

УДК: 621.231

Накашидзе Л.В., Габринец В.А., Трофименко А.В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭНЕРГОАКТИВНЫХ ОГРАЖДЕНИЯХ

Введение. Проблема эффективного использования энергоносителей для энергообеспечения объектов гражданского и промышленного предназначения обуславливает необходимость проведения мероприятий по энергосбережению, в первую очередь, активное использование технических решений, позволяющих эффективно использовать энергию альтернативных источников, таких как энергия солнечного излучения, тепла окружающей среды и т.п. При этом все технические решения должны учитывать соединение трех важнейших составляющих: экономики, экологии и комфорта [1]. Такой подход позволит значительно уменьшить расходы на функционирование систем энергообеспечения, существенно сократить выбросы парниковых газов и повысить комфорт эксплуатации дома. Известно, что тепловой комфорт характеризуется физиологическим состоянием человека, при котором центральная нервная система получает наименьшее количество внешних раздражений, а механизмы терморегуляции испытывают наименьшее напряжение.

В [1] подчеркивается, что потребность в тепловой энергии, необходимой для обогрева, в типовых жилых домах должна составлять приблизительно $120 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$. Однако расчеты, выполненные Институтом пассивных домов при NAFE (Национальном агентстве учета энергии в Польше), показали, что это значение во многих домах значительно больше и может достигать до $160 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$. Для снижения потребности на энергообеспечения сооружений разработан ряд подходов и современных технических решений. Так [1], например, в проектах энергосберегающих домов из Коллекции Муратора применены комплексные конструктивные решения, а также использованы современные решения системы вентиляции, центрального отопления и горячего водоснабжения. При этом приняты во внимание аспекты, способствующие уменьшению теплопотерь:

- снижение теплопотерь почти на 80 %, за счет применения принудительной вентиляции с рекуперацией тепла при подаче приточного воздуха через грунтовый теплообменник и обеспечение герметичности здания;
- применение энергосберегающих окон и наружных дверей, что позволяет снизить потерю тепла до 20–25 %;
- использование «пассивной» наружной теплоизоляции привело к сокращению теплопотери почти на 40 %;
- теплоизоляция крыш увеличенным слоем теплоизоляции, позволила сократить потери тепла на 35 %;
- увеличение толщины слоя теплоизоляции пола на грунте позволило уменьшить теплопотери почти на 35 %;
- применение конструктивных решений, в которых отсутствуют мостики холода, позволили уменьшить потери тепла более чем на 50 %.

Одним из перспективных направлений энергосбережения является разработка и внедрение энергоактивных ограждений. Идея использования энергоактивных огражде-

ний [2] является результатом поиска авторами статьи путей наиболее экономичных способов энергосбережения, энергообеспечения и рекуперации энергетических потоков объектов гражданского и промышленного назначения. Основная цель внедрения разработанного технического решения является обеспечения производства энергии непосредственно на объекте.

Энергоактивные ограждения предназначены для обеспечения тепловой защиты сооружения [3, 4], кроме того, способствовать замещению определенной части традиционных энергоносителей, воспринимая и преобразуя энергию альтернативных источников (солнечного излучения, тепла окружающей среды, тепловых потоков вентиляционных сбросов и т.п.). По сравнению с распространенными ограждающими конструкциями (пассивными), энергоактивные ограждения позволяют, регулируемо получать, преобразовывать, перераспределять и аккумулировать энергию. Их использование обеспечивает положительный энергетический баланс между поступлением энергии от солнечного излучения и окружающей среды и ее потерями [3, 4].

Важным аспектом успешного внедрения энергоактивных ограждений является точность прогнозирования и математическое описание тепловых процессов, которые происходят в многослойной конструкции энергоактивного ограждения при поступлении тепловой энергии солнечного излучения.

Прогнозирование тепловых процессов в энергоактивном ограждении. Точность прогнозирования эффективности преобразования солнечного излучения при функционировании энергоактивных ограждений в системе энергообеспечения зависит от многих факторов. В первую очередь от полноты информации о тепловом потоке, градиенте температур, распределении температур внутри объема ограждающих конструкций сооружения.

Математическое описание процесса преобразования теплового потока солнечного излучения в энергоактивных ограждениях, основано не только на дифференциальном уравнении теплопроводности Фурье. Либо дифференциальным уравнением Пуассона, в случае стационарного температурного поля. Оно определяется условиями однозначности, представляемыми в виде дополнительных уравнений. Условия однозначности включают в себя геометрические, физические, временные и граничные условия [5].

Геометрические условия характеризуют геометрические и линейные размеры энергоактивного ограждения, преобразующие энергию солнечного излучения, т.е. участвующего в процессе теплопроводности.

Физические условия характеризуют физические свойства тела, среды (λ – коэффициент теплопроводности, c – удельная массовая теплоемкость, ρ – плотность материала, α – коэффициент температуропроводности) или задается закон внутреннего тепловыделения.

Временные или начальные условия характеризуют особенности протекания процесса во времени или распределение температуры внутри энергоактивного ограждения в начальный момент времени: при $\tau = 0$ и $T = f(x, y, z)$. Очень часто в начальный момент времени тело имеет равномерную одинаковую температуру по всему объему: $\tau = 0$ и $T = T_0 = \text{const}$.

Граничные условия характеризуют процессы теплообмена между поверхностью энергоактивного ограждения и окружающей средой. Особенности определения граничных условий для энергоактивных ограждений представлены в [6].

Матеріали, використовувані при виготовленні енергоактивного огороження, вибираються таким чином, що їх фізичні властивості постійні, деформації всередині об'єму енергоактивного огороження незначительні порівняно з об'ємом конструкції, макрочастини всередині енергоактивного огороження нерухомі відносно одне одного. Тому рівняння теплопровідності Фур'є і його частині випадки виконуються.

Так як енергоактивне огороження представляє собою плоску багаторівневую структуру, то для визначення теплового потоку Q (Вт) і розподілу температури T всередині енергоактивного огороження цілорозумно прийняти ряд допущень, в відповідності з рекомендаціями в [5]. Конструкцію енергоактивного огороження можна розглядати як плоску, однорідну, ізотропну, неограничену (розміри по ширині набагато більше товщини) δ пластину, виконану з матеріалу з коефіцієнтом теплопровідності λ . Температура T_1 (при $x = 0$) – однакова на всій поверхні F енергоактивного огороження інтегрованого в фасад і/або дах споруди; температура T_2 (при $x = \delta$) однакова на всій поверхні F . Температура стінки змінюється тільки по товщині в напрямку осі x , а по осі y і z залишається постійною.

Розповсюдження теплового потоку в енергоактивному огороженні можна розглядати як явище стаціонарного розповсюдження теплоти в плоскій стінці, яке описується диференціальним рівнянням теплопровідності в формі одно-

$$\text{мерного рівняння Лапласа [5]} \quad \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{W}{\lambda} = 0, \quad \frac{d^2T}{dx^2} = 0.$$

Виходячи з одномерного рівняння Лапласа, можливо спрогнозувати розподіл температури всередині плоскої поверхності енергоактивного огороження. В відповідності з [5] воно має лінійний характер

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta} x,$$

де T_1 – температура однакова на всій поверхні F (при $x = 0$); T_2 – температура однакова на всій поверхні F (при $x = \delta$); δ – товщина енергоактивного огороження; λ – коефіцієнт теплопровідності.

З допомогою рівняння Фур'є можна отримати вираження для визначення теплового потоку [5], що проходить через шар енергоактивного огороження

$$Q = qF = \frac{\lambda}{\delta} F(T_1 - T_2) = \frac{F(T_1 - T_2)}{R_{пл}},$$

де Q – кількість теплоти, передана в одиницю часу, або тепловий потік (Вт), через плоску стінку; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу; F – площа поперечного сечення; $\Delta T = T_1 - T_2$ – температурний напір; δ – товщина стінки; $R_{пл}$ – термічне опір теплопровідності плоского шару, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; $R_{пл} = \delta / \lambda = F(T_1 - T_2) / Q = (T_1 - T_2) / q$.

Енергоактивне огороження є багаторівневою конструкцією, яка складається з кількох різних шарів [3].

На рис. 1 представлений варіант енергоактивного огороження, який має три шари. Товщина кожного шару $\delta_1, \delta_2, \delta_3$. Коефіцієнт теплопровідності відповідно $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

Якщо прийняти допущення, що удільний тепловий потік постійний і для всіх шарів однаковий, то

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1}(T_1 - T_2), \quad q = \frac{\lambda_2}{\delta_2}(T_2 - T_3), \quad q = \frac{\lambda_3}{\delta_3}(T_3 - T_4).$$

Після відповідних перетворень, сумарний тепловий напір:

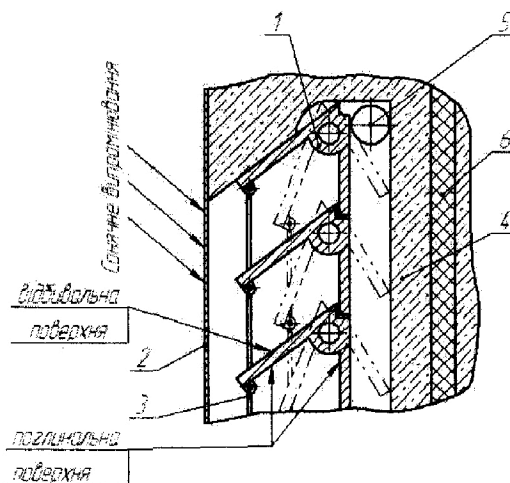
$$T_1 - T_4 = q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right).$$

Удільний тепловий потік:

$$q = \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)}.$$

Тепловий потік

$$Q = qF = F \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)}.$$



1 – теплообмінні труби, 2 – світлопрозоро́е покриття, 3 – тяги, 4 – стіна споруди, 5 – вентиляційний канал, 6 – теплоізоляція

Рисунок 1 – Варіант енергоактивного огороження, що запобігає перегріву споруди

В расчетной формуле для многослойной стенки энергоактивного ограждения принято допущение об идеальном тепловом контакте. Но в реальном энергоактивном ограждении между слоями образуются воздушные зазоры. Так как теплопроводность воздуха мала, то наличие даже очень тонких зазоров может сильно повлиять в сторону уменьшения эквивалентного коэффициента теплопроводности многослойного энергоактивного ограждения, что необходимо учитывать при расчете систем энергообеспечения, использующих энергию солнечного излучения.

Следующим важным моментом прогнозирования эффективности функционирования энергоактивного ограждения является определение потока теплоты на внутренней поверхности конструкции.

В соответствии с [5] распределение температур в представленном на рис. 1 энергоактивном ограждении имеет вид (рис. 2)

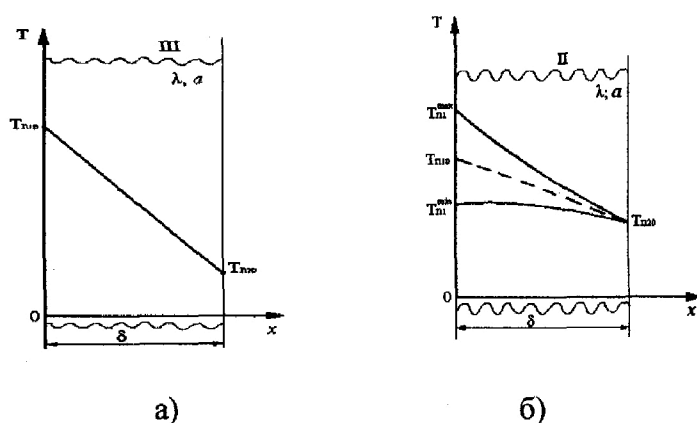


Рисунок 2 – Изменение температуры по толщине стенки при стационарном (а) режиме и при гармоническом изменении температуры внутри помещения (б)

В реальном сооружении изменение температуры происходит как на внешней поверхности, в качестве которой предлагается использовать энергоактивное ограждение, подвергающееся воздействию природных факторов, так и на внутренней поверхности сооружения. Решение задачи при двусторонних колебаниях температуры на поверхности плоской стенки представляет большую сложность.

Среди ряда известных методик, целесообразным представляется определение теплового потока с помощью метода респонс-фактора (т.е. дополнительный тепловой поток положительного или отрицательного знака, возникающий в системе как отклик на температурное возмущение) упрощается благодаря возможности пользоваться выводами для случая односторонних температурных волн. В соответствии с методикой предложенной в [5] для энергоактивного ограждения, возможно рассматривать, по отдельности четыре различных случая:

Случай I – температура внутри помещения и на улице остается постоянной. При поступлении теплового потока солнечного излучения на поверхность энергоактивного ограждения наблюдается обычная проникающая теплопередача (рис. 2, а).

Случай II – температура на улице остается постоянной, температура внутри помещения меняется по гармоническому закону, максимальное отклонение температуры внутри энергоактивного ограждения наблюдается относительно линии 0 – 0 (рис. 2, б).

Случай III – температура в помещении остается постоянной, температура на улице меняется по гармоническому закону, максимальное и минимальное отклонение температуры внутри энергоактивного ограждения наблюдается относительно линии 0 – 0.

Случай IV – тепловой поток на внутренней поверхности стенки при тепловом воздействии всех случаев одновременно.

Однако в реальном процессе теплового воздействия солнечного излучения на энергоактивное ограждение с внешней стороны и тепловое воздействие системы теплообеспечения с внутренней стороны сооружения позволяет рассматривать только комбинированное сочетание этих случаев.

Так, в энергоактивном ограждении респонс-фактор, вызванный на внешней поверхности тепловым воздействием солнечного излучения

$$(\Delta q)_{II} = q_{II} - q_{0I} = \lambda \vartheta_{II1x}^{\max} k_{II}.$$

Респонс-фактор, вызванный на поверхности энергоактивного ограждения температурным изменением температуры внутри помещения:

$$(\Delta q)_{III} = q_{III} - q_{0I} = \lambda \vartheta_{II2III}^{\max} k_{III} e^{-k_{III} \delta}.$$

Случаи II и III в отдельности встречаются крайне редко. Чаще они действуют одновременно. Их одновременное действие и характеризуется свойствами респонс-факторов:

$$q_{\text{ист}} = q_{0I} + \Delta q_{II} + \Delta q_{III}.$$

После подстановки q_{0I} , Δq_{II} , Δq_{III} в $q_{\text{ист}}$ получаем

$$q_{\text{ист}} = \frac{\lambda}{\delta} (T_{II0} - T_{II20}) + \lambda \vartheta_{II1x}^{\max} k_{II} - \lambda \vartheta_{II2III}^{\max} k_{III} e^{-k_{III} \delta}.$$

Следовательно, тепловой поток, воздействующий на энергоактивное ограждение, состоит из потока на внутренней поверхности ограждения, который будет иметь место, если произойдет температурное возмущение слева от T_{II0} до t_{\max} и справа от T_{II20} до T_{II2}^{\max} .

Используя представленный подход можно получить расчетные выражения и для других вариантов энергоактивных ограждений, которые представлены в [2], такие как:

- энергоактивные ограждения с поворотными теплопоглощающими элементами;
- энергоактивные ограждения предотвращающие перегрев сооружения;
- энергоактивные ограждения с изолированными секциями;
- энергоактивные ограждения с дополнительной воздушной прослойкой;
- гелиофиль.

Выводы. Применение представленного алгоритма расчетов тепловых процессов в энергоактивных ограждениях при поступлении теплового потока солнечного излучения позволит еще на этапе проектирования:

- спрогнозувати ефективність їх функціонування;
- вибрати найбільш ефективне конструктивне рішення енергоактивного огороження для розглянутого споруди;
- спрогнозувати коефіцієнт заміщення споживання традиційних енергоносіть на енергію альтернативних джерел і т.п.

Системи енергозабезпечення, які будуть спроектовані з урахуванням смоделированных процесів, дозволить економити в 2-3 рази кількість споживаних енергоносіть, таких як газ, вугілля і др.

Обозначения: λ – коэффициент теплопроводности, c – удельная массовая теплоемкость, ρ – плотность материала, a – коэффициент температуропроводности, F – площадь поверхности энергоактивного ограждения, T_1 – температура одинакова на всей поверхности F (при $x = 0$); T_2 – температура одинакова на всей поверхности F (при $x = \delta$); Q – количество теплоты, переданное в единицу времени, или тепловой поток (Вт), через плоскую стенку; λ – коэффициент теплопроводности материала; F – площадь поперечного сечения, $\Delta T = T_1 - T_2$ – температурный напор; δ – толщина стенки; $R_{пл}$ – термическое сопротивление теплопроводности плоского слоя.

Литература

1. Фирлонг Ш. Как дома стали энергосберегающими? http://www.murator.com.ua/glavnaya-stranitsa/bole-teplyj-dom-eto-okupaetsya/kak-doma-stali-energoberegayushimi,295_27575.html.
2. Патент на корисну модель Україна № 201014333, МПК F24J2/50, E04B1/76, Енергоактивне огороження/ В.О. Габринець, Г.І. Зарівняк, С.О. Митрохов, Л.В. Накашидзе, від 25.07.2011, бюл. №14.
3. Габринець В.О. Особливості побудови енергоактивних огорожень у складі систем енергозабезпечення на основі ВДЕ / В.О. Габринець, В.Л. Марков, С.О. Митрохов, В.І. Зарівняк, Л.В. Накашидзе // Відновлювана енергетика №3. – К.: ІВЕ НАН України, 2010. – С. 31–34.
4. Заривняк Г.И. Энергоактивные ограждения в составе систем теплоснабжения, использующих нетрадиционные возобновляемые источники энергии / Г.И. Заривняк, В.А. Габринец, Л.В. Накашидзе, В.Л. Марков, С.А. Митрохов // Збірник наукових праць „Перспективні задачі інженерної науки”. – Д.: GAUDEAMUS, 2009. – С. 39–44.
5. Фокин В.М. Основы энергосбережения в вопросах теплообмена / В.М. Фокин, Г.П. Бойков, Ю.В. Видин, – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2005. 192 с.
6. Накашидзе Л.В. Определение условий для составления математической модели прогнозирования теплотехнических свойств энергоактивных ограждений, использующих энергию альтернативных источников / Л.В. Накашидзе // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – №15. – 2014. – С. 205–212.

Bibliography (transliterated)

1. Firlong Sh. Kak doma stali energoberegayuschimi? http://www.murator.com.ua/glavnaya-stranitsa/bole-teplyj-dom-eto-okupaetsya/kak-doma-stali-energoberegayushimi,295_27575.html.

2. Patent na korisnu model Ukrayina # 201014333, MPK F24J2/50, E04B1/76, Energoaktivne ogorodzhennya. V.O. Gabrinets, G.I. Zarivnyak, S.O. Mitrohov, L.V. Nakashidze, vld 25.07.2011, byul. #14.

3. Gabrinets V.O. Osoblivosti pobudovi energoaktivnih ogorodzen u skladi sistem energozabezpechennya na osnovi VDE / V.O. Gabrinets, V.L.Markov, S.O. Mitrohov, V.I. Zarivnyak, L.V. Nakashidze. Vidnovlyuvana energetika #3. – K.: IVE NAN Ukrayini, 2010. – P. 31–34.

4. Zarivnyak G.I. Energoaktivnyie ograzhdeniya v sostave sistem teplosnabzheniya, ispolzuyuschih netraditsionnyie vozobnovlyaemyie istochniki energii / G.I. Zarivnyak, V.A. Gabrinets, L.V. Nakashidze, V.L. Markov, S.A. Mitrohov. Zbirnik naukovih prats „Perspektivni zadachi inzhenernoyi nauki”. – D.: GAUDEAMUS, 2009. – P. 39–44.

5. Fokin V.M. Osnovy energosberezheniya v voprosah teploobmena / V.M. Fokin, G.P. Boykov, Yu.V. Vidin, – M.: «Izdatelstvo Mashinostroenie-1», 2005. 192 p.

6. Nakashidze L.V. Opredelenie usloviy dlya sostavleniya matematicheskoy modeli prognozirovaniya teplotnicheskikh svoystv energoaktivnyih ograzhdeniy, ispolzuyuschih energiyu alternativnyih istochnikov. L.V. Nakashidze. Mezhdunarodnyiy nauchnyiy zhurnal «Alternativnaya energetika i ekologiya». – #15. – 2014. – P. 205–212.