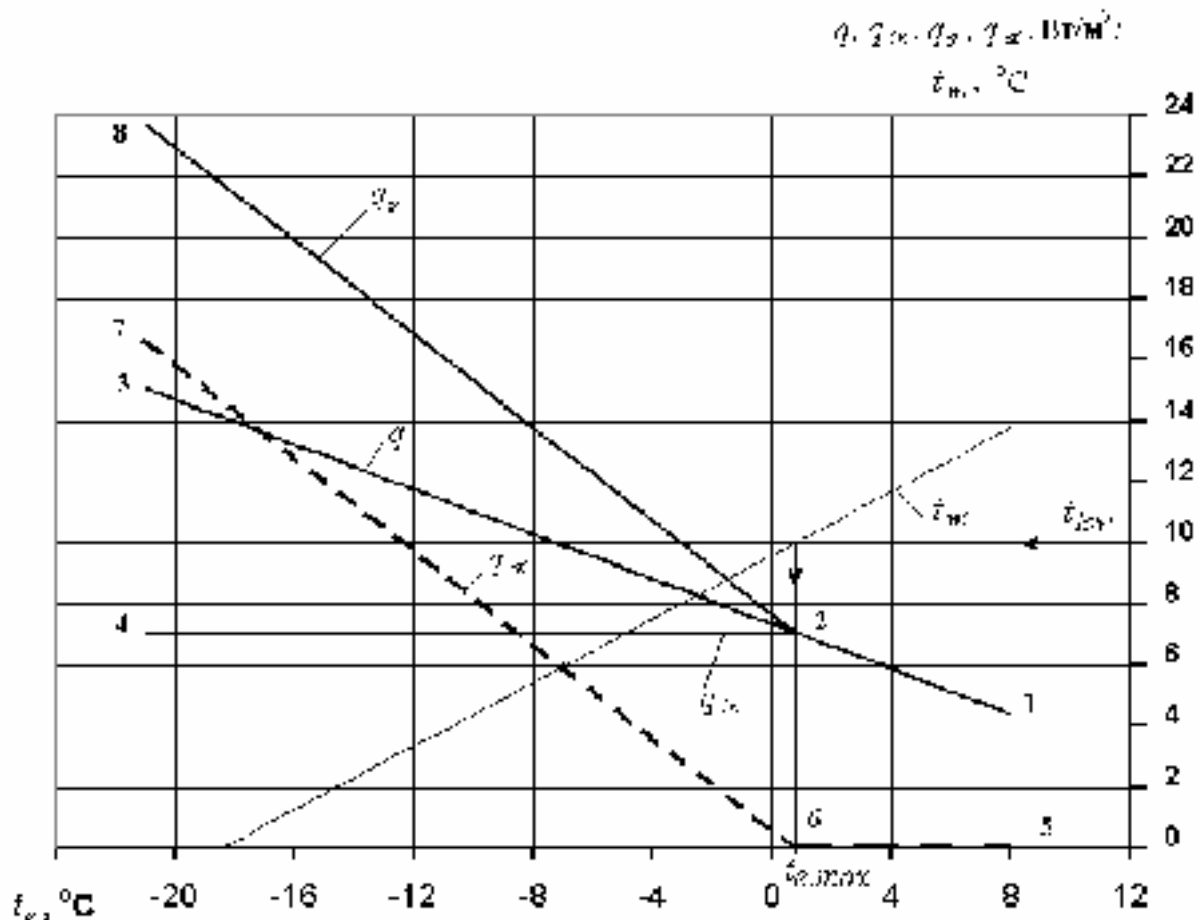


Рис. 2. Поток тепловых потерь через участок стены в зависимости от температуры наружного воздуха t_e при температуре активной теплоизоляции $t_{ai} = t_{low} = 10^\circ\text{C}$:

линия 1-2-3: через стену без активной теплоизоляции (или при выключенной активной теплоизоляции) q ;

линия 1-2-4: от внутреннего воздуха к стене с активной изоляцией q_{in} ;

линия 1-2-8: от наружной поверхности стены с активной изоляцией в окружающую среду q_e ;

линия 5-6-7: поток теплоты подводимой к активной теплоизоляции q_{ai} ;

t_{wi} — температура на границе стены и изоляции при выключенной активной изоляции.

На рис. 2 линией 1-2-4 показан тепловой поток от внутреннего воздуха к стене q_{in} для стены с активной теплоизоляцией, причем участок линии 1-2 соответствует выключенной активной тепло-

изоляции, который совпадает с линией тепловых потерь для стены без активной теплоизоляции.. Линией 1-2-8 показан тепловой поток от наружной поверхности стены с активной теплоизоляцией q_e ,

причем участок линии 1-2 также соответствует выключенной активной теплоизоляции и совпадает с линией тепловых потерь для стены без активной теплоизоляции. Линией 5-6-7 показан поток низкопотенциальной тепловой энергии, подводимой к активной теплоизоляции q_{ai} .

Из рассмотрения представленных данных следует, что в рассматриваемом примере стены с активной изоляцией, при снижении температуры наружного воздуха до минус 21 °С поток тепловых потерь из здания q_{in} снижается в два раза по сравнению со стеной без активной изоляции q . Однако, это снижение достигнуто за счет подвода низкопотенциальной теплоты q_{ai} большего, нежели достигнутое снижение тепловых потерь из здания: $q - q_{in}$. Энергетическую эффективность активной теплоизоляции можно охарактеризовать своеобразным коэффициентом полезного действия активной теплоизоляции, представляющим собой отношение достигнутого снижения тепловых потерь через стену $q - q_{in}$ к потоку низкопотенциальной тепловой энергии, подведенной к активной теплоизоляции q_{ai} :

$$\eta_{ai} = \frac{q - q_{in}}{q_{ai}}. \quad (8)$$

В условиях рассмотренного примера КПД активной изоляции $\eta_{ai} = 0,48$, т.е. на единицу низкопотенциальной теплоты, подведенной к активной изоляции, потери теплоты из здания через рассматриваемый участок стены уменьшаются на 0,48 единиц теплоты. Можно сказать, что это обеспечивает соответственное снижение потребности в высокотемпературной теплоте, подводимой к отопительным приборам здания.

Таким образом, при согласованном функционировании активной теплоизоляции, использующей имеющуюся низкопотенциальную теплоту, и существующей системы отопления здания можно достичь снижения потребления энергоносителей, использующихся для производства высокопотенциальной теплоты, подаваемой в систему отопления. Важным является то, что в ряде случаев в системе активной теплоизоляции низкопотенциальная теплота может использоваться без применения тепловых насосов.

Выводы

1. Выполнен анализ передачи теплоты через плоскую стену здания с активной тепловой изоляцией и определены термические условия ее функционирования.
2. Определены температурные границы возможных режимов функционирования активной теплоизоляции при обогреве и охлаждении здания.
3. Предложены зависимости для расчета тепловых потоков в стене с активной теплоизоляцией.
4. Определены условия использования низкопотенциальной теплоты для активной теплоизоляции стены здания.
5. Эффективность активной тепловой изоляции предложено характеризовать коэффициентом полезного действия, представляющим собой отношение достигнутого снижения тепловых потерь через стену к потоку низкопотенциальной тепловой энергии, подведенной к ее активной теплоизоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Украина: Энергосбережение в зданиях. – EC-Energy Centre Kiev. – 274 с.
2. СНиП II-3-79 Строительная теплотехника. – М.: Госстрой России, 1998. – 52 с.
3. СНиП 2.04.14-88 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – М.: Госстрой России, 1998. – 28 с.
4. Carrone E., Tsirou A. Control system design of the CERN/CMS tracker thermal screen // Proceedings of ICALEPCS2003. – Gyeongju, Korea. – P. 557–559. <http://www.epaper.kek.jp/ica03/papers/TH114.pdf>
5. Campisi F.H., Campisi J.F. Energy conserving active thermal insulation. – WIPO Pub. No WO/2007/059056, International application No. PCT/US2006/044043, E04F 13/00. <http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?wo=2007059056>
6. Lloyd Alter. Zollverein School has “active thermal insulation”. http://www.treehugger.com/files/2007/04/zollverein_school.php

Получено 14.05.2009 г.