

УДК 536:21:674.038:699.86

*Н.А. ЦВЕТКОВ, А.Н. ХУТОРНОЙ, А.В. ТОЛСТЫХ, Ю.Н. ДОРОШЕНКО,
Томский государственный архитектурно-строительный университет*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕН ИЗ ПРОФИЛИРОВАННОГО УТЕПЛЕННОГО БРУСА С КОННЕКТОРАМИ*

Проведение оценки и сравнения теплозащитных свойств различных брусковых конструкций в зависимости от их геометрических характеристик и теплофизических параметров используемых деревянных элементов и утеплителя как в условиях стационарной, так и нестационарной теплопередачи, в том числе и при циклическом изменении температуры наружного воздуха.

На основе численного моделирования нестационарного теплопереноса в наружных ограждающих конструкциях, выполненных из профилированного теплового бруса с коннекторами, рассчитаны температурные поля и тепловые потоки в выбранных неоднородных фрагментах.

Определены соответствующие теплозащитные характеристики, и проведено их сравнение для рассмотренных брусковых конструкций. Выполнена оценка снижения теплозащитных характеристик в условиях нестационарного теплообмена и под влиянием некоторых конструктивных элементов стены. Выявлена степень теплоустойчивости перспективных конструкций теплового профилированного бруса с горизонтальными и вертикальными коннекторами из фанеры.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых конструкций утепленного бруса с вертикальным и горизонтальным креплением ламелей, предназначенных для создания энергоэффективных наружных ограждающих конструкций в малоэтажном домостроении.

Проведенные оценки влияния неоднородных участков на поля температуры и тепловых потоков при нестационарной теплопроводности позволили установить, что ограждающие конструкции из утепленного клееного бруса с Н-образными вертикальными коннекторами из фанеры и внутренней продольной ламелью по своим теплозащитным свойствам превосходят другие рассмотренные брусковые конструкции.

Ключевые слова: профилированный тепловой брус; малоэтажное строительство; ограждающие конструкции; теплоперенос; тепловой режим; температурное поле; коннекторы; приведенное сопротивление теплопередаче; теплоустойчивость.

Для цитирования: Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В., Дорошенко Ю.Н. Сравнительный анализ теплозащитных характеристик стен из профилированного утепленного бруса с коннекторами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 2. С. 124–136.

*N.A. TSVETKOV, A.N. KHUTORNOI, A.V. TOLSTYKH, Yu.N. DOROSHENKO,
Tomsk State University of Architecture and Building*

COMPARATIVE ANALYSIS OF HEAT-INSULATING PROPERTIES OF WALLING MADE OF PROFILED BEAMS

Purpose: The aim of this paper is to evaluate and compare heat-insulating properties of various beam structures depending on their geometry and thermophysical parameters of wood-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 16-48-700367.

en elements and insulating materials, which are used both under stationary and non-stationary conditions of heat transfer, including cyclic changes in the outside air temperature. **Design technique:** The numerical simulation is performed for non-stationary heat transfer which occurs in external walling systems made of profiled beams with connectors. Based on the obtained results, the temperature fields and heat fluxes in the selected inhomogeneous fragments are calculated. **Results:** The appropriate heat-insulating properties are determined and compared with a view to use them in considered beam structures. The reduction in heat-insulating properties is evaluated for the non-stationary heat exchange and the walling system elements. The degree of thermal stability is determined for the walling systems made of profiled beams with horizontal and vertical connectors made of veneer wood. **Practical implications:** The obtained results can be used in new design of heat-insulating profiled beams with vertical and horizontal connectors intended for the production of energy-efficient external walling systems in low-rise house building. **Originality/value:** The influence of inhomogeneous sections of walling systems on temperature fields and heat fluxes is investigated for non-stationary thermal conductivity. The investigation results show that heat-insulating properties of walling systems made of profiled beams with H-shaped vertical connectors made of veneer wood with the inner longitudinal lamella, greatly exceed heat-insulating properties of other beam structures considered in the paper.

Keywords: profiled beam; low-rise construction; walling; heat transfer; thermal condition; temperature field; connector; reduced total thermal resistance; heat resistance.

For citation: Tsvetkov N.A., Khutornoi A.N., Tolstykh A.V., Doroshenko Yu.N. Sravnitel'nyi analiz teplozashchitnykh kharakteristik sten iz profilirovannogo uteplyennogo brusa s konnektorami [Comparative analysis of heat-insulating properties of walls made of profiled beams]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 2. Pp. 124–136. (rus)

Введение

В настоящее время древесина широко применяется при возведении малоэтажных зданий [1]. В наиболее прогрессивных технологиях ограждающие конструкции деревянных домов выполняются из клееного профилированного бруса [2, 3]. Теоретическое исследование тепломассопереноса для оценки влажностного состояния однородной наружной брусовой стены в зависимости от ее начального влагосодержания и других определяющих факторов проведено в работах [4, 5]. Весьма перспективными по своим теплозащитным свойствам являются стены, изготовленные из утепленного бруса, в конструкции которого предусматривается соединение внешних и внутренних деревянных ламелей вертикальными и горизонтальными коннекторами из фанеры [6]. Основные исследования, связанные с теплотехническими и прочностными обоснованиями конструкций утепленного бруса, представлены в работах [7–10]. В работах [9, 10] приведены результаты расчета стационарных температурных полей в ограждающих конструкциях из клееного профилированного бруса с коннекторами, определены теплозащитные характеристики некоторых конструкций брусковых стен, которые были предложены в работе [6].

Для дальнейшего повышения энергоэффективности наружных ограждений из утепленного бруса с поперечным и вертикальным креплением ламелей коннекторами необходимо исследовать влияние коннекторов на поле температуры и поле тепловых потоков в случае нестационарной теплопередачи.

В настоящей статье проведены оценка и сравнение теплозащитных свойств различных конструкций утепленного бруса в зависимости от геометрических и теплофизических характеристик используемых деревянных элементов и утеплителя в условиях нестационарной теплопередачи, в том числе при циклическом изменении температуры наружного воздуха.

Для моделирования температурных полей рассматривается участок брусовой стены, представляющий собой часть утепленного бруса с двумя коннекторами (рис. 1). Основным элементом бруса, обеспечивающим его прочностные характеристики, являются ламели, между которыми расположен слой эффективного утеплителя. В конструкции, представленной на рис. 1, а, ламели каждого бруса связаны коннекторами, имеющими форму пластин, закрепленных штифтовым креплением. На рис. 1, б показан другой вариант утепленного профилированного бруса, в котором используются Н-образные вертикальные коннекторы [6].

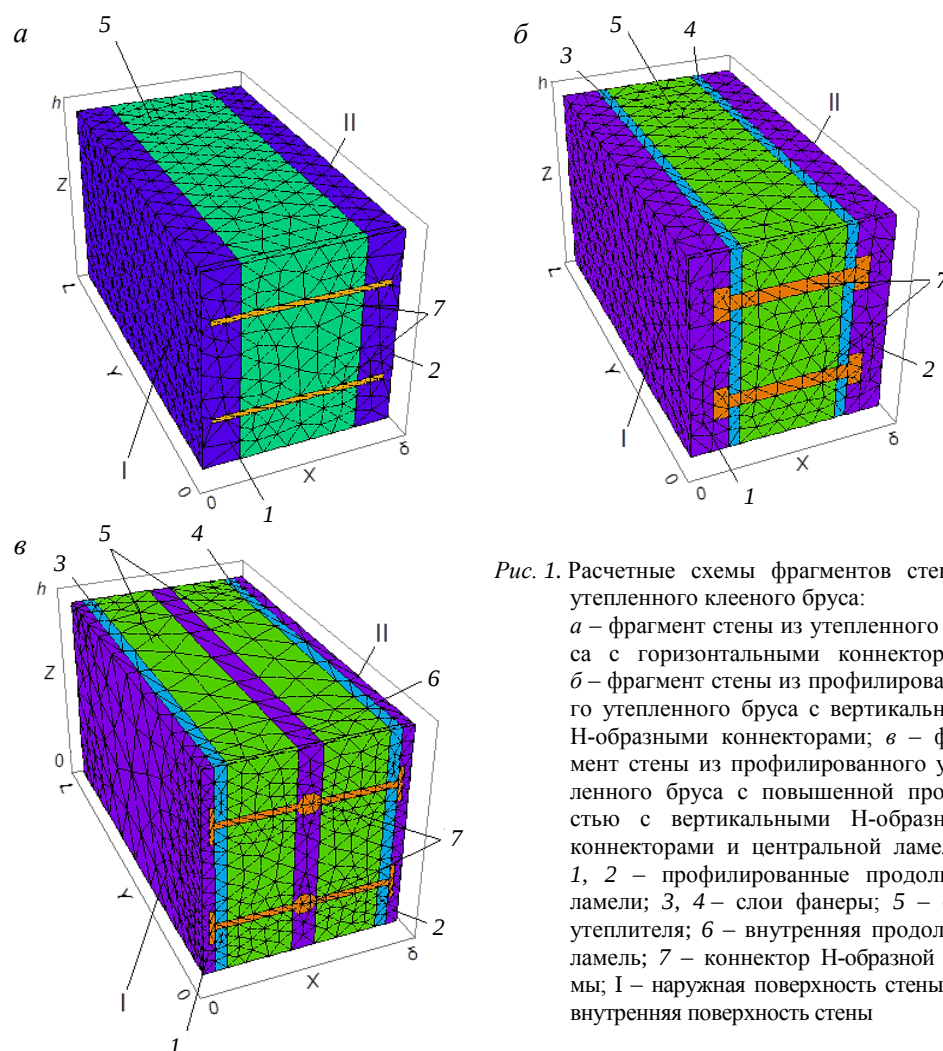


Рис. 1. Расчетные схемы фрагментов стен из утепленного клееного бруса:

а – фрагмент стены из утепленного бруса с горизонтальными коннекторами; б – фрагмент стены из профилированного утепленного бруса с вертикальными Н-образными коннекторами; в – фрагмент стены из профилированного утепленного бруса с повышенной прочностью с вертикальными Н-образными коннекторами и центральной ламелью; 1, 2 – профилированные продольные ламели; 3, 4 – слои фанеры; 5 – слои утеплителя; 6 – внутренняя продольная ламель; 7 – коннектор Н-образной формы; I – наружная поверхность стены; II – внутренняя поверхность стены

Конструкция бруса повышенной прочности предусматривает использование внутренней продольной ламели (рис. 1, в). Коннекторы в этом случае имеют не только дополнительные выступающие части, которые закреплены в выемках, выполненных в наружных продольных профилированных ламелях, но и утолщение в средней части, предназначенное для крепления внутренней продольной ламели.

1. Постановка задачи теплопереноса в стене из утепленного профилированного бруса

Высота выделенного участка стены во всех фрагментах (рис. 1) составляет $h_{all} = 0,225$ м, ширина – 0,3 м, толщина $l_{all} = 0,21$ м. Толщина деревянных ламелей, используемых в конструкциях, показанных на рис. 1, а, б, составляет 0,04 м. Для стен из бруса с внутренней продольной ламелью (рис. 1, в) толщина профилированных продольных ламелей, образующих внутреннюю и наружную поверхность стены, равна 0,012 м. Толщина слоя фанеры, приклеенного к ламелям, составляет 0,012 м. Толщина внутренней продольной ламели в конструкции утепленного бруса, приведенной на рис. 1, в, принята равной 0,025 м. Все ламели изготовлены из сосны, коэффициент теплопроводности которой в базовых вариантах расчета принимался: поперек волокон $\lambda_{\text{дв}} = 0,18$ и вдоль волокон $\lambda_{\text{дп}} = 0,35$ Вт/(м·К). Общая толщина утеплителя $l_{\text{ут}}$ в рассматриваемых конструкциях утепленного клееного бруса варьируется от 0,11 до 0,187 м.

Размеры коннекторов из фанеры: для конструкции, приведенной на рис. 1, а, сечение – 0,02×0,012, длина – 0,19 м; для конструкции, приведенной на рис. 1, б, сечение – 0,012×0,016, длина – 0,192 м; для конструкции, приведенной на рис. 1, в, сечение узкой части – 0,012×0,008 м, сечение в наиболее широкой части (в центре) – 0,022×0,008 м, длина – 0,196 м. В утепленном бруссе повышенной прочности (рис. 1, в) коннектор расположен симметрично относительно внутренней продольной ламели.

Конструкция бруса повышенной прочности предусматривает использование внутренней продольной ламели (рис. 1, в). Коннекторы в этом случае имеют не только дополнительные выступающие части, которые закреплены в выемках, выполненных в наружных продольных профилированных ламелях, но и утолщение в средней части, предназначенное для крепления внутренней продольной ламели.

Теплопроводность фанеры (ГОСТ 3916.1–96) для условий эксплуатации наружного ограждения А принята равной 0,18 Вт/(м·К), минимально возможная теплопроводность утеплителя – $\lambda_{\text{ут}} = 0,033$ Вт/(м·К).

Температура наружного воздуха со стороны плоскости I принята равной минус 39 °С, внутреннего воздуха (со стороны плоскости II) – плюс 20 °С. На плоскости I задан коэффициент теплоотдачи 23 Вт/(м²·К), на плоскости II – 8,7 Вт/(м²·К).

Теплоперенос в каждом из рассматриваемых пространственных элементов может быть смоделирован с помощью трехмерных нестационарных уравнений теплопроводности в декартовых координатах:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{0,l} c_l}{3600} \frac{\partial t_{l,i}}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(\lambda_l \operatorname{grad} t_{l,i}); & \frac{\rho_\phi c_\phi}{3600} \frac{\partial t_\phi}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(\lambda_\phi \operatorname{grad} t_\phi); \\ \frac{\rho_{yt} c_{yt}}{3600} \frac{\partial t_{yt,j}}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(\lambda_{yt} \operatorname{grad} t_{yt,j}), \end{aligned} \quad (1)$$

при решении которых следует использовать следующие начальные и граничные условия:

$$t_{l,1}|_{\tau=0} = t_{\text{внт}}, \quad t_\phi|_{\tau=0} = t_{\text{внт}}, \quad t_{yt,j}|_{\tau=0} = t_{\text{внт}}; \quad (2)$$

$$-\lambda_l \frac{\partial t_{l,1}}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0 (t_{\text{внт}} - t_{l,1}) \Big|_{x=0}, \quad \lambda_l \frac{\partial t_{l,2}}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_w (t_{\text{внт}} - t_{l,2}) \Big|_{x=\delta}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_{l,i}}{\partial y} \Big|_{y=0} &= 0, \quad \frac{\partial t_{l,i}}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0, \quad \frac{\partial t_{l,i}}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial t_{l,i}}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad \frac{\partial t_\phi}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial t_\phi}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0, \\ \frac{\partial t_\phi}{\partial z} \Big|_{z=0} &= 0, \quad \frac{\partial t_\phi}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad \frac{\partial t_{yt,j}}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial t_{yt,j}}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0, \quad \frac{\partial t_{yt,j}}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial t_{yt,j}}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} t_{l,i}|_{G_n-0} &= t|_{G_n+0}, \quad \lambda_l \frac{\partial t_{l,i}}{\partial n} \Big|_{G_n-0} = \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{G_n+0}, \quad t_\phi|_{G_\phi-0} = t|_{G_\phi+0}, \\ \lambda_\phi \frac{\partial t_\phi}{\partial n} \Big|_{G_\phi-0} &= \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{G_\phi+0}, \quad t_{yt}|_{G_{yt}-0} = t|_{G_{yt}+0}, \quad \lambda_{yt} \frac{\partial t_{yt}}{\partial n} \Big|_{G_{yt}-0} = \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{G_{yt}+0}. \end{aligned} \quad (5)$$

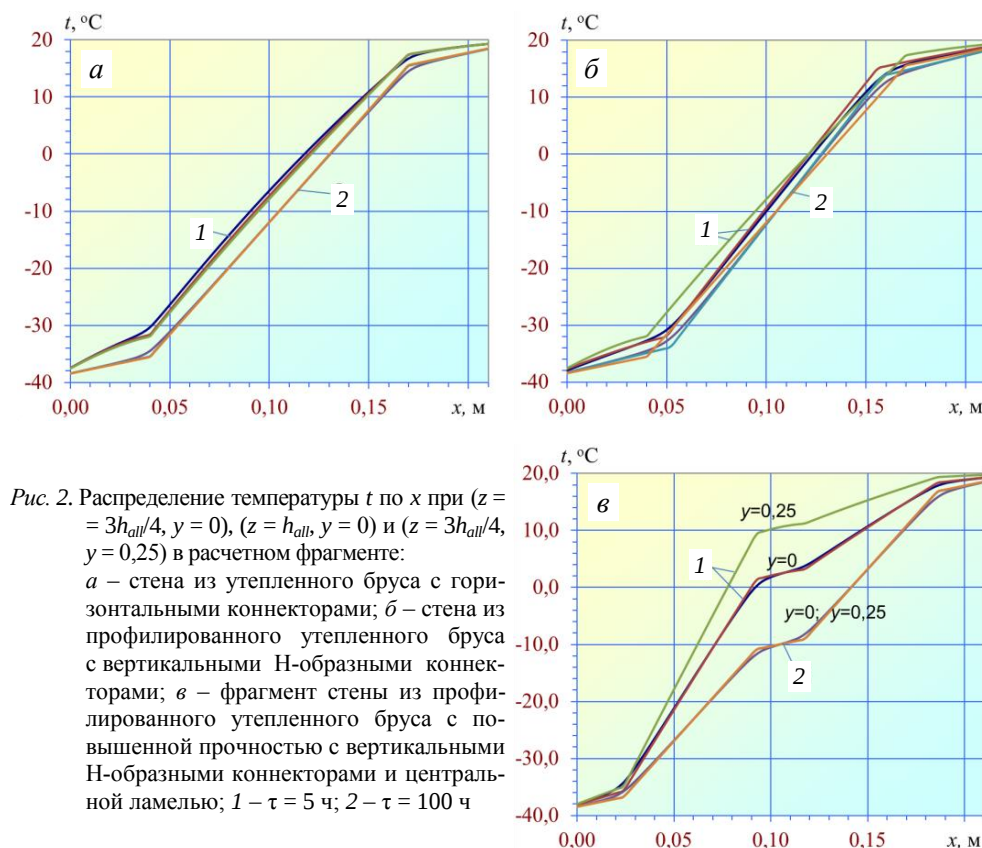
В соотношениях (1) – (5): $i = 1, 2, 3$ (индексы 1 и 2 относятся к профилированным продольным ламелям, индекс 3 – к внутренней продольной ламели); ρ_0 – плотность древесины ламелей, кг/м³; $t_{l,i}$, $t_{\phi,i}$, $t_{yt,i}$ – температура в ламелях, элементах, выполненных из фанеры, слоях утеплителя соответственно, °C; τ – время, ч; c_l , λ_l , c_ϕ , λ_ϕ , c_{yt} , λ_{yt} – теплоемкость и теплопроводность древесины ламелей, фанеры и утеплителя, Дж/(кг·°C) и Вт/(м·°C) соответственно; $t_{\text{внт}}$ – температура внутреннего воздуха, °C; α_0, α_w – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стены, Вт/(м²·°C); $\frac{\partial}{\partial n}$ – градиенты по нормали к внутренним поверхностям контакта элементов утепленного теплового бруса.

Численное моделирование процессов теплопереноса на основе модели (1) – (5) было выполнено в среде FlexPDE, поддерживающей метод конечных элементов при моделировании объектов, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями с частными производными.

2. Результаты численного моделирования теплопереноса в неоднородном фрагменте стены из утепленного бруса

Особенности нестационарной теплопередачи через неоднородные участки брусковых стен проявляются в изменении температуры по оси x , которое показано на рис. 2. Коннектор из фанеры не приводит к существенному

снижению температуры в расчетной области. После выхода на стационарный режим различие температур на оси коннектора ($y = 0$) и вблизи противоположной границы расчетной области ($y = 0,25$ м) не превышает 0,01 %.



Для всех конструкций профилированного бруса температура на наружной поверхности быстро уменьшается и достигает значений, соответствующих температуре наружного воздуха, через 5 ч. Температура на внутренней поверхности бруса понижается незначительно – до 18,5 °С при выходе на стационарный режим.

Влияние нестационарности процесса распространения тепла на тепловое состояние неоднородного бруса несколько сильнее проявляется при наличии внутренней деревянной ламели. Данные, представленные на рис. 2, показывают, что максимальный перепад температур в момент времени $\tau = 5$ ч на оси коннектора и на периферии расчетного фрагмента в горизонтальной плоскости, проходящей через ось коннектора, при $x = l_{all} / 2$ и $y = 0,25$ м составляет 8 °С. Кроме того, максимальное нестационарное изменение температуры за промежутки времени от $\tau = 5$ ч до $\tau = 100$ ч для конструкций бруса без внутренней продольной ламели не превышает 4 °С, а аналогичный перепад температуры для профилированного бруса с внутренней ламелью при $x = l_{all} / 2$ и $y = 0$ достигает 11,5 °С.

Однако при достижении стационарного режима теплопереноса внутренней продольная ламель не приводит к существенному снижению температуры на внутренней поверхности, а на вертикальной плоскости симметрии бруса температура в случае наличия внутренней ламели превышает аналогичную величину для фрагментов конструкций, представленных на рис. 1 а, б.

Рис. 3 характеризует влияние коннекторов на распределение температуры по оси z . Использование дополнительной внутренней ламели из древесины (рис. 3, линия б) приводит к небольшому снижению температуры на границе наружного слоя бруса с утеплителем. В то же время температура на границе внутреннего слоя бруса и утеплителя (рис. 3, в) достигает максимальных значений после выхода на стационарный режим теплообмена при использовании конструкции с внутренней продольной ламелью и превосходит аналогичную величину для стены, выполненной из бруса с горизонтальными коннекторами, на $1,4^\circ\text{C}$, а для стены из бруса с вертикальными коннекторами – на 3°C . Таким образом, утепленный брус повышенной прочности по своим теплозащитным свойствам не уступает конструкциям, представленным на рис. 1 а, б.

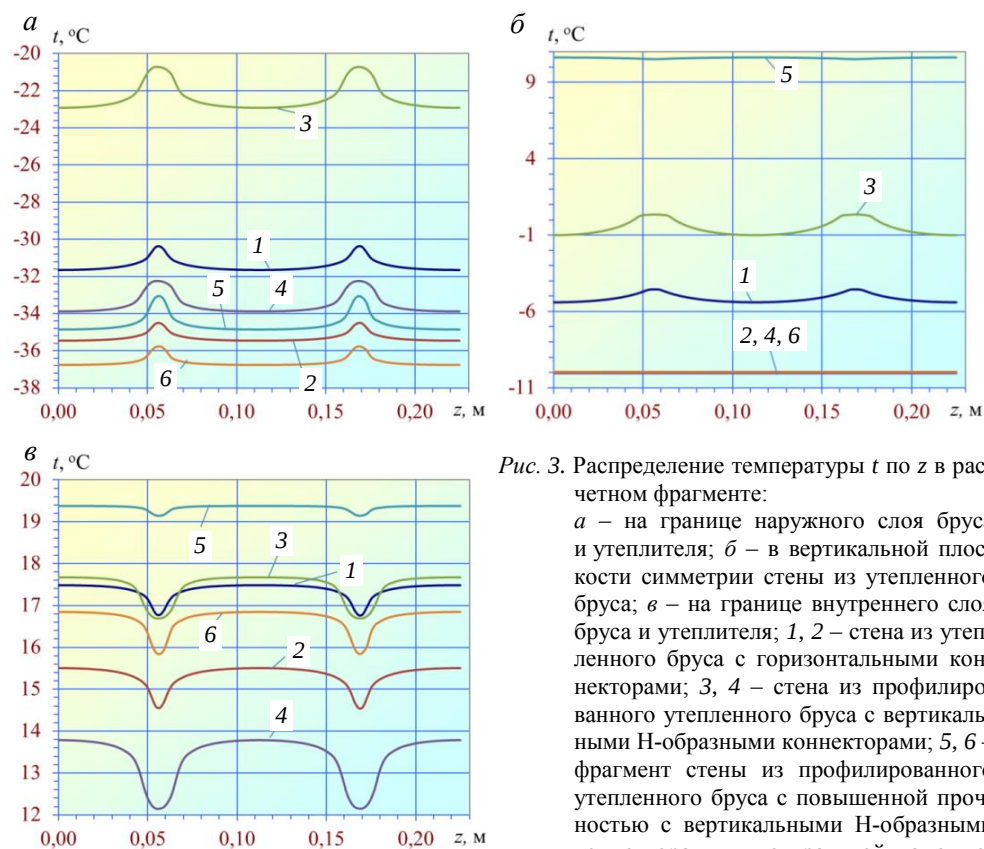


Рис. 3. Распределение температуры t по z в расчетном фрагменте:
 а – на границе наружного слоя бруса и утеплителя; б – в вертикальной плоскости симметрии стены из утепленного бруса; в – на границе внутреннего слоя бруса и утеплителя; 1, 2 – стена из утепленного бруса с горизонтальными коннекторами; 3, 4 – стена из профилированного утепленного бруса с вертикальными Н-образными коннекторами; 5, 6 – фрагмент стены из профилированного утепленного бруса с повышенной прочностью с вертикальными Н-образными коннекторами и центральной ламелью; 1, 3, 5 – $\tau = 5$ ч; 2, 4, 6 – $\tau = 100$ ч

На рис. 4 показаны зависимости тепловых потоков через внутреннюю и наружную поверхности клееного бруса от времени. При достижении стацио-

нарного режима теплопередачи наиболее высокий тепловой поток устанавливается в стене, выполненной из профилированного утепленного бруса с вертикальными Н-образными коннекторами (рис. 4, линии 3, 4), а минимальные значения тепловых потоков характерны для профилированного утепленного бруса с повышенной прочностью с вертикальными Н-образными коннекторами и центральной ламелью (рис. 4, линии 5, 6). Наибольшее время выхода на стационарный режим $\tau_c = 75$ ч имеет процесс теплопередачи через стену из профилированного утепленного бруса с повышенной прочностью (см. рис. 1, в), а конструкциям, представленным на рис. 1, а, б, соответствуют $\tau_c = 20$ ч и $\tau_c = 45$ ч.

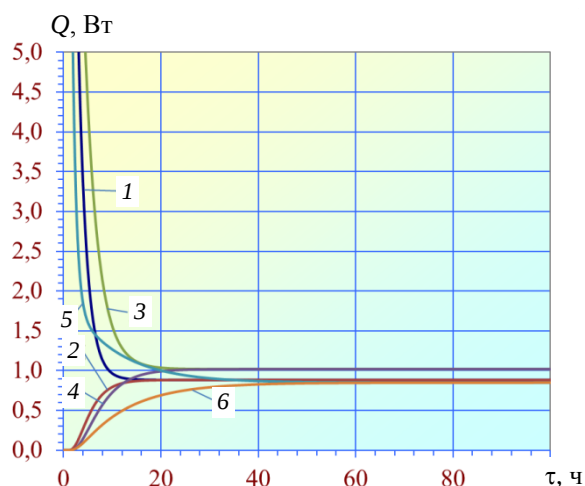


Рис. 4. Тепловые потоки через наружную (1, 3, 5) и внутреннюю (2, 4, 6) поверхности клееного бруса с коннекторами из фанеры в зависимости от времени: 1, 2 – стена из утепленного бруса с горизонтальными коннекторами; 3, 4 – стена из профилированного утепленного бруса с вертикальными Н-образными коннекторами; 5, 6 – фрагмент стены из профилированного утепленного бруса с повышенной прочностью с вертикальными Н-образными коннекторами и центральной ламелью

На рис. 5 представлены зависимости температуры и плотности теплового потока на границе внутреннего слоя бруса с утеплителем от расстояния до оси коннекторов. В условиях стационарного теплообмена зона влияния, обуславливающая отличие тепловых режимов в областях с коннекторами от режимов на однородных участках бруса, для всех конструкций клееного утепленного бруса с Н-образными вертикальными коннекторами и внутренней центральной ламелью не превышает как по высоте, так и по ширине 0,15 м. Однако при нестационарном режиме теплопередачи, например при $\tau = 5$ ч, влияние вертикальных коннекторов в направлении вдоль оси z проявляется на расстоянии 0,2 м от оси коннектора, а зона влияния горизонтальных коннекторов в направлении оси y также достигает размера 0,2 м.

Тепловые стационарные потоки через выбранный расчетный фрагмент с площадью сечения $0,0675 \text{ м}^2$, определенные по результатам расчета температурных полей, составляют: $Q_{\text{вкл}} = 0,849 \text{ Вт}$ – для утепленного бруса с повышен-

ной прочностью с Н-образными вертикальными коннекторами и центральной ламелью, $Q_{ГК} = 0,883$ Вт – для бруса с плоскими горизонтальными коннекторами, $Q_{ВК} = 1,018$ Вт – для бруса с вертикальными коннекторами. Соответствующие значения термических сопротивлений и коэффициентов теплотехнической однородности: $R_{ВКЛ} = 4,69$ м²·К/Вт, $r_{ВКЛ} = 0,51$; $R_{ГК} = 4,51$ м²·К/Вт, $r_{ГК} = 0,46$; $R_{ВК} = 3,91$ м²·К/Вт, $r_{ВК} = 0,38$.

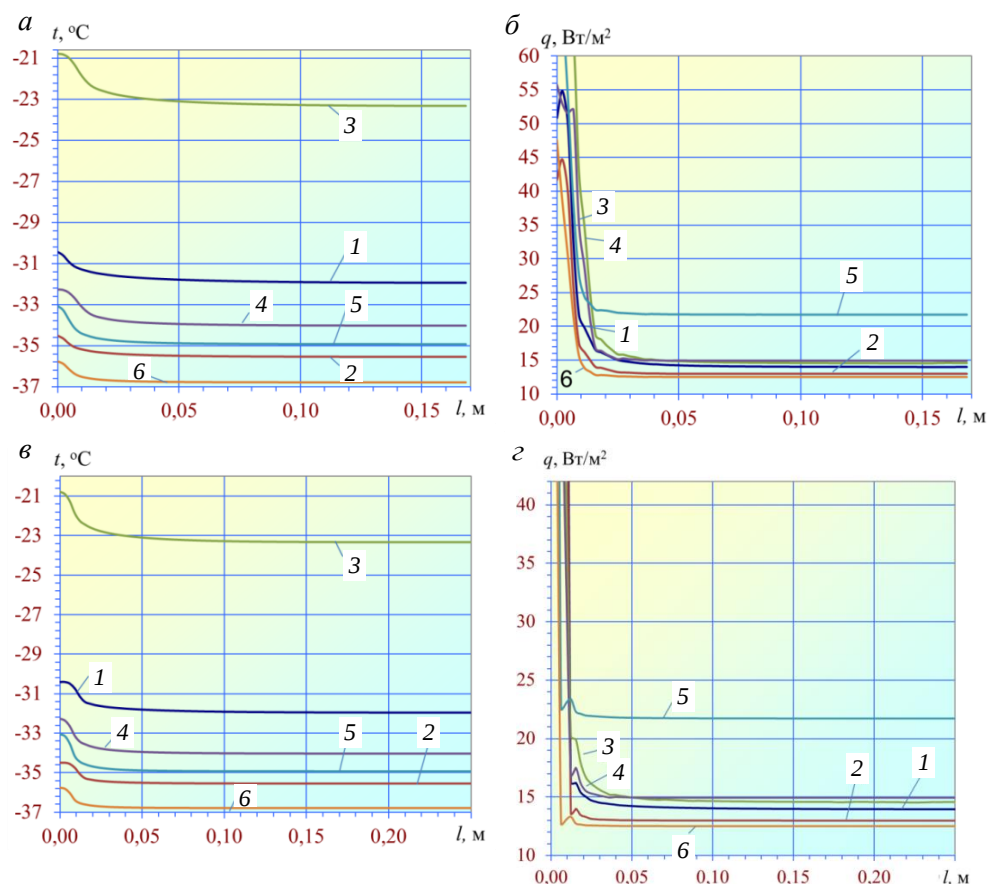


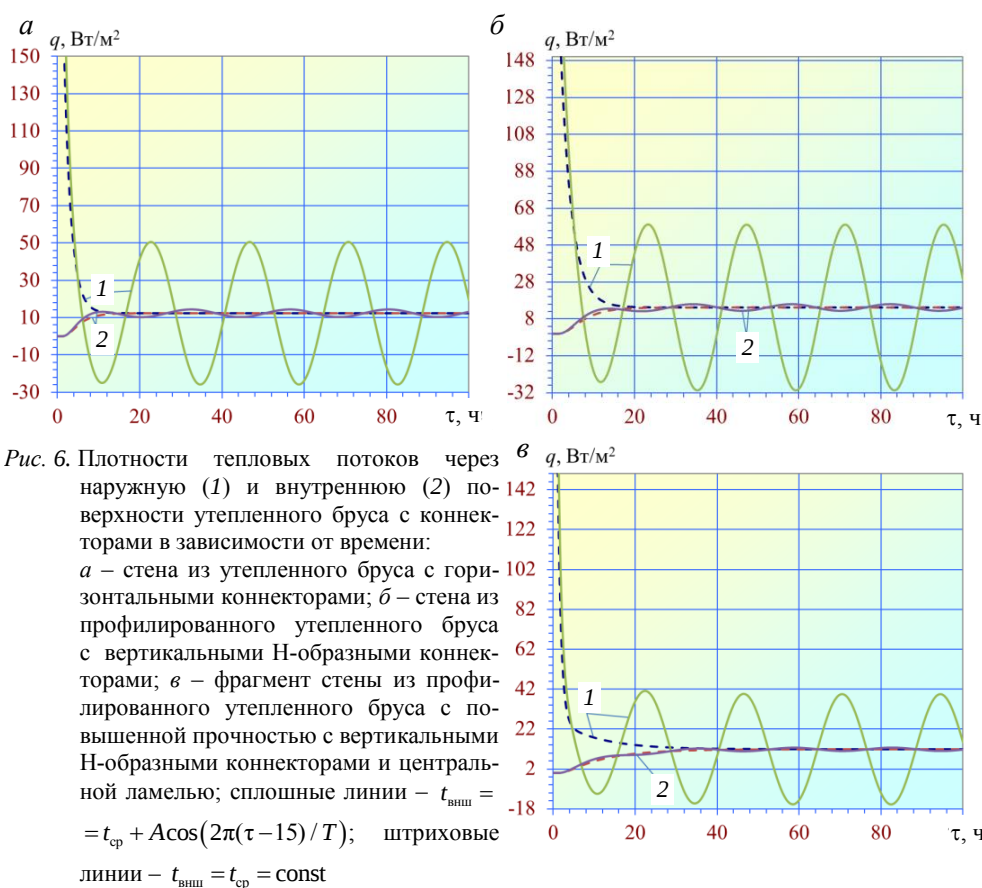
Рис. 5. Зависимости температуры (а, в) и плотности теплового потока (б, г) на границе внутреннего слоя бруса и утеплителя в вертикальной (а, б) и горизонтальной (в, г) и плоскости симметрии коннектора от расстояния l до оси коннекторов: 1, 2 – стена из утепленного бруса с горизонтальными коннекторами; 3, 4 – стена из профилированного утепленного бруса с вертикальными Н-образными коннекторами; 5, 6 – фрагмент стены из профилированного утепленного бруса с повышенной прочностью с вертикальными Н-образными коннекторами и центральной ламелью; 1, 3, 5 – $\tau = 5$ ч; 2, 4, 6 – $\tau = 100$ ч

Для сравнения степени теплоустойчивости рассматриваемых ограждающих конструкций утепленного профилированного бруса были проведены расчеты нестационарных тепловых режимов в случае циклического изменения температуры наружного воздуха:

$$t_{\text{внш}} = t_{\text{ср}} + A \cos(2\pi(\tau - 15)/T), \quad (6)$$

где $t_{\text{ср}}$ – средняя температура наружного воздуха за период T ($-19,1$ °С для января в г. Томске); A – амплитуда колебаний температуры ($8,7$ °С); T – период (24 ч). В соотношении (6) максимум температуры соответствует времени 15.00, минимум – 3.00, в соответствии с данными для г. Томска.

Рис. 6 показывает влияние колебаний температуры наружного воздуха по закону (6) на плотности тепловых потоков через наружную и внутреннюю поверхности клееного утепленного бруса с коннекторами. Из рисунка видно, что на наружной поверхности утепленной брусчатой стены наблюдается периодическое изменение плотности теплового потока с амплитудой, примерно равной 76, 74 и 56 Вт/м² для бруса с горизонтальными коннекторами, с вертикальными Н-образными коннекторами и при наличии внутренней продольной ламели соответственно.



Цикличность изменения температуры наружного воздуха оказывает слабое влияние на плотность теплового потока через внутреннюю поверхность стены, что особенно заметно для утепленного бруса с Н-образными коннекторами и внутренней продольной ламелью. Кроме того, плотность теп-

лового потока на наружной поверхности бруса с внутренней ламелью изменяется с наименьшей амплитудой. Таким образом, согласно положениям [11] и ГОСТ 32494–2013 «Здания и сооружения. Метод математического моделирования температурно-влажностного режима ограждающих конструкций», эта конструкция утепленного клееного бруса обладает наилучшей теплоустойчивостью из всех рассмотренных (см. рис. 1).

Выводы

1. Использование Н-образных вертикальных коннекторов не приводит к существенному снижению температуры в расчетном фрагменте брусовой стены.

2. При изменении температуры внешней среды температура на наружной поверхности брусовой стены быстро падает и становится близкой к температуре наружного воздуха в течение промежутка времени продолжительностью около 5 ч, температура на внутренней поверхности стены понижается незначительно на 1–2 °С относительно температуры внутри помещения.

3. Наличие дополнительной внутренней ламели не вызывает существенного снижения температуры на внутренней поверхности бруса.

4. При использовании дополнительной внутренней ламели наблюдается небольшое снижение температуры на границе наружного слоя бруса с утеплителем, а на границе внутреннего слоя бруса и утеплителя температура, напротив, повышается, что говорит о преимуществе в теплозащитных свойствах бруса повышенной прочности по сравнению с другими рассмотренными конструкциями.

5. При достижении стационарного режима теплопередачи наиболее высокий тепловой поток наблюдается в расчетном фрагменте утепленного бруса с вертикальными Н-образными коннекторами (без внутренней продольной ламели).

6. Н-образные коннекторы из фанеры в конструкции с дополнительной внутренней ламелью создают наименьшую зону влияния на распределение температур и плотностей тепловых потоков на внутренней поверхности наружных стен из клееного профилированного бруса, что позволяет создавать ограждения с высокими теплозащитными свойствами при их максимальных прочностных характеристиках.

7. Приведенное сопротивление теплопередаче стеновой конструкции из клееного профилированного бруса с повышенной прочностью с Н-образными коннекторами из фанеры при использовании сосновых ламелей и утеплителя с теплопроводностью 0,033 Вт/(м·К), вычисленное на основе расчета температурных полей, составляет 4,69 м²·К/Вт, что превосходит аналогичную величину для бруса с горизонтальными плоскими коннекторами на 4 %.

8. Утепленный клееный брус с Н-образными коннекторами и внутренней продольной ламелью обладает наилучшей теплоустойчивостью по сравнению с остальными рассмотренными конструкциями.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых конструкций утепленного бруса с вертикальным и горизонтальным креплением ламелей, предназначенных для создания энергоэффективных наружных ограждающих конструкций в деревянном домостроении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Деревянное домостроение* / под общ. ред. А.Г. Черных. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 343 с.
2. Черненко О.И., Исаев С.П. Влияние климатических условий региона на формирование толщины стены из клееного бруса // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2016. № 46. С. 168–170.
3. Зайцева К.В. Исследование теплопроводности клееного бруса с учетом его конструктивного исполнения // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2008. Т. 2. С. 97–100.
4. Кузин А.Я., Мирошниченко Т.А., Цветков Д.Н. и др. Исследование влажностного состояния наружной деревянной брусчатой стены // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2007. № 2. С. 186–194.
5. Жуков А.В., Кузин А.Я., Мирошниченко Т.А. и др. Математическое моделирование тепло- и влагопереноса в наружных деревянных ограждающих конструкциях // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 1. С. 8–15.
6. Цветков Н.А. Опыт разработки и внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий кафедры «Теплогазоснабжение» Томского государственного архитектурно-строительного университета (технология деревянного домостроения); Технополис Югры. 2015. № 4. С. 42–49.
7. Цветков Д.Н. Теплотехническое обоснование наружных ограждений зданий из клееных деревянных энергоэффективных сортиментов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2. С. 81–90.
8. Цветков Н.А. Повышение эксплуатационных свойств клееного профилированного бруса с утеплителем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2. С. 163–169.
9. Козлобродов А.Н., Цветков Д.Н. Пространственный теплоперенос в стене малоэтажного здания из профилированного утепленного бруса с коннекторами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 3. С. 298–307.
10. Артеменко И.Ю., Хуторной А.Н., Толстых А.В. Оценка теплозащитных характеристик стен из профилированного теплового бруса с повышенной прочностью // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы (МНТ-2016): материалы III Международной научной конференции студентов и молодых ученых. Томск: Томский архитектурно-строительный университет, 2016. С. 465–472.
11. *Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий*. М.: Стройиздат, 1984. 168 с.

REFERENCES

1. Chernykh A.G. (Ed.) *Derevyannoe domostroenie* [Wooden house building]. St.-Petersburg: SPbGLTA Publ., 2008. 343 p. (rus)
2. Chernenko O.I., Isaev S.P. Vliyanie klimaticheskikh uslovii regiona na formirovanie tolshchiny steny iz kleenogo brusa [Regional climatic conditions effect on wall thickness made of laminated beam]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2016. No. 46. Pp. 168–170. (rus)
3. Zaitseva K.V. Issledovanie teploprovodnosti kleenogo brusa s uchedom ego konstruktivnogo ispolneniya [Design-driven heat conductivity of laminated beam]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2008. V. 2. Pp. 97–100. (rus)
4. Kuzin A.Ya., Miroshnichenko T.A., Tsvetkov D.N., Filyushina M.S. Issledovanie vlazhnostnogo sostoyaniya naruzhnoi derevyannoi bruschatoi steny [Humid state of exterior wooden squared-beam wall]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007. No. 2. Pp. 186–194. (rus)
5. Zhukov A.V., Kuzin A.Ya., Miroshnichenko T.A., Tsvetkov D.N., Filyushina M.S. Matematicheskoe modelirovanie teplo- i vlagoperenosa v naruzhnykh derevyannykh ograzhdayushchikh konstruktivnykh [Mathematical simulation of heat and moisture transfer in external wooden enclosing structures]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2007. No. 1. Pp. 8–15. (rus)
6. Tsvetkov N.A. Opyt razrabotki i vnedreniya energo- i resursosbere-gayushchikh tekhnologii kafedry 'Teplogazosnabzhenie' Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta (tekhnologiya derevyannogo domostroeniya) [Development and implementation of

- energy- and resource-saving technologies at Heat and Gas Supply Department of Tomsk State University of Architecture and Building (wooden house building technology)]. *Tekhnopolis Yugry*. 2015. No 4, Pp. 42 – 49. (rus)
7. Tsvetkov D.N. Teplo tekhnicheskoe obosnovanie naruzhnykh ograzhdenii zdaniy iz kleennykh derevyannykh energoeffektivnykh sortimentov [Thermotechnical grounds for external walling made of energy-efficient wooden laminated beams]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 2. Pp. 81–90. (rus)
 8. Tsvetkov N.A. Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv kleenogo profilirovannogo brusa s uteplytelem [Performance improvement of heat-insulating profiled beams]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 2. Pp. 163–169. (rus)
 9. Kozlobrodov A.N., Tsvetkov D.N. Prostranstvennyi teploperenos v stene maloetazhnogo zdaniya iz profilirovannogo uteplennogo brusa s konnektorami [Spatial heat transfer in low-rise building wall made of heat-insulating profiled beams with connectors]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 3. Pp. 298–307. (rus)
 10. Artemenko I.Yu., Khutornoi A.N., Tolstykh A.V. Otsenka teplozashchitnykh kharakteristik sten iz profilirovannogo teplovogo brusa s povyshennoi prochnost'yu [Heat-insulating properties of walls made of profiled beams with increased strength]. *Materialy III Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh 'Molodezh', nauka, tekhnologii: novye idei i perspektivy'*. (Proc. 1st Int. Sci. Conf. 'Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects'). Tomsk: TSUAB Publ., 2016. Pp. 465–472. (rus)
 11. *Rukovodstvo po raschetu vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruksii zdaniy* [Guidelines for calculating the moisture conditions of building envelopes]. Moscow: Stroiizdat Publ., 1984. 168 p. (rus)

Сведения об авторах

Цветков Николай Александрович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, площадь Соляная, 2, nac.tsuab@yandex.ru

Хуторной Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, площадь Соляная, 2, khantgs@mail.ru

Толстых Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, площадь Соляная, 2, sinvintie@rambler.ru

Дорошенко Юлия Николаевна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, площадь Соляная, 2, kafotopvent1@rambler.ru

Authors Details

Nikolai A. Tsvetkov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, nac.tsuab@yandex.ru

Andrei N. Khutornoi, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, khantgs@mail.ru

Aleksandr V. Tolstykh, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, sinvintie@rambler.ru

Yuliya N. Doroshenko, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kafotopvent1@rambler.ru