

удк

А.А. АХРЕМЕНКОВ, канд. техн. наук, Исследовательский центр Системного анализа ИПС им. А.К. Айламазяна РАН (Ярославская обл.), В.А. КУЗЬМИН, инженер, ЗАО «Завод «ЛИТ» (г. Переславль-Залесский, Ярославская обл.), А.М. ЦИРЛИН, д-р техн. наук, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, (Ярославская обл.), В.М. ЦЫГАНКОВ, зам. ген. директора, ЗАО «Завод «ЛИТ» (г. Переславль-Залесский, Ярославская обл.)

Энергетическая эффективность покрытия внутренней поверхности помещений отражательной теплоизоляцией

В условиях возрастающих требований к энергосбережению при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений становится очевидным тот факт, что наращивание сопротивления теплопередаче посредством увеличения теплоизолирующего слоя имеет некое значение, после которого его стоимость начинает превышать границу окупаемости за счет стоимости сэкономленной тепловой энергии. Решение может быть найдено посредством применения более дешевых и достаточно эффективных способов утепления зданий. Одним из таких способов является утепление с использованием отражающей теплоизоляции (теплоизоляции отражающей поток инфракрасного излучения). Отражательную теплоизоляцию все шире используют в конструкциях ограждений в силу ее сравнительной дешевизны, возможности комбинации с воздушными прослойками, термическое сопротивление которых она позволяет увеличить в несколько раз (СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003).

Как правило, отражательной теплоизоляцией покрывают одну или обе стороны воздушной прослойки, следующей за внутренней облицовкой ограждения. В этом случае фольга не только препятствует потере теплоты за счет инфракрасного излучения, но и предотвращает влагоперенос, обеспечивая отсутствие внутренней конденсации влаги и переувлажнения ограждения [1]. Однако для целого ряда помещений (складов, ангаров, производственных цехов и пр.) фольга может быть использована в качестве внутренней облицовки. В этом случае отпадает необходимость в воздушной прослойке. Ограждение оказывается наиболее дешевым.

Ниже получена оценка снизу для относительной экономии энергии при таком использовании отражательной теплоизоляции. Поток тепла между нагревателем и внутренней поверхностью ограждения состоит из потока теплопереноса с воздухом и потоком инфракрасного излучения. Отражательная теплоизоляция блокирует вторую составляющую переноса тепла, из-за чего внутренняя поверхность ограждения имеет более низкую температуру, чем при отсутствии фольги, а значит, снижаются и потери через ограждение. Очевидно то, что чем большая доля теплоты передается от нагревателя через контакт с воздухом, тем меньше относительная эффективность отражательной теплоизоляции. В свою очередь, теплопередача через воздух зависит не только от его теплопроводности (она очень мала), но главным образом от структуры и интенсивности потоков, определяющихся как внешними воздействиями (вентиляция), так и температурными полями.

Чтобы получить оценку снизу для эффективности отражательной теплоизоляции, мы будем считать, что воздушная среда максимально перемешана, и ее температура однородна.

Ниже в этих предположениях составлена модель теплообмена и получены выражения для относительной экономии за счет внутренней облицовки отражательной теплоизоляцией. Фактическая экономия энергии при учете поля скоростей и температур воздуха может быть только больше, чем рассчитанная.

Модель теплообмена. Рассмотрим первоначально систему, состоящую из ограждения и нагревателя, расположенных параллельно друг другу и имеющих единичную поверхность. Будем считать заданными:

- термическое сопротивление ограждения R , $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$;
- температуру на внешней поверхности ограждения T_- , К ;
- температуру поверхности нагревателя T_n , К .

Обозначим через q тепловой поток, выделяемый (затрачиваемый) нагревателем; T_c – температура внутренней стороны ограждения, T_b – температура воздуха в помещении, α_n , α_c – коэффициенты теплоотдачи от нагревателя к воздуху и от воздуха к поверхности ограждения; ϵ_n , ϵ_c – коэффициенты черноты нагревателя и внутренней поверхности ограждения.

В этих обозначениях запишем уравнения теплового баланса для воздуха и ограждения в стационарном режиме (Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1982.):

$$\alpha_n(T_n - T_b) - \alpha_c T_b - T_c = 0, \quad (1)$$

$$T_c - T_- = Rq. \quad (2)$$

Поток тепла q складывается из потока теплоотдачи от воздуха к поверхности ограждения и радиационной составляющей, зависящей от коэффициента черноты ϵ_c :

$$q_r + q_p = \alpha_c(T_b - T_c) + C(\epsilon_c) \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]. \quad (3)$$

Здесь

$$C(\epsilon_c) = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_n} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1}, \quad C_s = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4). \quad (4)$$

Из равенства (1) следует, что:

$$T_b = \frac{\alpha_n T_n + \alpha_c T_c}{\alpha_n + \alpha_c}. \quad (5)$$

После исключения T_b из условия (5) и T_c из (2) и подстановки в (3), получим уравнение, связывающее затраты теплоты q с параметрами системы:

$$q \left(1 + \frac{R\alpha_c\alpha_n}{\alpha_c + \alpha_n} \right) = \frac{\alpha_c\alpha_n}{\alpha_c + \alpha_n} (T_n - T_-) + C(\epsilon_c) \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{Rq + T_-}{100} \right)^4 \right]. \quad (6)$$

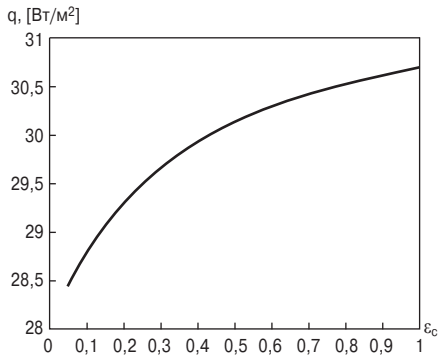


Рис. 1. Зависимость затрачиваемой теплоты q от степени черноты ограждения ϵ_c

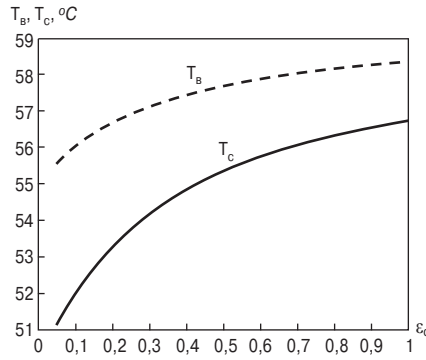


Рис. 2. Зависимость температур воздуха $T_{в}$ и ограждения $T_{с}$ от степени черноты ограждения ϵ_c

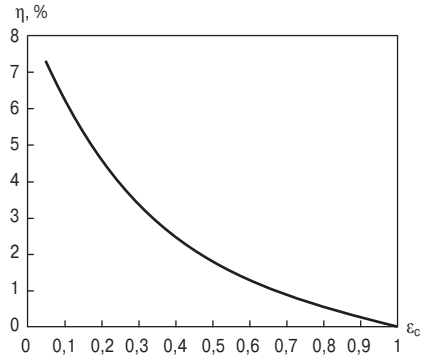


Рис. 3. Зависимость экономии затрачиваемой энергии от степени черноты ограждения ϵ_c

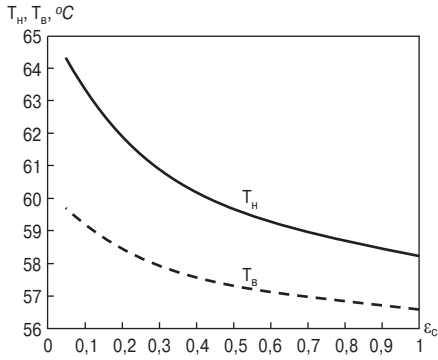


Рис. 4. Зависимость температуры нагревателя $T_{наг}$ и воздуха T_{air} от степени черноты ограждения ϵ_c

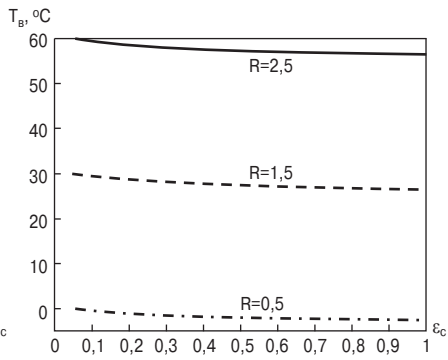


Рис. 5. Зависимость температуры воздуха $T_{в}$ от степени черноты ограждения ϵ_c и его термического сопротивления R

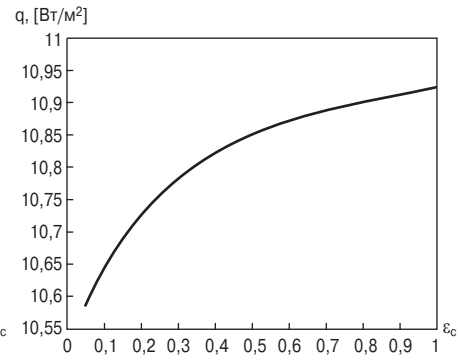


Рис. 6. Зависимость потока теплоты q от степени черноты ограждения ϵ_c

Это условие позволяет, зафиксировав все переменные кроме ϵ_c проследить зависимость затрат теплоты от коэффициента черноты ограждения (рис. 1). При изменении ϵ_c от нуля до единицы коэффициент C изменится от нуля до $\epsilon_n C_s$.

Стоит отметить, что затрачиваемая теплота q практически пропорциональна температуре нагревателя T_n и обратно пропорциональна термическому сопротивлению ограждения R .

Результаты расчета. Все расчеты проводились для следующих параметров:

$$T_{-} = -20^{\circ}\text{C}; \epsilon_n = 0,8; R = 2,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}; \alpha_c = 5,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_n = 5,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), T_n = 60^{\circ}\text{C}.$$

На рис. 1 представлен график зависимости затрачиваемой мощности q от ϵ_c для заданных условий. На рис. 2 приведены графики зависимости температуры воздуха $T_{в}$ и ограждения $T_{с}$ от степени черноты.

Применение отражательной теплоизоляции позволяет получить экономию в затратах на отопление. На рис. 3 показана зависимость коэффициента экономии тепловой энергии η от коэффициента черноты ϵ_c :

$$\eta(\epsilon_c) = \frac{q(1) - q(\epsilon_c)}{q(1)} 100\%$$

для различных значений степени черноты ограждения.

Зафиксируем значение подводимой мощности $q = 30 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и найдем значение температур нагревателя и воздуха (температура ограждения при этом останется постоянной см. (2)). Полученные результаты представлены на рис. 4. Аналогично, найдем значения температуры воздуха в зависимости от значений термического сопротивления ограждающей конструкции R от 0,5 до 2,5 (рис. 5).



Рис. 7. Вид цеха, внутренняя поверхность которого покрыта отражательной изоляцией

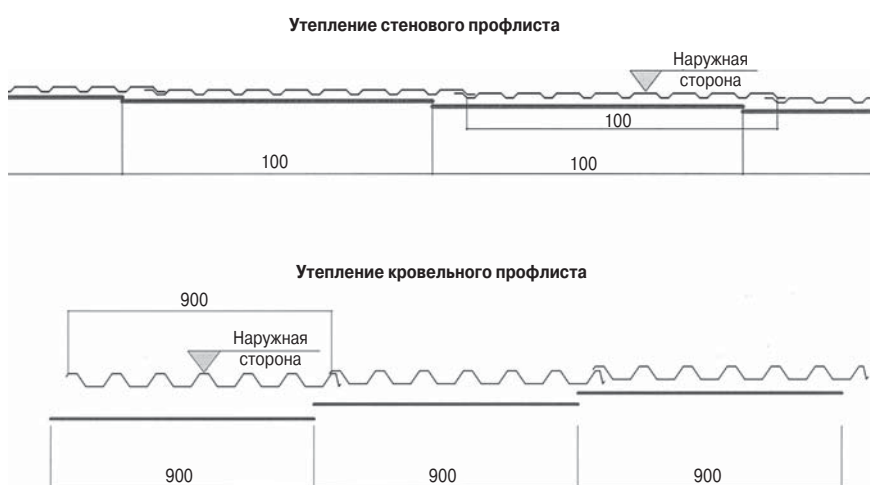


Рис. 8. Конструкция ограждения производственно-складского помещения

Для поддержания низкой температуры в помещении оклейка ограждающих конструкций отражательной теплоизоляцией изнутри также дает экономию по затратам энергии. Рассмотрим, в качестве примера, крытый ледовый дворец, характеризующийся следующими параметрами:

$$T_{\text{н}} = -20^{\circ}\text{C}; \varepsilon_{\text{н}} = 0,3; R = 2,5 \text{ м}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}; \alpha_{\text{с}} = 5,6 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{K}); \\ \alpha_{\text{н}} = 5,6 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{K}); T_{\text{в}} = -10^{\circ}\text{C}.$$

В качестве «нагревателя» в этой задаче фигурирует лед, от которого необходимо отводить теплоту. На рис. 6 представлен график отводимой теплоты, необходимой для поддержания заданных условий как функция $\varepsilon_{\text{с}}$.

Приведенные расчеты соответствуют случаю, когда площадь ограждения равна площади нагревателя и они расположены параллельно друг другу. С учетом формы, взаимного расположения и площади излучающих поверхностей формула для радиационного теплообмена q_p в условии (3) имеет вид (Богословский В.Н. Тепловой режим здания. М: Стройиздат, 1979. 248 с.):

$$q_p = \frac{C_s F_1 \Phi_{1-2}}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{н}}} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{с}}} - 1 \right)} \left[\left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{Rq + T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right], \quad (7)$$

где F_1, F_2 – площади излучающей и поглощающей поверхности; $\Phi_{1-2} \leq 1$ коэффициент облученности поглощающей поверхности (в нашем случае он равен единице). Однако за зависимость относительной экономии энергии от степени черноты поверхности ограждения изменяется мало.

Приведенные зависимости подтверждаются практикой. На фото (рис. 7) показан вид производственного помещения, покрытого внутри отражательной теплоизоляцией. Несмотря на малое термическое сопротивление ограждений ($R=0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$), состоящих из слоя пенофола толщиной 10 мм (рис. 8) и металлического профлиста, цех объемом 10630 м^3 после покрытия внутренней поверхности отражательной теплоизоляцией не требует добавочного отопления, так как операции по производству стекла сопровождаются выделением достаточного количества тепла. Не требуется кондиционирования цеха и в летнее время. Ввиду простоты конструкции ограждений цех был сооружен за три месяца бригадой из восьми человек.

Выводы. Результаты расчетов по условиям (5), (6) показывают, что покрытие фольгой внутренней стороны ограждения позволяет получить экономию в затратах тепла (рис. 3), в зависимости от типа обогревателя. Стоит отметить, что при этом целесообразно использовать так называемые «инфракрасные» нагреватели. При этом температура воздуха повышается (рис. 4).

Внутреннее покрытие отражательной теплоизоляцией перспективно для складов, ангаров, промышленных цехов, холодильников и ледовых арен.

Ключевые слова: отражательная теплоизоляция, теплопередача, теплообмен, экономия тепловой энергии.

Литература

1. Андреев Д.А., Могутов В.А., Цирлин А.М. Выбор расположения слоев ограждающей конструкции с учетом предотвращения внутренней конденсации. // Строительные материалы. 2001. № 12. С. 29–31.