

## Выбор расположения слоев ограждающей конструкции с учетом предотвращения внутренней конденсации.

Андреев Д.А., Могутов В.А., Цирлин А.М.

### Введение

В современном строительстве ограждающие конструкции могут состоять не только из слоев сплошной изоляции, но и содержать один или несколько слоев отражающей изоляции, которые состоят из слоя сплошной изоляции и замкнутой воздушной прослойки. Как правило, это материалы типа "пенофол" или "армофол", представляющие собой алюминиевую фольгу, армированную пластиковой либо стекловолоконной сеткой или наклеенную на слой вспененного полиэтилена (полиуретана) [1]. Подобные материалы выпускаются в Переславле ЗАО "Завод информационных технологий "ЛИТ" и рядом других предприятий в России и за рубежом. Применение их возможно при утеплении стен в частном и малоэтажном сборном домостроении, возведении складских помещений, в строительстве бань или саун, при утеплении веранд или лоджий. Отражающая изоляция применяется совместно с замкнутой воздушной прослойкой и выполняет одновременно функцию тепло- и пароизоляции.

Термическое сопротивление и возможность влаgekонденсации внутри многослойной отражающей конструкции зависят как от характеристик, так и от взаимного расположения слоев. Это расположение надо выбрать таким образом, чтобы при заданном термическом сопротивлении профили температуры и влажности по сечению обеспечивали отсутствие внутренней конденсации влаги. Если ограждающая конструкция состоит из нескольких слоев сплошной изоляции, то ее термическое сопротивление не зависит от расположения слоев, их порядок влияет на профили температуры, упругостей насыщенных водяных паров и текущих упругостей водяных паров. При наличии одного или нескольких слоев отражающей изоляции изменение их порядка меняет не только профиль температур, но и термическое сопротивление ограждающей конструкции. Кроме того, отражающая изоляция, как правило, имеет очень малый коэффициент паропроницаемости, что позволяет упростить расчеты.

### Многослойная сплошная изоляция

Рассмотрим многослойную ограждающую конструкцию, состоящую из слоев только сплошной изоляции. Уравнения теплопроводности и влагепроницаемости имеют вид [2, 3]:

$$q = \frac{\lambda_i}{\delta_i} (\tau_{i-1} - \tau_i), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$g = \frac{\mu_i}{\delta_i} (e_{i-1} - e_i), \quad i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Здесь и ниже приняты следующие обозначения:

$t_i$  – температура на границе  $i$ -го слоя, °C,  $i = 1, \dots, n-1$ ;

$t_0$  и  $t_n$  – температуры на внутренней и наружной поверхностях конструкции, °C;

$\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го материала, Вт/(м °C),  $i = 1, \dots, n$ ;

$\mu_i$  – коэффициент паропроницаемости  $i$ -го материала, мг/(м ч Па),  $i = 1, \dots, n$ ;

$d_i$  – толщина  $i$ -го слоя, м,  $i = 1, \dots, n$ ;

$e_i$  – упругость водяного пара на границе  $i$ -го слоя, Па,  $i = 1, \dots, n$ ;

$e_0$  и  $e_n$  – упругости водяного пара на внутренней и наружной поверхностях конструкции, Па;

$q$  – удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;

$g$  – удельный поток влаги, мг/(м<sup>2</sup> ч).

Из уравнения (1) при заданных  $t_0$  и  $t_n$  вытекает система уравнений

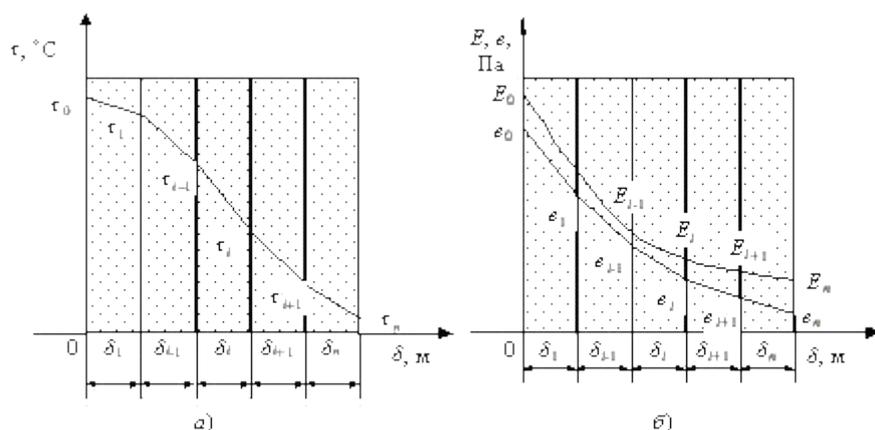


Рис. 1. Профиль температур  $\{t_i\}$  (а); профили упругостей водяного пара  $\{e_i\}$  и насыщенного водяного пара  $\{E(t_i)\}$  при отсутствии конденсации (б).

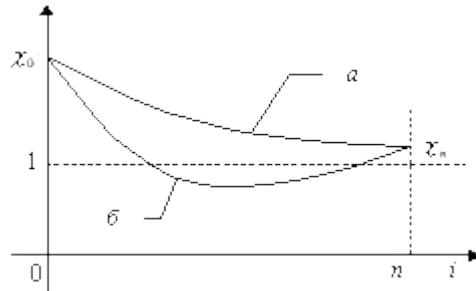


Рис. 2. Зависимость  $\xi_i$  для случаев, когда не происходит (а) и происходит (б) конденсация влаги.

$$\begin{cases} q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (\tau_0 - \tau_1), \\ q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (\tau_1 - \tau_2), \\ \vdots \\ q = \frac{\lambda_n}{\delta_n} (\tau_{n-1} - \tau_n), \end{cases} \quad (3)$$

где удельный тепловой поток  $q$  равен

$$q = \frac{\tau_0 - \tau_n}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (4)$$

Система (3) для каждого расположения слоев определяет промежуточные значения температур  $\{t_i\}$  (рис. 1а).

По данным температурам  $t_0$  и  $t_n$  рассчитывают упругости водяного пара на внутренней  $e_0$  и наружной  $e_n$  поверхностях ограждающей конструкции:

$$e_0 = \frac{\varphi_0}{100} E(\tau_0), \quad (5)$$

$$e_n = \frac{\varphi_n}{100} E(\tau_n), \quad (6)$$

где  $j_0$  и  $j_n$  – заданные относительные влажности на внутренней и наружной поверхностях ограждающей конструкции, %;  $E(t)$  – зависимость упругости насыщенного водяного пара от температуры [5]. Для того, чтобы найти упругости водяного пара  $\{e_i\}$  (рис. 1б) для промежуточных значений  $i$ , нужно решить систему уравнений

$$\begin{cases} g = \frac{\mu_1}{\delta_1}(e_0 - e_1), \\ g = \frac{\mu_2}{\delta_2}(e_1 - e_2), \\ \vdots \\ g = \frac{\mu_n}{\delta_n}(e_{n-1} - e_n), \end{cases} \quad (7)$$

где удельный поток влаги  $g$  равен -

$$g = \frac{e_0 - e_n}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i}}. \quad (8)$$

Профиль упругостей насыщенного водяного пара  $\{E(t_i)\}$  (рис. 1б) зависит только от профиля температур  $\{t_i\}$  и строится с помощью соответствующей таблицы [5].

Конденсация влаги внутри ограждения отсутствует, если выполнено неравенство

$$x_i = \frac{E(t_i)}{e_i} > 1, \quad i = 0, \dots, n. \quad (9)$$

Значения  $x_0$  и  $x_n$  известны и они удовлетворяют неравенству (9), если на внутренней и наружной поверхностях отсутствует конденсация влаги. Выясним, при каком условии это неравенство будет выполнено и для промежуточных значений  $x_i$ . На рис. 2 показаны зависимости для случаев: а) конденсация влаги отсутствует (кривая а) и б) наблюдается выпадение влаги (кривая б). Конденсация заведомо не происходит, если зависимость  $x_i$  монотонна: значения  $x_i$  уменьшаются, если  $x_0 > x_n$ , и увеличиваются в противном случае. В первом случае слои конструкции следует расположить таким образом, чтобы выполнялось неравенство

$$x_i \leq x_{i-1}, \quad (10)$$

а во втором, чтобы выполнялось неравенство

$$x_i \geq x_{i-1} \quad (11)$$

Найдем показатель, с помощью которого можно найти последовательность слоев в ограждающей конструкции, для которой отсутствует внутренняя конденсация влаги. Формула, аппроксимирующая зависимость упругости насыщенного водяного пара от температуры  $E(t)$  из таблицы, приведенной в [5], выглядит следующим образом:

$$E(\tau) = 605,161 + 46,398\tau + 1,307\tau^2 + 0,021\tau^3 + 8,458 \cdot 10^{-4}\tau^4 + \\ + 1,377 \cdot 10^{-6}\tau^5 - 6,567 \cdot 10^{-7}\tau^6 + 3,376 \cdot 10^{-8}\tau^7 - 5,468 \cdot 10^{-11}\tau^8. \quad (12)$$

Если выразить  $t_i$  из (1), то разложение зависимости  $E(t)$  в ряд Тейлора примет вид:

$$E(\tau_i) \approx E(\tau_{i-1}) - \left( \frac{dE}{d\tau} \right)_{\tau_{i-1}} q \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (13)$$

где удельный тепловой поток  $q$  рассчитывается по формуле (4). Знаменатель в (9), пользуясь формулой (2), запишем в виде:

$$e_i = e_{i-1} - g \frac{\delta_i}{\mu_i}, \quad (14)$$

где удельный поток влаги  $g$  рассчитывается по формуле (8). Используя (13), (14), выразим условие (10) через характеристики материалов и толщины слоев:

$$\frac{E(\tau_{i-1}) - \left( \frac{dE}{d\tau} \right)_{\tau_{i-1}} q \frac{\delta_i}{\lambda_i}}{e_{i-1} - g \frac{\delta_i}{\mu_i}} \leq \frac{E(\tau_{i-1})}{e_{i-1}} \quad (15)$$

или

$$E(\tau_{i-1})e_{i-1} - e_{i-1}q \frac{\delta_i}{\lambda_i} \left( \frac{dE}{d\tau} \right)_{\tau_{i-1}} \leq E(\tau_{i-1})e_{i-1} - E(\tau_{i-1})g \frac{\delta_i}{\mu_i} \quad (16)$$

После упрощения, домножая обе части полученного неравенства на  $\frac{1}{e_{i-1}g \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$ , получим

$$\frac{q\mu_i \left( \frac{dE}{d\tau} \right)_{\tau_{i-1}}}{g\lambda_i} \geq \frac{E(\tau_{i-1})}{e_{i-1}} \quad (17)$$

Обозначим через  $A = q/g$  коэффициент, не зависящий от расположения слоев, через  $F(\tau_{i-1}) = \left( \frac{dE}{d\tau} \right)_{\tau_{i-1}}$  – производную по температуре функции упругости насыщенного водяного пара в точке  $t_{i-1}$  и воспользуемся формулой (9). Неравенство (17) переписывается в виде:

$$AF(\tau_{i-1}) \frac{\mu_i}{\lambda_i} \geq \chi_{i-1} \quad (18)$$

Таким образом, величина  $\frac{\mu_i}{\lambda_i} \left( \frac{dE}{d\tau} \right)_{\tau_{i-1}}$  может быть использована как показатель монотонности зависимости  $\chi_i$ . Справедливо следующее правило для выбора расположения слоев сплошной изоляции ограждающей конструкции: для того, чтобы при  $\chi_0 > \chi_n$  конденсации влаги внутри ограждения не происходило, нужно так расположить слои изоляции, чтобы левые части в неравенстве (18) возрастали в направлении от внутренней поверхности к внешней и убывали при  $\chi_0 < \chi_n$ .

При изменении расположения слоев ограждающей конструкции меняются профили температур и упругостей водяного пара, но толщины и коэффициенты теплопроводности слоев не меняются. Следовательно, термическое сопротивление конструкции  $R_k$ , ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт, рассчитываемое по формуле [2]

$$R_x = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (19)$$

где  $R_i$  – термическое сопротивление  $i$ -го слоя,  $(\text{м}^2\text{°C})/\text{Вт}$ , также не меняется.

### Отражающая изоляция

Рассмотрим ограждающую конструкцию, содержащую один или несколько паронепроницаемых слоев отражающей изоляции с замкнутой воздушной прослойкой. Пусть слой с номером  $j$  – влагонепроницаемый слой отражающей изоляции, который состоит из фольги и замкнутой воздушной прослойки. Для него уравнение теплопроводности (1) выглядит следующим образом [4]:

$$q = C \left[ \left( \frac{t_{j-1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_j}{100} \right)^4 \right] + \frac{\lambda_{\text{в.н.}}(t_{j-1} - t_j)}{\delta_j}, \quad (20)$$

где  $C$  – коэффициент, зависящий от отражательных свойств стенок воздушного промежутка,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$ ;  $\lambda_{\text{в.н.}}$  – условный коэффициент, называемый коэффициентом передачи тепла конвекцией,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$ .

Коэффициент  $C$  рассчитывается по формуле [1]:

$$C = \frac{1}{1/C_{j-1} + 1/C_j - 1/C_s}, \quad (21)$$

где  $C_s = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_{i-1}$  и  $C_i$  – коэффициенты излучения стенок воздушного промежутка, которые, в свою очередь, равны  $\epsilon_{j-1}C_s$  и  $\epsilon_j C_s$  соответственно. Степени черноты  $\epsilon_{j-1}$ ,  $\epsilon_j$  – величины табличные и безразмерные.

Коэффициент  $\lambda_{\text{в.н.}}$  зависит от разницы температур  $D t = t_{j-1} - t_j$  и толщины воздушной прослойки  $d_j$ . Значения этого коэффициента приведены в [4]. Аппроксимирующая эти значения формула выглядит следующим образом:

$$\lambda_{e.n.} = 0,02 + 6,1 \cdot 10^{-4} \Delta\tau + 7,27 \cdot 10^{-1} \delta_{e.n.} + 2,69 \cdot 10^{-2} \Delta\tau \cdot \delta_{e.n.} \quad (22)$$

Таким образом, чтобы найти профиль температур  $\{t_i\}$  (рис. 3а), нужно при заданных  $t_0, t_n$  решить относительно разностей температур  $t_i$  ( $i = 1, \dots, n-1$ ) систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_0 - t_1), \\ \vdots \\ q = \frac{\lambda_{j-1}}{\delta_{j-1}} (t_{j-2} - t_{j-1}), \\ q = \frac{1}{R_j} (t_{j-1} - t_j), \\ q = \frac{\lambda_{j+1}}{\delta_{j+1}} (t_j - t_{j+1}), \\ \vdots \\ q = \frac{\lambda_n}{\delta_n} (t_{n-1} - t_n), \end{array} \right. \quad (23)$$

где удельный тепловой поток  $q$  рассчитывают по формуле (4);  $R_j$  – термическое сопротивление слоя отражающей изоляции, ( $m^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт:

$$R_j = \frac{1}{\frac{C}{10^8} (t_{j-1} + t_j) (t_{j-1}^2 + t_j^2) + \frac{\lambda_{e.n.}}{\delta_j}} \quad (24)$$

Поскольку  $l_{e.n.}$  зависит от  $D$  и  $d_j$ , то расчет необходимо вести по итерационной схеме, то есть, задаваясь  $l_{e.n.}$ , определять  $\{t_i\}$ , потом находить уточненное  $l_{e.n.}$  из таблицы [4] или по формуле (22) до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность в определении  $l_{e.n.}$ .

Профиль упругостей насыщенного водяного пара  $\{E(t_i)\}$  (рис. 3б, 3в) находят так же, как и в предыдущем случае: по табличным данным, приведенным в [4], или по формуле (12).

Источник «Центр Энергетической Эффективности» <http://eec.zavodlit.ru>

Коэффициент паропроницаия фольги очень мал, поэтому при отсутствии конденсации влаги на поверхности фольги вследствие диффузии слева от нее упругости водяного пара выравниваются с  $e_0$ , а правее – с  $e_n$ , которые, в свою очередь, рассчитываются по формулам (5), (6) при заданных значениях  $j_0, j_n$ .

Рассмотрим случай влагообразования в зимнее время года (рис. 3б), когда  $e_0 > e_n$ . Так как  $j_n > 100\%$ , то есть, по формуле (6)  $E_n > e_n$ , и с ростом температуры упругость насыщенного водяного пара  $E(t)$  растет, то справа от влагонепроницаемого слоя конденсации влаги происходить не может. Если конденсация влаги имеет место, то она происходит либо на поверхности фольги, либо левее ее в слоях сплошной изоляции.

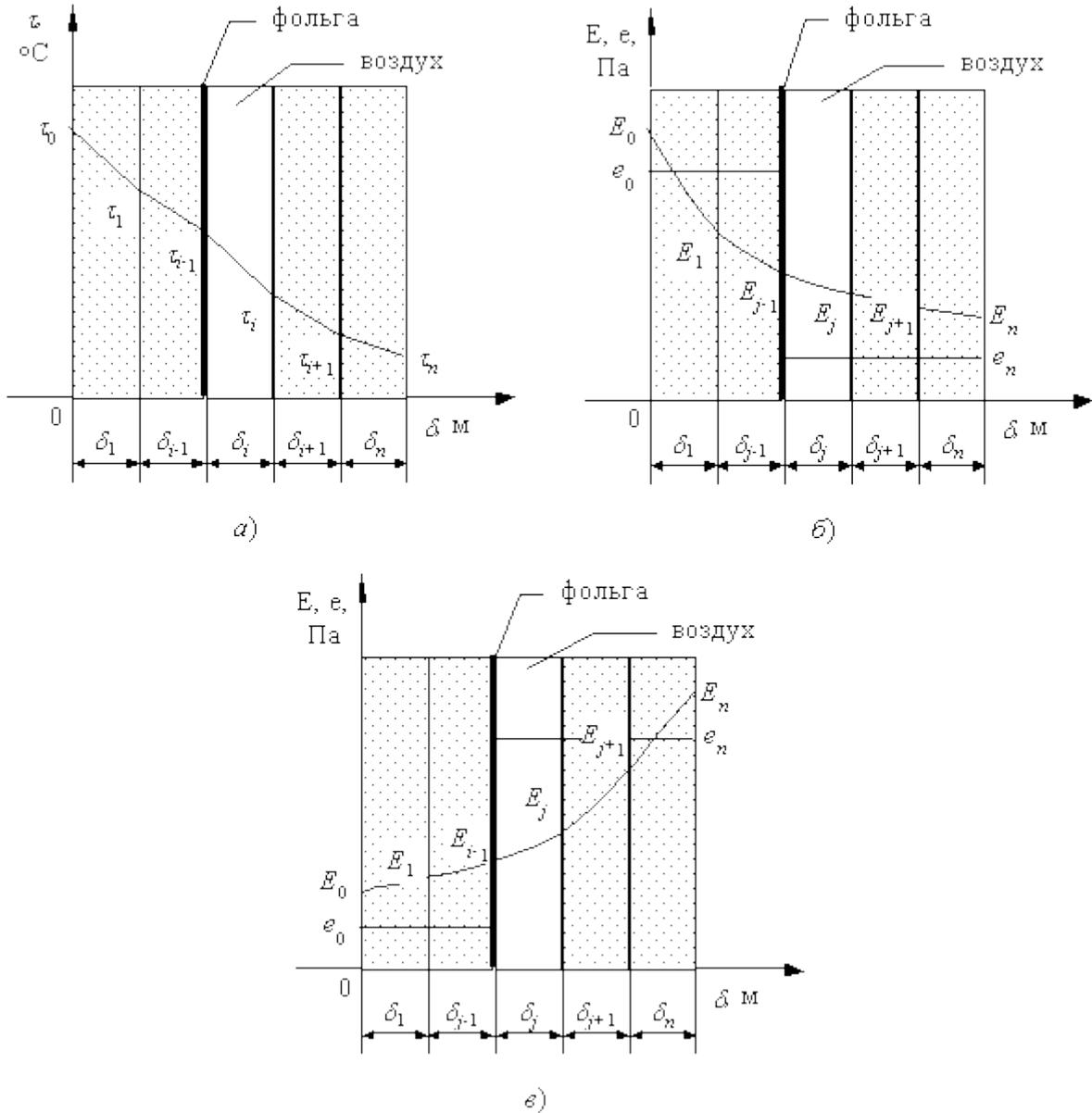


Рис. 3. Профиль температур  $\{t_i\}$  (а); Профили упругостей водяного пара  $\{e_i\}$  и насыщенного водяного пара  $\{E(t_i)\}$  в зимнее (б) и летнее (в) времена года.

В летнее время года (рис. 3в), когда  $e_0 < e_n$ , температура внутренней поверхности ограждающей конструкции  $t_0$  меньше температуры наружной поверхности ограждающей конструкции  $t_n$  и упругости насыщенных водяных паров  $E(t)$  убывают по направлению от внутренней поверхности к внешней. В то же время  $j_0 > 100\%$ , то есть по формуле (5)  $E_0 > e_0$ . Следовательно, слева от паронепроницаемого слоя конденсации влаги происходить не может. Если конденсация влаги имеет место, то она происходит либо на поверхности фольги, либо правее ее в слоях сплошной изоляции.

Таким образом, правило для выбора расположения слоев ограждающей конструкции, содержащей один слой паронепроницаемой отражающей изоляции, состоит в том, что для предотвращения конденсации влаги внутри ограждения на слое фольги нужно передвинуть слой отражающей изоляции в зону более высоких температур.

Из формулы (24) видно, что термическое сопротивление воздушной прослойки  $R_j$  зависит от температур на ее границах. Следовательно, при изменении расположения слоев термическое сопротивление конструкции  $R_k$ , рассчитываемое по формуле (19), уменьшается при переносе слоя отражающей изоляции в зону более высоких температур.

Если же в конструкции присутствует несколько паронепроницаемых слоев отражающей изоляции, то те из них, которые расположены между двумя крайними слоями отражающей изоляции, из рассмотрения выпадают вследствие того, что движение водяного пара там происходить не может и, следовательно, влаgekонденсация тоже.

Если же влаgekонденсация происходит в слоях сплошной изоляции, то для слоев, расположенных до паронепроницаемого слоя, действует правило, описанное в п.2.

### Заключение

Применение отражающей изоляции в ограждающих конструкциях позволяет без значительного дополнительного наращивания теплоизоляции увеличить термическое сопротивление стен и предотвратить выпадение конденсата в толще конструкции. Очень важно применять отражающую изоляцию следует вместе с замкнутой воздушной прослойкой, иначе эффект прироста термического сопротивления исчезает.

Полученные правила для выбора расположения слоев ограждающей конструкции позволяют предотвратить внутреннюю конденсацию влаги. Причем, если конструкция состоит из слоев только сплошной изоляции, то изменение порядка расположения слоев не влияет на величину термического сопротивления конструкции, а если же в конструкции имеется хотя бы один слой отражающей изоляции, то термическое сопротивление уменьшается с переносом слоя отражающей изоляции в зону более высоких температур, хотя это уменьшение обычно незначительно.

### Литература

1. Шилов Н.Д. Новые экономические условия диктуют выпуск нового ассортимента продукции // Строительные материалы, 1998, №11, С.6.
2. Арнольд Л.В., Михайловский Г.А., Селиверстов В.М. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1979.
3. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. – М.: Стройиздат, 1979 г.
4. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М., 1973.
5. Шильд Е., Кассельман Х.-Ф., Дамен Г., Поленц Р. Строительная физика. – М.: Стройиздат, 1982.

Источник «Центр Энергетической Эффективности» <http://eec.zavodlit.ru>