УДК 622.692.4

О ВЛИЯНИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В НАРУЖНОМ ОГРАЖДЕНИИ НА ТЕПЛОИНЕРЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЗДАНИЯ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

В.И. Панферов, С.Л. Дегтярь

ABOUT INFLUENCE OF HEATING ISOLATION ARRANGEMENT IN OUTSIDE PROTECTION UPON HEATING INERTIAL PROPERTIES OF A BUILDING AS AN OBJECT OF MANAGEMENT

V.I. *Panferov, S.L Degtyar*

Исследовано влияние расположения теплоизоляционного материала в наружном ограждении на теплоинерционные свойства здания. Определены постоянные времени при различных компоновках теплоизоляционного слоя в конструкции наружной стены.

Ключевые слова: тепловая изоляция; конструктивный слой; теплоизоляционный слой; постоянная времени; теплоинерционные свойства помещения.

The influence of heating isolation arrangement in outside protection upon heating inertial properties of a building is investigated. Time constants at various arrangement of heat-insulating layer in an outside wall design are determined.

Keywords: heating isolation, construction layer, heat-insulating layer, time constant, heating inertial properties of a building.

Известно [1], что конструкции современных многослойных ограждений характеризуются разделением функций между отдельными материальными слоями. В общем случае ограждение состоит из конструктивного (несущего слоя), теплоизоляционного слоя, а также паро- или гидроизоляционного слоя, внутреннего и внешнего фактурных слоев. В отношении режима теплопередачи основными являются конструктивный и теплоизоляционный слои. Конструктивным обычно является слой из плотного, а следовательно, обладающего значительной теплопроводностью и плохопроницаемого для водяного пара и воздуха, материала. Материал теплоизоляционного слоя обычно пористый, рыхлый, а значит малотеплопроводный и хорошо пропускающий водяной пар и воздух.

Теплоизоляционный материал может быть расположен с внутренней и наружной стороны конструктивного слоя [1, 2]. При этом известно, что термическое сопротивление теплопередаче, являющееся характеристикой стационарного процесса, от этого не меняется и остается одним и тем же. Однако инерционные (динамические) свойства ограждающих конструкций, естественно, будут различаться. Теория теплоустойчивости позволяет предположить, что 1-й вариант компоновки приведет к уменьшению постоянной времени, однако интересно было бы знать, насколько заметным будет это уменьшение, как сильно будут различаться соотношения, позволяющие оценивать постоянные времени для различных вариантов компоновки слоев. Приведенные здесь вопросы имеют существенное значение как для определения времени охлаждения зданий при аварийных и иных ситуациях, так и для решения вопросов, связанных с построением высококачественных систем управления тепловым режимом зданий.

Для выяснения данного вопроса рассмотрим плоскую однородную стенку, состоящую из двух слоев: конструктивного и теплоизоляционного. Для оценки влияния расположения слоев на теплоинерционные свойства ограждения рассмотрим 2 варианта компоновки: а) теплоизоляционный материал расположен с внутренней стороны ограждения; б) теплоизоляционный материал расположен с наружной стороны ограждения.

Постановка задачи следующая: пусть известны температуры внутренней $t_в$ и наружной $t_н$ сред, и х коэффициенты теплоотдачи $\alpha_в$ $\alpha_н$, коэффициенты теплопроводности конструктивного λ и теплоизоляционного $\lambda_и$ слоев, а также теплоемкости этих слоев *си* $c_и$. Причем считается, что величины $t_в$, $t_н$, $\alpha_в$, $\alpha_н$ постоянны и не меняются вдоль поверхности. Через стену переносится некоторый тепловой поток q.

В результате, для решения задачи требуется определить постоянную времени T для двух вариантов компоновки ограждения, т.е. ответить на вопрос: как порядок размещения слоев влияет на качество регулирования температуры воздуха внутри здания.

Рассмотрим первый вариант конструкции ограждения (рис. 1).

Известно, что плотность теплового потока находится по известному уравнению

$$q = \frac{t_в - t_н}{R}, \qquad (1)$$

где $t_в$, $t_н$ - соответственно температуры внутреннего и наружного воздуха; R - сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции.

Эту же величину можно представить следующим образом:

$$q = \frac{t_{пов.н} - t_н}{1/\alpha_н}, \qquad (2)$$

где $t_{пов.н}$ - температура наружной поверхности стены.

Приравнивая два последних уравнения, получаем, что

$$t_{пов.н.} = t_н + \frac{t_в - t_н}{\alpha_н R} \quad \text{или} \quad t_{пов.н} = t_н + \frac{q}{\alpha_н}.$$

Аналогично определяем температуры на стыке слоев и внутренней поверхности ограждения

$$t_2 = t_{пов.н} + \frac{q\delta}{\lambda} = t_н + q\left(\frac{1}{\alpha_н} + \frac{\delta}{\lambda}\right);$$

$$t_{пов.в} = t_2 + \frac{q\delta_и}{\lambda_и} = t_н + q\left(\frac{1}{\alpha_н} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_и}{\lambda_и}\right).$$

Так как при $\lambda = \text{const}$ и $\lambda_и = \text{const}$ температуры в слоях ограждения изменяются по линейному закону, то среднемассовые температуры конструктивного (основного) и теплоизоляционного слоя можно записать следующим образом

$$\bar{t}_{осн} = \frac{t_{пов.н} + t_2}{2} = t_н + q\left(\frac{1}{\alpha_н} + \frac{\delta}{2\lambda}\right); \qquad (3)$$

$$\bar{t}_и = \frac{t_2 + t_{пов.в}}{2} = t_н + q\left(\frac{1}{\alpha_н} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_и}{2\lambda_и}\right). \qquad (4)$$

Уравнение теплового баланса здания за бесконечно малый период времени имеет вид

$$\left[W_0 - q_0 V(t_в - t_н)\right]d\tau =$$
$$= F_и \delta_и \rho_и c_и d\left(\bar{t}_и - t_н\right) + F\delta\rho c d\left(\bar{t}_{осн} - t_н\right), \qquad (5)$$

где q_0 - удельные теплопотери здания за единицу времени при разности температур $(t_в - t_н) = 1\,°C$; V - объем помещения; W_0 - количество теплоты, приводимой извне на отопление в единицу времени; F - площадь поверхности конструктивного слоя; ρ - плотность материала конструктивного слоя, $F_и, \rho_и$ - то же для теплоизоляционного слоя.

С учетом выражений (1), (3), (4) и того, что

$$d(\bar{t}_{осн} - t_н) = \left(\frac{1}{\alpha_н R} + \frac{\delta}{2\lambda R}\right)\left(dt_в - dt_н\right),$$

$$d(\bar{t}_и - t_н) = \left(\frac{1}{\alpha_н R} + \frac{\delta}{\lambda R} + \frac{\delta_и}{2\lambda_и R}\right)\left(dt_в - dt_н\right),$$

уравнение (5) можно представить в виде:

$$\left[\frac{c_и \rho_и F_и \delta_и}{q_0 V}\left(\frac{1}{\alpha_н R} + \frac{\delta}{R\lambda} + \frac{\delta_и}{2R\lambda_и}\right) + \right.$$
$$\left. + \frac{c\rho F\delta}{q_0 V}\left(\frac{1}{\alpha_н R} + \frac{\delta}{2R\lambda}\right)\right]\frac{dt_в}{d\tau} + t_в =$$
$$= \frac{W_0}{q_0 V} + \left[\frac{c_и \rho_и F_и \delta_и}{q_0 V}\left(\frac{1}{\alpha_н R} + \frac{\delta}{R\lambda} + \frac{\delta_и}{2R\lambda_и}\right) + \right.$$
$$\left. + \frac{c\rho F\delta}{q_0 V}\left(\frac{1}{\alpha_н R} + \frac{\delta}{2R\lambda}\right)\right]\frac{dt_н}{d\tau} + t_н, \qquad (6)$$

где

$$T_н = T_в = \frac{c_и \rho_и F_и \delta_и}{q_0 V}\left(\frac{1}{\alpha_н R} + \frac{\delta}{R\lambda} + \frac{\delta_и}{2R\lambda_и}\right) +$$
$$+ \frac{c\rho F\delta}{q_0 V}\left(\frac{1}{\alpha_н R} + \frac{\delta}{2R\lambda}\right). \qquad (7)$$

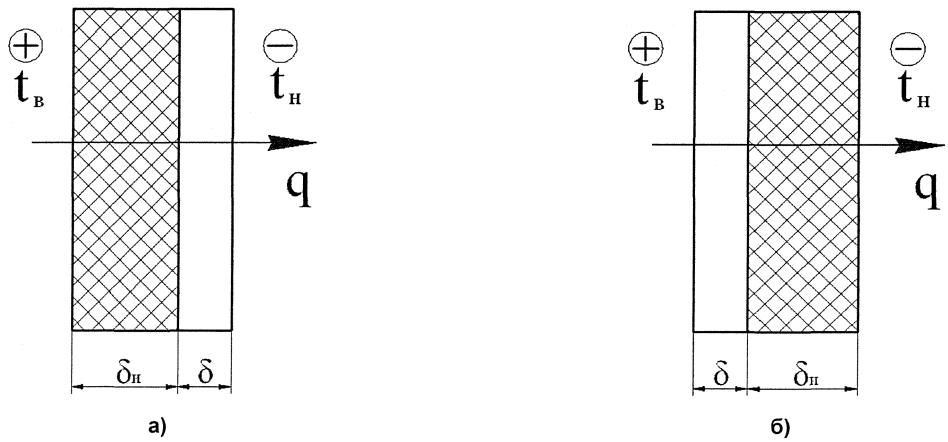

Рис. 1. Конструкция ограждения: а - теплоизоляция внутри; б - теплоизоляция снаружи

Далее рассмотрим 2-й вариант компоновки слоев конструкции (см. рис. 1). Аналогично первому варианту, найдя температуры на поверхностях ограждения, на стыке слоев, а также учитывая линейное изменение среднемассовой температуры конструктивного и теплоизоляционного слоев, в итоге получаем следующую математическую модель теплового режима помещения

$$\left[\frac{c_и\rho_и F_и\delta_и}{q_0V}\left(\frac{1}{\alpha_н R}+\frac{\delta_и}{2R\lambda_и}\right)+\right.$$

$$\left.+\frac{c\rho F\delta}{q_0V}\left(\frac{1}{\alpha_н R}+\frac{\delta_и}{R\lambda_и}+\frac{\delta}{2R\lambda}\right)\right]\frac{dt_в}{d\tau}+t_в=$$

$$=\frac{W_0}{q_0V}+\left[\frac{c_и\rho_и F_и\delta_и}{q_0V}\left(\frac{1}{\alpha_н R}+\frac{\delta_и}{2R\lambda_и}\right)+\right.$$

$$\left.+\frac{c\rho F\delta}{q_0V}\left(\frac{1}{\alpha_н R}+\frac{\delta_и}{R\lambda_и}+\frac{\delta}{2R\lambda}\right)\right]\frac{dt_н}{d\tau}+t_н, \qquad \textbf{(8)}$$

где

$$T_н=T_в=\frac{c_и\rho_и F_и\delta_и}{q_0V}\left(\frac{1}{\alpha_н R}+\frac{\delta_и}{2R\lambda_и}\right)+$$

$$+\frac{c\rho F\delta}{q_0V}\left(\frac{1}{\alpha_н R}+\frac{\delta_и}{R\lambda_и}+\frac{\delta}{2R\lambda}\right). \qquad (9)$$

Таким образом, уравнения (7) и (9) наглядно демонстрируют различия в структуре постоянных времени при различных компоновках слоев в наружном ограждении.

Для определения численных значений постоянных времени рассмотрим температурный режим жилого здания. Исходные данные для расчета следую-

1 вариант конструкции:

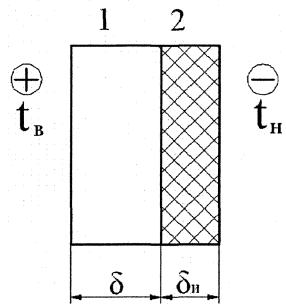

Таблица 1

Характеристики слоев стены

	Материал	δ, мм	c, Дж/(кг·°С)	λ, Вт/(м·°С)	ρ, кг/м³
1	Железобетон	160	840	1,92	2500
2	Пенополистирол	100	1340	0,041	100

Согласно уравнению (10): $T^{2вар}-T^{1вар}=818395\ с>0$.

2 вариант конструкции:

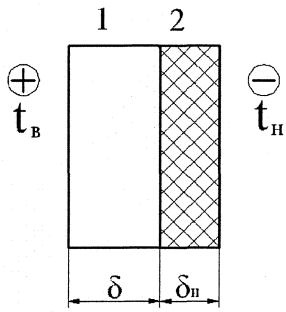

Таблица 2

Характеристики слоев стены

	Материал	δ, мм	c, Дж/(кг·°С)	λ, Вт/(м·°С)	ρ, кг/м³
1	Ячеистый бетон	400	840	0,2	600
2	Пенополистирол	60	1340	0,041	100

Согласно уравнению (10): $T^{2вар}-T^{1вар}=278944\ с>0$.

3 вариант конструкции:

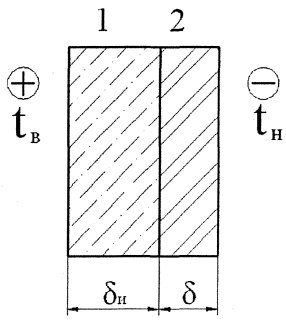

Таблица 3

Характеристики слоев стены

	Материал	δ, мм	c, Дж/(кг·°С)	λ, Вт/(м·°С)	ρ, кг/м³
1	Ячеистый бетон	400	840	0,2	600
2	Красный кирпич	125	880	0,7	1800

Согласно уравнению (10): $T^{2вар}-T^{1вар}=360000\ с>0$.

Рис. 2. Варианты конструкции двухслойных наружных ограждений

щие: наружная стена состоит из двух слоев: железобетона ($\delta = 0,2$ м; $F = 54$ м^2; $c = 840$ Дж/(кг·°С); $\rho = 2500$ кг/м^3; $\lambda = 1,92$ Вт/(м·°С)) и минеральной ваты URSA ($\delta_и = 0,13$ м; $F_и = 54$ м^2; $c_и = 840$ Дж/(кг·°С); $\rho_и = 60$ кг/м^3; $\lambda_и = 0,041$ Вт/(м·°С)). Объем помещения $V = 300$ м^2, удельные теплопотери здания в единицу времени $q_0 = 0,13$ Вт/(м^3·°С), сопротивление теплопередаче стены $R = 3,43$ (°С·м^2)/Вт, коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей ограждения $\alpha_н = 23$ Вт/(м^2·°С), $\alpha_в = 8,7$ Вт/(м^2·°С), температура внутреннего воздуха $t_в = 20$ °С.

Тогда, в соответствии с исходными данными, при 1-м варианте компоновки конструкции стены, постоянная времени T вычисляется согласно уравнению (7) и составляет $T = 20\ 809$ с = 5,78 ч. При 2-м варианте компоновки, согласно уравнению (9), Т=558 107 с = 155 ч.

Найденные значения постоянных времени наглядно демонстрируют значительную теплоаккумулирующую способность ограждения при втором варианте компоновки, хотя сопротивление теплопередаче конструкции не зависит от последовательности расположения ее слоев. Следовательно, температура внутреннего воздуха реагирует на возмущения наружной среды с большой инерционностью, а это обстоятельство пагубно сказывается на качестве управления тепловым режимом рассматриваемого помещения и здания в целом.

Таким образом, можно предположить, что с точки зрения теории управления расположение теплоизоляционного материала у внутренней поверхности наружного ограждения более целесообразно. Для подтверждения данного предположения проведем качественный анализ полученных данных. Для этого вычтем выражение (7) из выражения (9), т.е. найдем $T^{2вар} - T^{1вар}$.

$$T^{2вар} - T^{1вар} = \frac{\delta_и}{\lambda_и} c\rho\delta - \frac{\delta}{\lambda} c_и \rho_и \delta_и . \qquad (10)$$

Уравнение (10) справедливо в том случае, когда $F = F_и$. Рассмотрим несколько современных вариантов конструкции двухслойных наружных ограждений, применяющихся для массового строительства зданий в г. Челябинске, и определим знак выражения (10) для того, чтобы определить степень тепловой инерции наружных ограждений (рис. 2).

Таким образом, проведенное исследование показало, что распространенные в настоящее время варианты компоновки ограждающих конструкций, когда теплоизоляционный слой размещается на наружной поверхности конструктивного слоя, приводят к заметному увеличению инерционных свойств зданий по сравнению с противоположным вариантом. Полученные формулы позволяют производить количественную оценку постоянных времени. В частности, расчеты показали, что постоянная времени может быть уменьшена в 20 и более раз за счет расположения теплоизоляционного слоя на внутренней поверхности. Данное обстоятельство позволяет заметно облегчить решение задачи управления тепловым режимом здания. Однако при этом следует учитывать, что на такую же величину уменьшается и время, отведенное для устранения аварийных ситуаций в системе теплоснабжения, что, конечно, нежелательно. Данные обстоятельства необходимо учитывать при решении вопросов проектирования наружных ограждающих конструкций зданий.

Литература

1. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. — М.: Высшая школа, 1982. - 415 с.

2. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / под ред. Ю.А. Табунщикова, ВТ. Гагарина. - 5-е изд., пересмотр. — М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. - 256 с.

Поступила в редакцию 5 октября 2009 г.