

DOI: 10.18721/JEST.230102

УДК 621.311

Д.Д. Заборова, Т.А. Мусорина, М.Р. Петриченко

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МНОГОСЛОЙНОЙ СТЕНОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Энергоэффективность — одна из главных тем в строительной отрасли. Основное внимание уделяется конструктивно-технологическим мероприятиям, направленным на увеличение термического сопротивления стеновой конструкции. Объектом исследования является многослойная ограждающая конструкция (стенка). Цель работы — определение оптимальной конструкции стены, т. е. сочетания слоев материала, обеспечивающего одновременно достаточные уровни термического сопротивления и тепловой устойчивости конструкции. Одним из основных параметров, характеризующих свойства ограждений (их способность сохранять относительное постоянство температуры при нестационарном изменении тепловых воздействий со стороны наружной и внутренней сред), является теплоустойчивость. Исследования проводились методами строительной теплотехники.

ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ; ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ; ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ; ПЛОТНОСТЬ; ТЕПЛОЕМКОСТЬ; ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ.

Ссылка при цитировании:

Д.Д. Заборова, Т.А. Мусорина, М.Р. Петриченко. Теплотехническая работоспособность многослойной стеновой конструкции // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 18–26. DOI: 10.18721/JEST.230102

D.D. Zaborova, M.T. Mussorina, M.R. Petritchenko

THERMAL STABILITY AND THERMAL RESISTANCE OF A MULTILAYER WALL CONSTRUCTION: ASSESSMENT OF PARAMETERS

Nowadays energy efficiency is one the main topics in construction industry. Therefore, the main focus of attention is construction and technological methods aimed mainly at increasing of the wall's thermal resistance. The object of the study is a multilayer enclosing structure (wall). The goal of the article is selecting the optimal enclosing structures for increasing the thermal stability and energy efficiency of the building. The article shows that heat accumulation in the wall and its thermal resistance are opposite factors. The results of the study show that the thermal resistance of the wall does not depend on layer alternation. Stationary and periodic temperature, humidity regimes of the walls depend substantially on layer alternation. The studies were conducted by the methods of thermal engineering

THERMAL RESISTANCE; THERMAL STABILITY; THERMAL CONDUCTIVITY; DENSITY; SPECIFIC HEAT; ENCLOSING STRUCTURES.

Citation:

D.D. Zaborova, M.T. Mussorina, M.R. Petritchenko, Thermal stability and thermal resistance of a multilayer wall construction: assessment of parameters, St. petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 18–26, DOI: 10.18721/JEST.230102

Введение

Аккумуляционная способность стеновых конструкций определяет количество теплоты, поглощаемой и пропускаемой конструкцией, а также используемой для поддержания заданно-

го температурного уровня помещения и ограждающей стены при изменении температуры внешнего источника теплоты. Потери теплоты — трансмиссионные потери — составляют до 35–50 % от общих потерь в отопительный период. Чем лучше теплоизоляция, тем меньше по-

тери теплоты. Емкостное сопротивление стены (аккумуляционная способность конструкции) определяет возможность регенерации теплоты в отопительный период и термическую устойчивость конструкции. Она оценивается скоростью изменения температуры стеновой конструкции [1, 2]. «Идеальная» стеновая конструкция должна обладать одновременно максимальными активным и реактивным сопротивлениями. Необходимо определить, в какой мере этот идеал достигается. В общем случае получается задача на условный экстремум, формулируемая в виде точных равенств или неравенств как задача линейного программирования, например: термическое сопротивление $r \geq [r]$, $[r]$ — нормативное значение сопротивления $\beta \rightarrow \max$, либо сопряженная задача с ограничением по β и экстремумом (максимумом) по r .

Во-первых, существует большое количество способов теплоизоляции зданий с использованием различных материалов, имеющих свои технологические параметры и цену. В связи с этим возникает вопрос о рациональном с энергетической и экономической точек зрения использовании тех или иных материалов для изоляции конструкций.

Во-вторых, одним из основных параметров, характеризующих свойства ограждений, является их способность сохранять относительное постоянство температуры при периодическом изменении тепловых воздействий со стороны наружной и внутренней сред помещения. Наибольшая теплоустойчивость ограждающей конструкции обеспечивает не только энергоэффективность здания, но и улучшает микроклимат помещения.

В-третьих, необходимо установить возможность одновременного достижения этих требований, предъявляемых к конструкции стены.

Требования к тепловой защите зданий регламентируют следующие нормативные документы:

1. Федеральный закон № 261 от 23.11.2009 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Его цель — создание правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности [3].

2. СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей», распространяемый на расчеты приведенного сопротивления теплопередаче фрагментов ограждающих конструкций зданий, удельных потерь теплоты через теплозащитные элементы и коэффициента теплотехнической однородности [4].

3. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», распространяемый на проектирование тепловой защиты строящихся или реконструируемых жилых, общественных, производственных, сельскохозяйственных и складских зданий, в которых необходимо поддерживать определенный температурно-влажностный режим. Требования данного СП касаются теплозащитной оболочки, в частности она должна удовлетворять следующему:

приведенные сопротивления теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должны быть не меньше нормируемых значений (поэлементные требования);

удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения (комплексное требование);

температура на внутренних поверхностях ограждающих конструкций должна быть не ниже минимально допустимых значений (санитарно-гигиеническое требование) [5].

В статье [6] обнаруживается факт, что нормативные требования к уровню тепловой защиты хоть и незначительно, но оказались ниже требований стандартов 2003 года (СНиП 23–02–2003). Следовательно, здания, полностью удовлетворяющие требованиям актуального свода правил, не будут обеспечивать необходимую теплозащиту в нынешних условиях. Более того, многие строительные организации не всегда выполняют и их. Так, в различных исследованиях [7–9] приведены доказательства недобросовестного выполнения требований (например, утепленное перекрытие под отопляемым техническим этажом; выполненное с дефектами утепление и прочее). Аналогично в работах [10, 11] авторы рассмотрели конструкцию стены из облицовочного кирпича и кладки из газобетона и пришли к выводу о полной несостоятельности такой конструкции.

В статьях [12–14] приводится детальный анализ энергоэффективности и экономической

целесообразности вентилируемого фасада (штукатурка + силикатный кирпич + минеральная вата) и многослойного фасада (штукатурка + силикатный кирпич + минеральная вата + полнотелый кирпич). В результате сделан вывод, что многослойный тип конструкции не удовлетворяет требованиям защиты от переувлажнения. В связи с этим рекомендуется использовать конструкцию с навесным вентилируемым фасадом. Энергоэффективность вентилируемых фасадов подтверждается также в работах [15–19].

Цель предлагаемой вниманию работы — конструирование стены, т. е. определение сочетания слоев материала, обеспечивающего одновременно достаточные уровни термического сопротивления и достаточную по скорости изменения температуры тепловую устойчивость конструкции.

Активное (термическое) сопротивление стены

$$r := \delta / \lambda \quad (1)$$

и аккумуляционная способность стены

$$\beta := \sqrt{\lambda C_V} \quad (2)$$

удовлетворяют условию

$$\beta \sqrt{r} = \sqrt{C_V} \delta. \quad (3)$$

Для каждой стеновой конструкции величина (3) постоянна. Следовательно, чем больше термическое сопротивление стены, тем меньше

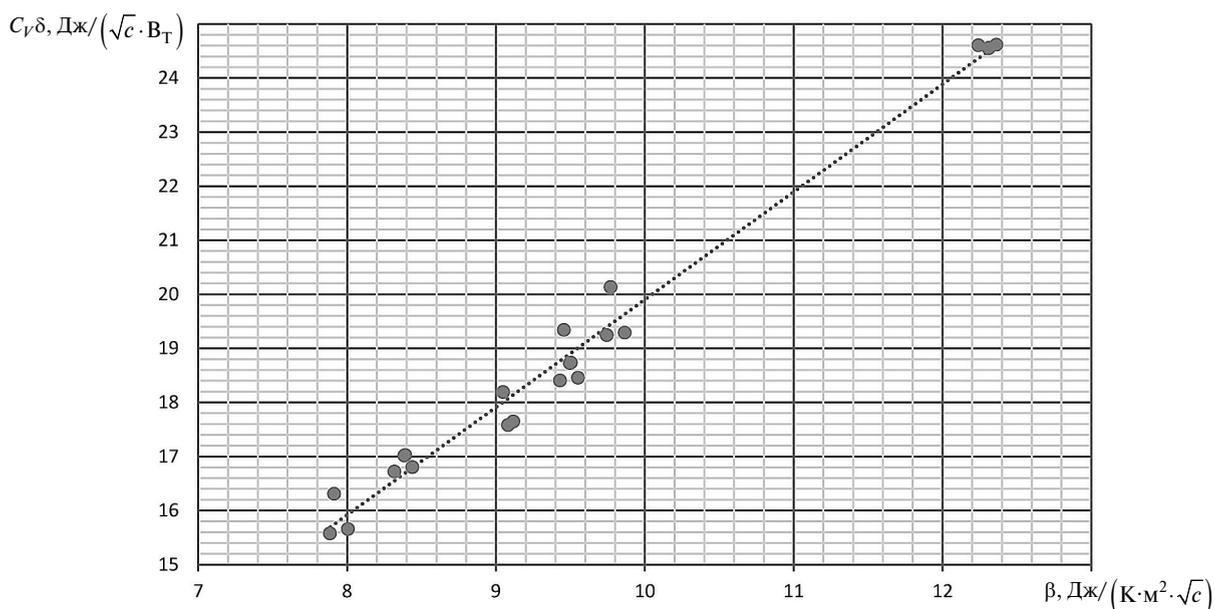
ее аккумуляционная способность и теплоустойчивость.

Для выявления зависимости были рассмотрены многослойные конструкции. В качестве примера: газобетон толщиной 380 мм, утеплитель (различных производителей) толщиной 100 мм и глиняный кирпич толщиной 120 мм. Также были выбраны конструкции с повторяющимися слоями: кирпич — утеплитель — кирпич. Данная зависимость представлена на рисунке.

Требуется подобрать сочетание теплотехнических параметров, обеспечивающих $\max \sqrt{C_V} \delta$ при ограничении $r \geq [r]$. В общем случае эта цель достигается решением задачи на условный экстремум с ограничениями в виде неравенств. Для оценок качества стеновой конструкции как теплотехнического ограждения достаточен параметрический анализ, связанный с перебором допустимых толщин, коэффициентов сопротивления, коэффициентов теплоустойчивости при различных сочетаниях слоев несущего материала (бетон, газобетон, железобетон, кирпич) и теплоизоляционного материала (минеральная вата каменная и мягкая).

Материал и методика работы

Элементарная (одномерная) математическая модель переноса теплоты в ограждающей конструкции основана на предельной (начально-кра-



Зависимость сопротивления теплопередачи от теплоустойчивости

евои) задаче Фурье для линейного уравнения теплопроводности. Эта задача формулируется так:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial}{\partial \xi} \left(f(\xi) \frac{\partial T}{\partial \xi} \right);$$

$$\xi := x / \sqrt{a_m t_0}; \quad \tau := t / t_0; \quad D(T) = (\tau > 0; \xi > 0);$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right)_{\xi=0} + h_0 (T_f - T_0) = T(0, \xi) = 0;$$

$$T_0 := T(\tau, 0). \quad (4)$$

Здесь a_m — масштабное значение коэффициента температуропроводности стеновой конструкции; t_0 — масштаб времени; h_0 — число Био,

$$h_0 = \frac{\alpha \sqrt{t_0}}{\sqrt{C_V \lambda m}}; \quad (5)$$

C_V — объемная теплоемкость материала конструкции; α — коэффициент теплоотдачи в точке $x = 0$ ($\xi = 0$); T_f — температура внешнего источника, обменивающегося теплотой с ограждением; $f(\xi)$ — безразмерный коэффициент температуропроводности:

$$f(\xi) := \frac{a}{a_m}. \quad (6)$$

Для слоистой конструкции это частично-постоянное (внутри слоя) распределение $T_f(\tau)$ — температура внешнего источника. Для задач строительной теплотехники достаточно считать, что распределение $T_f(\tau)$ локально суммируемо на всем временном промежутке $\tau \in (0, \infty)$, $T_f(\tau) \in L^{\text{loc}}(0, \infty)$.

Далее, предполагается, что стеновая конструкция имеет неограниченную протяженность $0 < x < \infty$ ($0 < \xi < \infty$). В действительности, как будет показано, временная неоднородность распределения температуры $T(\tau, \xi)$ существенна при $0 < x < \sqrt{a_m t_0}$, а вне этого промежутка температурное распределение практически стационарно.

Уже из формулировки предельной задачи (4) следует, что увеличение коэффициента усвоения теплоты β равносильно адиабатизации стеновой конструкции; наоборот, если $\beta \rightarrow 0$, т. е. термическое сопротивление увеличивается, то увеличивается и мера внешней теплоотдачи, пропорциональная h_0 : $h_0 \rightarrow \infty$ [20, 24].

Для оценки термической устойчивости стеновой конструкции удобно использовать алгоритм решения предельной задачи (4), описанный в статьях [21–23]. В основе этого алгоритма лежит замена дифференциального уравнения Фурье интегральным тождеством:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} \int_0^\infty T(\tau, \xi) d\xi &= -f(0) \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \right)_{\xi=0} = \\ &= H_0 (T_f(\tau) - T_0(\tau)), \end{aligned} \quad (7)$$

где $H_0 := f(0)h_0$ — модифицированное число Био. Обычно принимается, что h_0 — постоянный параметр. Тогда H_0 — также константа. Не исключая общности, можно считать: $f(0) = 1$, т. е. $a_0 = a_m$, $H_0 = h_0$. В качестве масштаба используется коэффициент температуропроводности внешней ($x = 0, \xi = 0$) поверхности. Распределение температуры в стеновой конструкции ищется в виде

$$T(\tau, \xi) = T_0(\tau) \exp(-m(\tau)\xi). \quad (8)$$

Используя равенство (8), можно формально ввести толщину температурного пограничного слоя стеновой конструкции Δ (глубину проникновения температуры внешнего источника в стеновую конструкцию), определив ее так:

$$\begin{aligned} T_f(\tau) \Delta &= \int_0^\infty T(\tau, \xi) d\xi; \\ \Delta &= T_0(\tau) / (m(\tau) T_f(\tau)). \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом равенства (8) тождество (7) принимает вид

$$\frac{d}{d\tau} (T_0 / m) = f(0) m T_0, \quad (10)$$

или

$$\frac{1}{m^2} \frac{d \ln T_0}{d\tau} - \frac{1}{m^3} \frac{dm}{d\tau} = f(0). \quad (11)$$

Из предельного условия (4) получаем

$$T_0 = \frac{h_0 T_f}{m + H_0}; \quad \Delta = \frac{h_0}{m(H_0 + m)}. \quad (12)$$

Поэтому $T_0(\tau) = T_0(T_f(\tau), m(\tau))$, и, дифференцируя $T_0(\tau)$ по правилам дифференцирования вложенных функций, имеем

$$\frac{d \ln T_0}{d\tau} = \frac{\partial \ln T_0}{\partial T_f} \frac{dT_f}{d\tau} + \frac{\partial \ln T_0}{\partial m} \frac{dm}{d\tau}. \quad (13)$$

В силу (11), исключая $T_0(\tau)$, получаем

$$\frac{1}{m^2} \frac{d \ln T_f}{d\tau} - \frac{1}{m^2} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{h_0 + m} \right) \frac{dm}{d\tau} = 1. \quad (14)$$

Для решения уравнения (14) положим

$$\frac{1}{m} + \frac{1}{h_0 + m} = \frac{s}{m}, \quad 1 \leq s \leq 2 \quad (15)$$

при изменении H_0 от 0 до ∞ . Точнее, $s = 2 - 0$; $h_0 \ll 1$; $s = 1 + 0$; $h_0 \gg 1$. Например, можно предположить, что

$$s(H_0) = 1 + \exp(-H_0). \quad (16)$$

Тогда уравнение (14) принимает вид

$$\frac{s}{2} \frac{dz}{dt} + \frac{d \ln T_f}{d\tau} z = 1, \quad (17)$$

где $z = m - 2$. Одно из решений уравнения (17) имеет вид

$$z(\tau) = \frac{2 \int_0^\tau T_f^{2/s}(\omega) d\omega}{s T_f^{2/s}(\tau)}, \quad (18)$$

поэтому

$$m(\tau) = \sqrt{\frac{s}{2}} \frac{T_f^{1/s}(\tau)}{\sqrt{\int_0^\tau T_f^{2/s}(\omega) d\omega}}. \quad (19)$$

И далее:

$$T_0(\tau) = \frac{h_0 T_f(\tau)}{H_0 + \sqrt{\frac{s}{2}} \frac{T_f^{1/s}(\tau)}{\sqrt{\int_0^\tau T_f^{2/s}(\omega) d\omega}}};$$

$$\Delta = \frac{h_0}{\sqrt{\frac{s}{2}} \frac{T_f^{1/s}(\tau)}{\sqrt{\int_0^\tau T_f^{2/s}(\omega) d\omega}} \left(h_0 + \sqrt{\frac{s}{2}} \frac{T_f^{1/s}(\tau)}{\sqrt{\int_0^\tau T_f^{2/s}(\omega) d\omega}} \right)}. \quad (20)$$

Значит, распределение температуры в конструкции стены имеет вид

$$T(\tau, \xi) = \frac{h_0 T_f(\tau)}{h_0 + \sqrt{\frac{s}{2}} \frac{T_f^{1/s}(\tau)}{\sqrt{\int_0^\tau T_f^{2/s}(\omega) d\omega}}} \times \exp \left(-\xi \sqrt{\frac{s}{2}} \frac{T_f^{1/s}(\tau)}{\sqrt{\int_0^\tau T_f^{2/s}(\omega) d\omega}} \right). \quad (21)$$

В частности, пусть $h_0 \ll 1$; $s \rightarrow 2 - 0$. Тогда, в силу (19)–(21):

$$m(\tau) = \sqrt{\frac{T_f(\tau)}{\int_0^\tau T_f(\omega) d\omega}}. \quad (22)$$

Температура внешней поверхности вычисляется так:

$$T_0(\tau) = \frac{h_0 T_f(\tau)}{h_0 + \sqrt{\frac{T_f(\tau)}{\int_0^\tau T_f(\omega) d\omega}}} = h_0 \sqrt{T_f(\tau) \int_0^\tau T_f(\omega) d\omega}. \quad (23)$$

В этом же приближении для глубины проникновения температуры внешнего источника Δ имеем выражение

$$\Delta = h_0 \sqrt{\frac{\int_0^\tau T_f(\omega) d\omega}{T(\tau)}}. \quad (24)$$

И, наконец, распределение температуры получаем в виде

$$T(\tau, \xi) = h_0 \sqrt{T_f(\tau) \int_0^\tau T_f(\omega) d\omega} \exp \left(-\xi \sqrt{\frac{T_f(\tau)}{\int_0^\tau T_f(\omega) d\omega}} \right). \quad (25)$$

Если же $H_0 \gg 1$, то $s \rightarrow 1 + 0$. И тогда

$$m(\tau) = \frac{T_f(\tau)}{\sqrt{2 \int_0^\tau T_f^2(\omega) d\omega}};$$

$$T_0(\tau) = \frac{h_0 T_f}{H_0 + \frac{T_f(\tau)}{\sqrt{2 \int_0^\tau T_f^2(\omega) d\omega}}} \approx T_f(\tau);$$

$$\Delta \approx \frac{1}{m} = \frac{\sqrt{2 \int_0^\tau T_f^2(\omega) d\omega}}{T_f(\tau)};$$

$$T(\tau, \xi) =$$

$$= \frac{h_0 T_f}{h_0 + \frac{T_f(\tau)}{\sqrt{2 \int_0^\tau T_f^2(\omega) d\omega}}} \exp \left(-\xi \frac{T_f(\tau)}{\sqrt{2 \int_0^\tau T_f^2(\omega) d\omega}} \right) \approx$$

$$\approx T_f(\tau) \exp \left(-\xi \frac{T_f(\tau)}{\sqrt{2 \int_0^\tau T_f^2(\omega) d\omega}} \right). \quad (26)$$

Скорость изменения температуры стеновой конструкции в среднем на промежутке $0 < \xi < \infty$ пропорциональна $v = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{T_0}{m} \right)$.

Если (модифицированное) число Био $h_0 \gg 1$ (большое термическое сопротивление, малая аккумуляционная способность стеновой конструкции), то

$$v_{H_0 \gg 1} = d / d\tau \left(\sqrt{2 \int_0^\tau T_f^2(\omega) d\omega} \right) =$$

$$= \frac{T_f^2(\tau)}{\sqrt{2 \int_0^\tau T_f^2(\omega) d\omega}}. \quad (27)$$

И, наоборот, при малых числах Био, $H_0 \ll 1$:

$$v_{H_0 \ll 1} = d / d\tau(\tau) \left(h_0 \int_0^\tau T_f(\omega) d\omega \right) =$$

$$= h_0 T_f(\tau). \quad (28)$$

Обсуждение результатов

Сравнивая меры скоростей изменения температуры стеновой конструкции, получаем: $v_{h_0 \ll 1} \ll v_{h_0 \gg 1}$, т. е. стеновая конструкция с большой аккумуляционной способностью устойчивее конструкции с большим термическим сопротивлением, но с малым коэффициентом усвоения теплоты β .

Далее, неоднородность температуры стеновой конструкции определяется величиной экспоненты $m(\tau)$. Из полученных равенств следует (используется неравенство Коши):

$$\frac{m_{h_0 \ll 1}}{m_{h_0 \gg 1}} = \frac{\sqrt{T_f(\tau)}}{\sqrt{\int_0^\tau T_f(\omega) d\omega}} / \frac{T_f(\tau)}{\sqrt{2 \int_0^\tau T_f^2(\omega) d\omega}} =$$

$$= \frac{\sqrt{2 \int_0^\tau T_f^2(\omega) d\omega}}{\sqrt{T_f(\tau) \int_0^\tau T_f(\omega) d\omega}} \geq \frac{\sqrt{2 \int_0^\tau T_f(\omega) d\omega}}{\sqrt{\tau T_f(\tau)}}. \quad (29)$$

Если $T_f(\tau)$ — целая рациональная функция (например, полином), то $\frac{m_{h_0 \ll 1}}{m_{h_0 \gg 1}} = O(1)$, и изменения температуры по толщине стеновой конструкции не зависят от модифицированного числа Био H_0 . Если температура внешнего источника неограниченна, то неоднородность распределения температуры по толщине стеновой конструкции не зависит от коэффициента усвоения теплоты β .

Это утверждение сохраняет силу и для тригонометрических полиномов, т. е. ограниченных изменений температуры внешнего источника. Пусть $T_f(\tau) = 1 + \theta \sin 2\pi\tau$, $\theta \ll 1$ — периодическое, с периодом t_0 , распределение температуры

внешнего источника теплового потока. В силу неравенства (29)

$$\frac{m_{h_0 \ll 1}}{m_{h_0 \gg 1}} \geq \sqrt{\frac{2\tau + \theta / \pi(1 - \cos 2\pi\tau)}{\tau(1 + \theta \sin 2\pi\tau)}} \xrightarrow{\tau \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{2}{1 \pm \theta}}. \quad (30)$$

Выводы

Таким образом, оценки, основанные на приближенном решении предельной задачи Коши (4), позволяют утверждать следующее:

1) распределение температуры экспоненциально убывает при удалении от поверхности контакта $x = 0$ ($\xi = 0$) и вне промежутка $0 < \xi < 1$ практически стационарно;

2) температура конструкции на поверхности контакта, $T_0(\tau)$, растет при увеличении термического сопротивления поверхности,

и $T_0(\tau) \rightarrow T_f - 0$ равномерно по $\tau > 0$. Следова-

тельно, увеличение коэффициента усвоения теплоты β способствует своеобразной «адиабатизации» конструкции, «отстраивая» изменение температуры поверхности $T_0(\tau)$ от изменения температуры источника $T_f(\tau)$;

3) стеновая конструкция с большой аккумуляционной способностью устойчивее конструкции с большим термическим сопротивлением, но с малым коэффициентом усвоения теплоты β : $v_{h_0 \ll 1} \ll v_{h_0 \gg 1}$;

4) такое соотношение скоростей изменения температуры стеновой конструкции связано с тем, что толщина температурного пограничного слоя при $H_0 \ll 1$ мала: стеновая конструкция не реагирует на изменение температуры источника; при больших числах Био, наоборот, стена реагирует на изменение температуры источника увеличением Δ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Knat'ko M.V., Efimenko M.N., Gorshkov A.S. On the question of durability and energy efficiency of modern fencing wall construction of residential, administrative and industrial buildings // Magazine of Civil Engineering. 2008. No 2. P. 50–53.
2. Korniyenko S. Evaluation of thermal performance of residential building envelope // Procedia Engineering. 2015. Vol. 117. P. 191–196.
3. ФЗ № 261. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. М., 2009. 42с.
4. СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей. М., 2015. 72 с.
5. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. М.: Госстрой России; ФГУП ЦПП, 2012. 139 с.
6. Горшков А.С., Рымкевич П.П. Диаграммный метод описания процесса нестационарной теплопередачи // Инженерно-строительный журнал. 2015. №8(60). С. 68–82.
7. Vatin N., Petrichenko M., Nemova D. Hydraulic methods for calculation of system of rear ventilated facades // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 633–634. P. 1007–1012.
8. Корниенко С.В. Повышение теплозащиты стеновых конструкций зданий из объемных блоков // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 8 (47). С. 17–30.
9. Корниенко С.В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 8. С. 25–37.
10. Vatin N.I., Nemova D.V., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Influence of building envelope thermal protection on heat loss value in the building // Magazine of Civil Engineering. 2013. No 8. P. 4–14.
11. Vatin N., Gorshkov A., Nemova D., Tarasova D. Energy efficiency of facades at major repairs of buildings // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 633–634. P. 991–996.
12. Ватин Н.И., Горшков А.С., Немова Д.В. Энергоэффективность ограждающих конструкций при капитальном ремонте // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 3 (8). С. 1–11.
13. Zemitis J., Borodinecs A., Frolova M. Measurements of moisture production caused by various sources // Energy and Buildings. 2016. Vol. 127. P. 884–891.
14. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I. Simulation of non-stationary heat transfer processes in autoclaved aerated concrete-walls // Magazine of Civil Engineering. 2014. No 8. P. 38–48.
15. Горшков А., Ватин Н., Немова Д. Строительная физика. Энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций по стандартам Финляндии. Saarbrücken, 2014. 136 с.
16. Vatin N.I., Gorshkov A.S., Nemova D.V., Staritsyna A.A., Tarasova D.S. The energy-efficient heat insulation thickness for systems of hinged ventilated facades //

Advanced Materials Research. 2014. Vol. 941–944. P. 905–920.

17. **Olshevskiy V., Statsenko E., Musorina T., Nemo-va D., Ostrovaia A.** Moisture transfer in ventilated facade structures // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 53. P. 1–5.

18. **Туснина О.А., Емельянов А.А., Туснина В.М.** Теплотехнические свойства различных конструктивных систем навесных вентилируемых фасадов // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 8. С. 54–88.

19. **Петриченко М.Р., Петроченко М.В., Явтушенко Е.Б.** Гидравлически оптимальная вентилируемая щель // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 2 (37). С. 35–40.

20. **Zaborova D., Petrochenko M., Chernenkaya L.** Thermal Stability Influence of the Enclosure Structure on the Building's Energy Efficiency // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 73. P. 2–7.

21. **Петриченко М.Р.** Слабая аппроксимация периодического решения задачи Фурье // Примеры фундаментальных и прикладных исследований XXV Международная научно-практическая конференция. 2016. С. 31–35.

22. **Петриченко М.Р., Петроченко М.В.** Достаточные условия существования свободно конвективного течения в вертикальном щелевом канале // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 147(2). С. 276–282.

23. **Куколев М. И., Петриченко М. Р.** Определение температурного поля стенки при периодическом тепловом воздействии // Двигатель-2007: Труды международной конференции. М.: Изд-во МГТУ. 2007. С. 115–119.

24. **Заборова Д.Д., Куколев М.И., Мусорина Т.А., Петриченко М.Р.** Математическая модель энергетической эффективности слоистых строительных ограждений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 4. С. 28–33. DOI: 10.5862/JEST.254.03

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАБОРОВА Дарья Дмитриевна — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: zaborova-dasha@mail.ru

МУСОРИНА Татьяна Александровна — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: flamingo-93@mail.ru

ПЕТРИЧЕНКО Михаил Романович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: fonpetrich@mail.ru

REFERENCES

1. **Knat'ko M.V., Efimenko M.N., Gorshkov A.S.** On the question of durability and energy efficiency of modern fencing wall construction of residential, administrative and industrial buildings. *Magazine of Civil Engineering*. 2008. No 2. Pp. 50–53.

2. **Korniyenko S.** Evaluation of thermal performance of residential building envelope. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. P. 191–196.

3. **261-FZ (Federal Law).** Ob energosberezheniii o povyshenii energeticheskoy effektivnostii o vnesenii izmeneniy v otdelnyye zakonodatelnyye akty Rossiyskoy Federatsii [On energy saving and energy efficiency improvements and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation]. 2009. 42 p. (rus)

4. **SP 230.1325800.2015** (Set of rules). Konstruktsii ogradhdayushchiye zdaniy. Kharakteristiki teplotekhnicheskikh neodnorodnostey. [Construction fencing buildings. Characteristics of thermal irregularities]. М., 2015. 72 p. (rus)

5. **SP 50.13330.2012.** (Set of rules) Teplovayazashchitazdaniy. [Thermal protection of buildings] М.: GosstroyRossii.FGUP TsPP, 2012.139 p. (rus)

6. **Gorshkov A.S., Rymkevich P.P.** Diagrammnyy metod opisaniya protsessa nestatsionarnoy teploperedachi.

[Diagram description the method of non-stationary heat transfer process]. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. № 8(60). S. 68–82. (rus)

7. **Vatin N., Petrichenko M., Nemova D.** Hydraulic methods for calculation of system of rear ventilated facades. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 633–634. P. 1007–1012.

8. **Korniyenko S.V.** Povysheniye teplozashchity stenovykh konstruktsiy zdaniy iz obyemnykh blokov. [Increase thermal protection wall structures of the building blocks of bulk]. *Construction of unique buildings and structures*. 2016. № 8 (47). S. 17–30. (rus)

9. **Korniyenko S.V.** Mnogofaktornoye otsenka teplovogo rezhima v elementakh obolochki zdaniye. [Multifactor estimation of the thermal regime in the envelope the building elements]. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. № 8. S. 25–37. (rus)

10. **Vatin N.I., Nemova D.V., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S.** Influence of building envelope thermal protection on heat loss value in the building. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. № 8. P. 4–14.

11. **Vatin N., Gorshkov A., Nemova D., Tarasova D.** Energy efficiency of facades at major repairs of buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 633–634. P. 991–996.

12. **Vatin N.I., Gorshkov A.S., Nemova D.V.** Energoeffektivnos tograzhdayushchikh konstruksiy pri kapitalnom remonte. [Energy efficiency building envelopes during overhaul]. *Construction of unique buildings and structures*. 2013. № 3(8). S. 1–11. (rus)
13. **Zemitis J., Borodinecs A., Frolova M.** Measurements of moisture production caused by various sources. *Energy and Buildings*. 2016. № 127. P. 884–891.
14. **Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Vatin N.I.** Simulation of non-stationary heat transfer processes in autoclaved aerated concrete-walls. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. № 8. P. 38–48.
15. **Gorshkov A., Vatin N., Nemova D.** Stroitel'nayafizika. Energoeffektivnoye proyektirovaniye ograzhdayushchikh konstruksiy po standartam Finlyandii. [Building Physics. Energy efficient design walling standards in Finland]. Saarbrücken, 2014. 136 p. (rus)
16. **Vatin N.I., Gorshkov A.S., Nemova D.V., Staritsyna A. A., Tarasova D. S.** The energy-efficient heat insulation thickness for systems of hinged ventilated facades. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 941–944. P. 905–920.
17. **Olshevskiy V., Statsenko E., Musorina T., Nemova D., Ostrovaia A.** Moisture transfer in ventilated facade structures. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 53. P. 1–5.
18. **Tusnina O.A., Yemelyanov A.A., Tusnina V.M.** Teplotekhnicheskiye svoystva razlichnykh konstruktivnykh sistem navesnykh ventiliruyemykh fasadov. [Thermal properties of different structural systems of ventilated facades]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. № 8. S. 54–88. (rus)
19. **Petrichenko M.R., Petrochenko M.V., YavtushenkoYe.B.** Gidravlicheski optimalnaya ventiliruyemaya shchel. [Hydraulically optimum vented slot]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. № 2 (37). S. 35–40. (rus)
20. **Zaborova D., Petrochenko M., Chernenkaya L.** Thermal Stability Influence of the Enclosure Structure on the Building's Energy Efficiency. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 73. P. 2–7.
21. **Petrichenko M.R.** Slabaya approksimatsiya periodicheskogo resheniya zadachi FURE. [Weak approximation of a periodic solution of the Fourier problem]. *Primary fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy XXV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. 2016. S. 31–35. (rus)
22. **Petrichenko M.R., Petrochenko M.V.** Dostatochnyye usloviya sushchestvovaniya svobodno konvektivnogo techeniya v vertikalnom shchelevom kanale. [Sufficient condition of existence of free convective flow in a vertical slot channel]. *Nauchno-tekhnicheckiye vedomosti SPbGPU*. 2012. № 147(2). S. 276–282. (rus)
23. **Kukolev M. I., Petrichenko M. R.** Opredeleniye temperaturnogo polya stenki pri periodicheskom teplovomvozdeystvii. [Determination of the temperature field wall with periodic exposure to heat]. *Dvigatel-2007, Trudy mezhdunarodnoy konferentsii*. Moskva. MGTU. 2007. S. 115–119. (rus)
24. **Zaborova D.D., Kukolev M.I., Musorina T.A., Petrichenko M.R.** Matematicheskaya model energeticheskoy effektivnosti sloistykh stroitelnykh ograzhdeniy. *Nauchno-tekhnicheckiye vedomosti SPbGPU*. 2016. № 4. S. 28–33. DOI: 10.5862/JEST.254.03

AUTHORS

ZABOROVA Daria D. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: zaborova-dasha@mail.ru
MUSSORINA Tatiana A. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: flamingo-93@mail.ru
PETRICHENKO Mikhail R. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: fonpetrich@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 10.01.2017.