

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 2. С. 157–170.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (2): 157–170.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 536:21:674.038:699.86

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-157-170

EDN: NPQPJX

ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ПРОФИЛИРОВАННОГО ДЕРЕВЯННОГО БРУСА С ТОРФОВЕРМИКУЛИТОВЫМ УТЕПЛИТЕЛЕМ

Николай Александрович Цветков¹, Александр Витальевич Толстых¹,
Наталья Олеговна Копаница¹, Дмитрий Николаевич Цветков²,
Юлия Николаевна Дорошенко¹, Динара Сергеевна Горкольева¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

²Томский Губернаторский колледж культуры и искусств, г. Томск, Россия

Аннотация. Актуальность. На сегодняшний день все более важным становится использование экологически чистых материалов. Возведение энергосберегающих зданий с ограждающими конструкциями из утепленного профилированного бруса является одним из наиболее перспективных направлений в малоэтажном строительстве.

К материалам, оказывающим минимальное негативное воздействие на окружающую среду в течение всего периода эксплуатации, относятся новые строительные утеплители, созданные на основе торфOVERМИКУЛИТОВЫХ гранул.

Цель работы – исследование основных теплофизических характеристик деревянных наружных стен из профилированного бруса, в которых в качестве утеплителя используется торфOVERМИКУЛИТОВЫЙ материал, коэффициент теплопроводности которого может изменяться в диапазоне от 0,05 до 0,06 Вт/(м·К). Для этого было проведено численное моделирование тепломассопереноса в деревянных ограждающих конструкциях, выполненных из утепленного бруса с тремя различными вариантами коннекторов.

В результате моделирования стационарных процессов теплопроводности в брусевых конструкциях получены данные по пространственному распределению температур и потоков тепла. Показано, что использование фанерных коннекторов практически не влияет на распределение температуры по толщине деревянных стен с торфOVERМИКУЛИТОВОЙ изоляцией. Увеличение теплопроводности изоляции (в пределах типичного диапазона значений для торфOVERМИКУЛИТОВОГО материала) не оказывает заметного влияния на перепад температур вдоль оси коннектора или за пределами зоны его температурного влияния.

Выводы. Установлено, что толщина торфOVERМИКУЛИТОВОГО слоя утеплителя должна составлять не менее 0,176 м, чтобы обеспечить соблюдение основных требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций в климатических условиях г. Томска. Наибольшие теплотери при минимальной толщине утеплителя будут в стене из профилированного утепленного бруса с Т-образным креплением коннекторов. Высокопрочный брус с дополнительной центральной ламелью обладает наилучшими теплозащитными характеристиками при минимально возможной толщине утеплителя.

Ключевые слова: торфOVERМИКУЛИТОВЫЙ утеплитель, утепленный профилированный брус, деревянные ламели, коннекторы из фанеры, теплотеренос, теп-

лопроводность, тепловой поток, плотность теплового потока, сопротивление теплопередаче, минимальная толщина слоя утеплителя

Финансирование. Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0003.

Для цитирования: Цветков Н.А., Толстых А.В., Копаница Н.О., Цветков Д.Н., Дорошенко Ю.Н., Горколыцева Д.С. Теплозащитные свойства профилированного деревянного бруса с торфовермикулитовым утеплителем // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 157–170. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-157-170. EDN: NPQPJX

ORIGINAL ARTICLE

THERMAL PROTECTION PROPERTIES OF PROFILED TIMBER WITH PEAT-VERMICULITE INSULATION

Nikolai A. Tsvetkov¹, Aleksandr V. Tolstykh¹, Natalia O. Kopanitsa¹, Dmitry N. Tsvetkov², Yuliya N. Doroshenko¹, Dinara S. Gorkoltseva¹

¹*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

²*Tomsk Governor's College of Culture and Arts, Tomsk, Russia*

Abstract. Today, the use of environmentally friendly materials is becoming increasingly important. The construction of energy-saving buildings with enclosing structures made of insulated profiled timber, is one of the most promising areas in low-rise construction.

Materials having minimum negative impact on the environment during their operation, include new construction insulation materials based on peat-vermiculite granules. The paper studies the main physical properties of wooden exterior walls made of profiled timber, in which peat vermiculite is used as insulation, thermal conductivity of which ranges from 0.05 to 0.06 W/(m·K). For this purpose, numerical simulation is performed for the heat-mass transfer in wooden enclosing structures made of insulated timber with three different connector options.

The temperature and heat flow distributions are obtained as a result of modeling stationary thermal conductivity processes in timber structures. It is shown that plywood connectors do not affect the thickness temperature distribution in wooden walls with peat-vermiculite insulation. An increase in thermal conductivity of insulation has no significant effect on the temperature difference along the connector axis or outside the region of its temperature influence.

It is found that the thickness of the peat-vermiculite insulation layer should be at least 0.176 m to ensure the compliance with the main requirements for thermal protection properties of enclosing structures in the climatic conditions of Tomsk. The greatest heat loss with a minimum insulation thickness is observed for the wall made of profiled insulated timber with T-shaped connectors. A high-strength timber with the additional central lamella has the best thermal protection with the lowest insulation thickness.

Keywords: peat-vermiculite insulation, insulated profiled timber, wooden slats, plywood connectors, heat transfer, thermal conductivity, heat flux, heat transfer resistance, thickness

Funding. This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FEMN-2022-0003).

For citation: Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Kopanitsa N.O., Tsvetkov D.N., Doroshenko Yu.N., Gorkoltseva D.S. Thermal protection properties of profiled timber with peat-vermiculite insulation. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 157–170. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-157-170. EDN: NPQPJX

Введение

В настоящее время возрастает важность использования экологически чистых материалов для улучшения здоровья и благосостояния людей, получения доступной и экологически чистой энергии, смягчения последствий изменения климата, защиты лесов и других экосистем [1]. Внедряя экологически чистые материалы в промышленности и строительстве, можно добиться устойчивого индустриального развития без ухудшения состояния окружающей среды [2].

Наиболее перспективным решением в малоэтажном строительстве является применение энергосберегающих конструкций на основе клееного бруса [3, 4]. Подобные ограждающие конструкции обеспечивают высокую энергоэффективность двухэтажных домов даже в экстремальных климатических условиях [5]. Использование утепленного бруса приводит к уменьшению расхода материальных и финансовых ресурсов при строительстве и эксплуатации деревянных домов [6]. В работе [7] отмечено, что ограждающие конструкции на основе клееного утепленного бруса наиболее экономически выгодны.

При долгосрочной эксплуатации конструкций из утепленного бруса для предотвращения проблем, связанных с эксплуатационной надежностью, необходимо с помощью натурного или компьютерного моделирования тепло- и влагопереноса прогнозировать изменение теплозащитных свойств утеплителя, связанное, например, с накоплением влаги [8]. В работе [9] с использованием новой физико-математической модели были рассчитаны потоки тепла и влаги в неоднородных фрагментах брусковых стен, в которых в качестве утеплителя применялся пенополистирол. Краткосрочные оценки по накоплению влаги в аналогичных брусковых конструкциях с коннекторами даны в статье [10]. Исследование тепловлагопереноса в сложносоставных конструкциях с деревянными элементами также весьма актуально в настоящее время. Авторы работ [11, 12] рассматривают тепловые и влажностные режимы в частично изолированных деревянных частях зданий с целью оценки их влияния на надежность этих конструкций.

Следует отметить, что все большее значение приобретают так называемые устойчивые, или экологически безвредные, материалы, которые оказывают минимальное негативное воздействие на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла. К таким материалам можно отнести, например, льняные строительные утеплители, обладающие экологичностью и хорошими теплоизоляционными свойствами [13]. Другой, не менее экологичный материал, позволяющий использовать ресурсы Сибирского региона [14] при производстве строительных утеплителей, – это торфовермикулитовые гранулы. Торфовермикулитовые материалы обладают не только хорошими теплозащитными и антисептическими свойствами, но и невысокой стоимостью [15]. Целью настоящей работы является исследование теплозащитных свойств наружных стен малоэтажных зданий, выполненных из утепленного бруса с коннекторами, в котором используется торфовермикулитовый утеплитель.

Увеличение энергоэффективности наружных ограждений зданий и сооружений может привести не только к экономному потреблению теплоэнерге-

тических ресурсов, но и к повышению уровня комфорта в помещениях. В российской энергетике с последствиями неэффективного использования энергоресурсов сталкиваются ежедневно. Основные тепловые потери происходят из-за изношенности тепловых сетей, отсутствия современного оборудования, способного автоматизировать подачу тепловой энергии, и устаревших конструктивных материалов ограждающих конструкций [4].

Материалы и методы исследования

Тепломассоперенос моделировался в характерных фрагментах брусковых стен (рис. 1), размеры которых первоначально были приняты $0,225 \times 0,3 \times 0,23$ м. Подробно основные размеры и геометрические характеристики расчетных фрагментов брусковых стен представлены в работе [16].

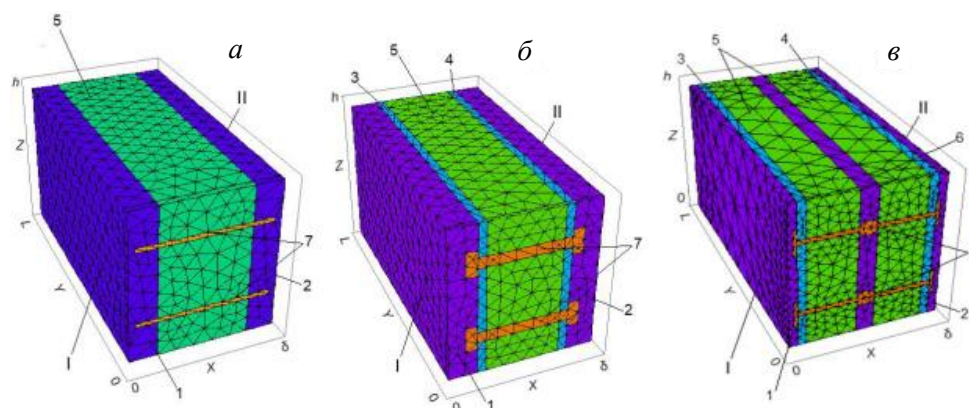


Рис. 1. Схемы конструкций утепленного профилированного бруса:

a – брус с простыми коннекторами; *б* – брус с Т-образным креплением коннекторов; *в* – брус с дополнительной внутренней ламелью; 1, 2 – наружная деревянная ламель; 3, 4 – фанерная прокладка; 5 – утеплитель; 6 – дополнительная внутренняя ламель; 7 – коннектор; I – поверхность контакта с наружным воздухом; II – поверхность контакта с внутренним воздухом; *h*, *l*, *δ* – размеры фрагмента бруса вдоль координат *z*, *x*, *y* соответственно

Fig. 1. FEM of insulated profiled timber:

a – simple connectors; *b* – T-shaped mounting of connectors; *c* – additional internal lamella; 1, 2 – outer wooden lamella; 3, 4 – plywood pad; 5 – insulation; 6 – additional inner lamella; 7 – connector; I – external air contact surface; II – internal air contact surface; *h*, *l*, *δ* – beam fragment dimensions along *z*, *x*, *y* coordinates

Для утепления брусковых стен предполагается использовать торфовермикулитовый материал, коэффициент теплопроводности которого может изменяться в диапазоне от 0,05 до 0,06 Вт/(м·К). Суммарная толщина слоев торфовермикулитового утеплителя принималась 0,11–0,187 м (в базовом варианте расчета).

Температура внутреннего воздуха со стороны поверхности II (рис. 1) составляет +20 °С, температура наружного воздуха со стороны плоскости I (рис. 1) составляет –39 °С (расчетная температура для г. Томска). Коэффициент теплопередачи составляет 23 Вт/(м²·К) на поверхности I и 8,7 Вт/(м²·К) на поверхности II.

Для определения температурных режимов при эксплуатации ограждений из утепленного бруса повышенной прочности с торфовермикулитовым утеплителем были рассчитаны трехмерные стационарные температурные поля. Была численно решена сопряженная задача [16], включающая несколько стационарных трехмерных уравнений теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями.

Результаты исследования

Первый вариант расчета выполнялся при одинаковой толщине брусковых стен 0,23 м для всех рассматриваемых конструкций (рис. 1).

Температурные режимы в расчетных фрагментах различных конструкций бруса можно охарактеризовать графиками, представленными на рис. 2.

На рис. 2 показано распределение температуры t (по толщине стены) на оси коннектора (линия 1) и вне зоны его влияния в вертикальной (линия 2) и горизонтальной (линия 3) плоскостях, которые проходят через ось коннектора (при теплопроводности утеплителя 0,055 Вт/(м·К)).

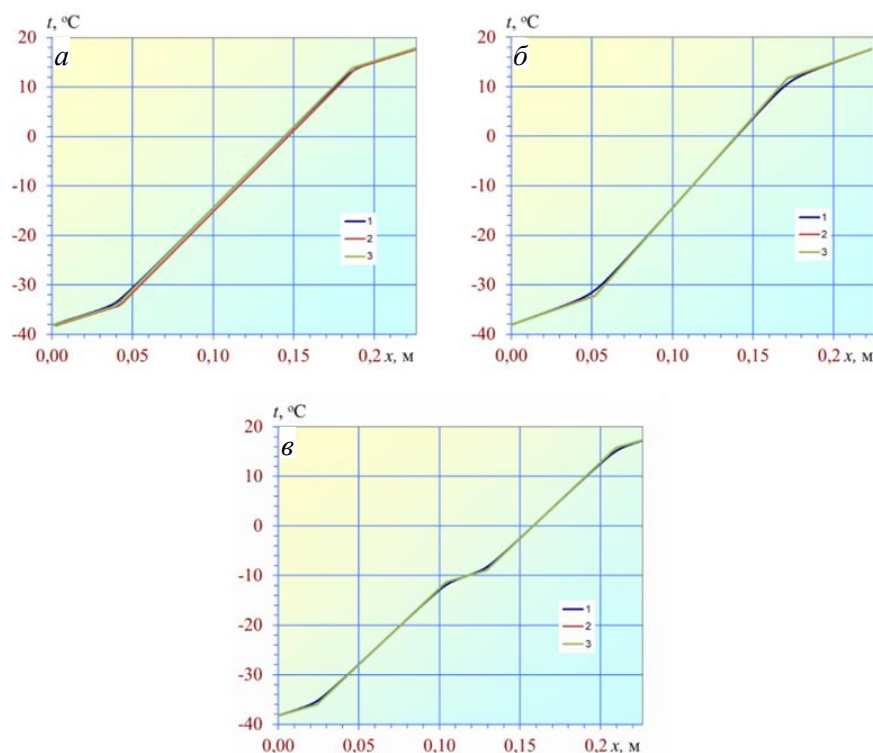


Рис. 2. Распределение температуры по толщине брусковой стены:

a – брус с простыми коннекторами; *б* – брус с Т-образным креплением коннекторов; *в* – брус с дополнительной внутренней ламелью

Fig. 2. Thickness temperature distribution in timber wall:

a – simple connectors; *b* – T-shaped mounting connectors; *c* – additional inner lamella

Из данных рис. 2 следует, что добавление в конструкцию коннектора из фанеры не приводит к существенному изменению распределения температуры

по толщине брусовой стенки. Например, температура на внутренней поверхности стен, средняя для трех рассмотренных конструкций утепленного бруса, при $z = 3h/4$, $y = 0,25$ (вне зоны влияния коннектора, линия 3) составляет $17,84^\circ\text{C}$. В тех же условиях для точки, расположенной на пересечении оси коннектора (линия 1) с внутренней поверхностью стены, температура – $17,82^\circ\text{C}$.

Температурные профили для всех выбранных зон контроля, показанные на рис. 2, отличаются весьма незначительно. Максимальное отличие температур, осредненное для всех рассмотренных конструкций брусовой стены, на оси коннектора и в зонах, где влияние коннектора отсутствует, не превышает 9 %. Температурный профиль в брус с внутренней продольной ламелью имеет два дополнительных излома в местах контакта этой ламели со слоями утеплителя.

Зависимость плотности теплового потока от координаты x на оси симметрии коннектора в конструкции с внутренней продольной ламелью (рис. 3, в) имеет максимумы, которые расположены по центру двух слоев утеплителя, контактирующих с внутренней и наружными ламелями. В других конструкциях бруса (рис. 3, а, б) максимум теплового потока находится в центральном сечении стены.

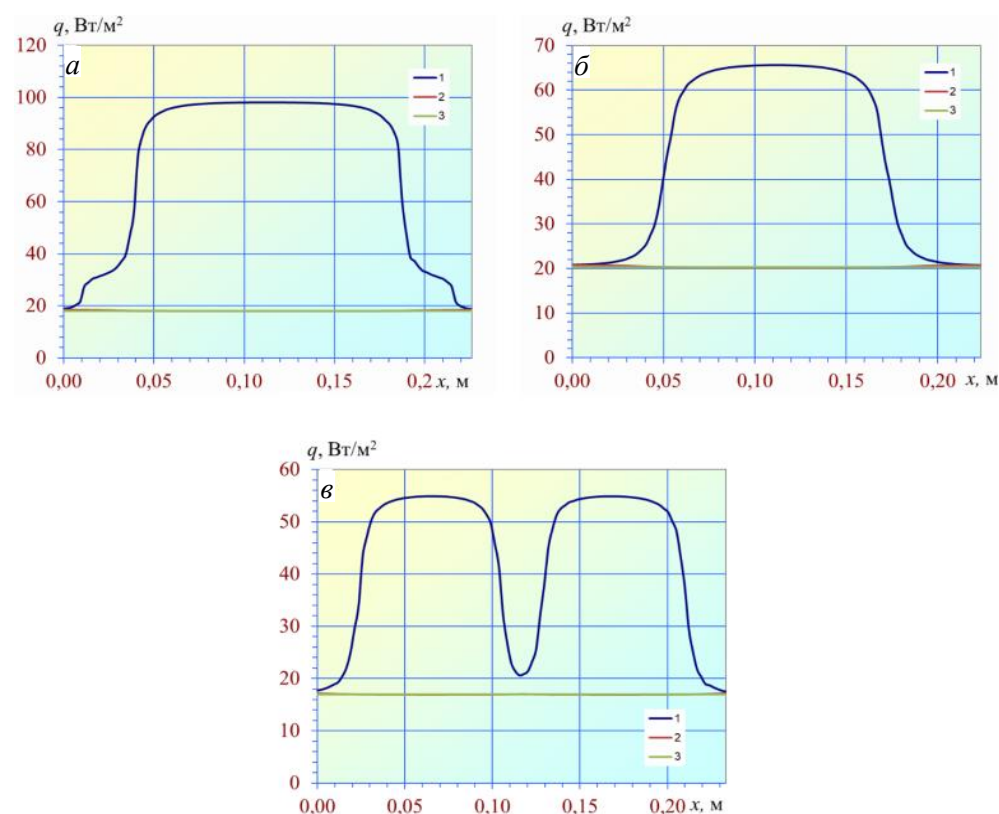


Рис. 3. Распределение плотностей теплового потока по толщине брусовой стены:
а – брус с простыми коннекторами; б – брус с Т-образным креплением коннекторов; в – брус с дополнительной внутренней ламелью

Fig. 3. Heat flux distribution along timber wall thickness:
а – simple connectors; б – T-shaped mounting connectors; в – additional inner lamella

Распределение абсолютной величины плотности теплового потока на оси коннектора (линия 1) по координате x и в зонах, удаленных от оси коннектора (линии 2, 3), представленное на рис. 3, показывает, что значения плотностей тепловых потоков на внутренней и наружной поверхностях для всех рассмотренных конструкций бруса (рис. 1) практически одинаковы как в точках присоединения коннекторов (линия 1), так и вне зоны их влияния (линии 2, 3). Однако эти же величины несколько отличаются для трех различных конструкций утепленного бруса (рис. 1): 18,72; 20,75 и 17,48 Вт/м² соответственно. Наибольшая интенсивность теплопередачи наблюдается в брус с Т-образным креплением коннекторов (рис. 1, б), при этом удельный тепловой поток на внутренней и наружной поверхностях стены составляет 20,75 Вт/м². Наименьший тепловой поток на этих же поверхностях в точках на оси коннектора будет в конструкции стены с дополнительной внутренней продольной ламелью (рис. 1, в) – 17,48 Вт/м².

Исходя из результатов расчета температурных полей (при теплопроводности торфовермикулитовой изоляции 0,055 Вт/(м·К)), были получены следующие значения тепловых (интегральных) потоков по поверхности стены: для конструкции с дополнительной внутренней ламелью $Q_{\text{л}} = 1,147$ Вт, в случае использования простых коннекторов $Q_{\text{п}} = 1,226$ Вт и $Q_{\text{т}} = 1,377$ Вт для бруса с Т-образным креплением коннекторов. Приведем рассчитанные по представленным выше тепловым потокам сопротивления теплопередаче (R) и коэффициенты тепловой однородности (r): $R_{\text{л}} = 3,47$ м²·К/Вт, $r_{\text{л}} = 0,464$; $R_{\text{п}} = 3,25$ м²·К/Вт, $r_{\text{п}} = 0,394$; $R_{\text{т}} = 2,89$ м²·К/Вт, $r_{\text{т}} = 0,317$.

В жилых зданиях требуемое (нормируемое) сопротивление теплопередаче наружных стен для г. Томска составляет 3,68 м²·К/Вт. Таким образом, не одна из брусовых конструкций не удовлетворяет основному требованию по тепловой защите зданий. Данный теплотехнический расчет выполнялся для конструкций бруса, которые по своим геометрическим характеристикам сходны с конструкциями бруса, описанными в работе [16]. В исследовании [16] применялся утеплитель с коэффициентом теплопроводности 0,033 Вт/(м·К), а теплопроводность торфовермикулитового утеплителя принималась равной 0,05–0,06 Вт/(м·К). Выполненные расчеты показывают, что при использовании торфовермикулитового утеплителя необходимо увеличить толщину стенки во всех рассматриваемых конструкциях брусовых стен.

Плотность теплового потока (рис. 4) при увеличении толщины утеплителя на 0,05–0,06 м падает по закону, близкому к линейному.

При теплопроводности утеплителя 0,055 Вт/(м·К):

– для бруса с простыми коннекторами – от 18,16 до 14,21 Вт/м²;

– для бруса с Т-образным креплением коннекторов – от 20,4 до 15,56 Вт/м²;

– для бруса с дополнительной внутренней ламелью – от 16,99 до 13,48 Вт/м².

При теплопроводности утеплителя 0,06 Вт/(м·К):

– для бруса с простыми коннекторами – от 19,48 до 14,67 Вт/м²;

– для бруса с Т-образным креплением коннекторов – от 21,75 до 15,91 Вт/м²;

– для бруса с дополнительной внутренней ламелью – от 18,27 до 13,96 Вт/м².

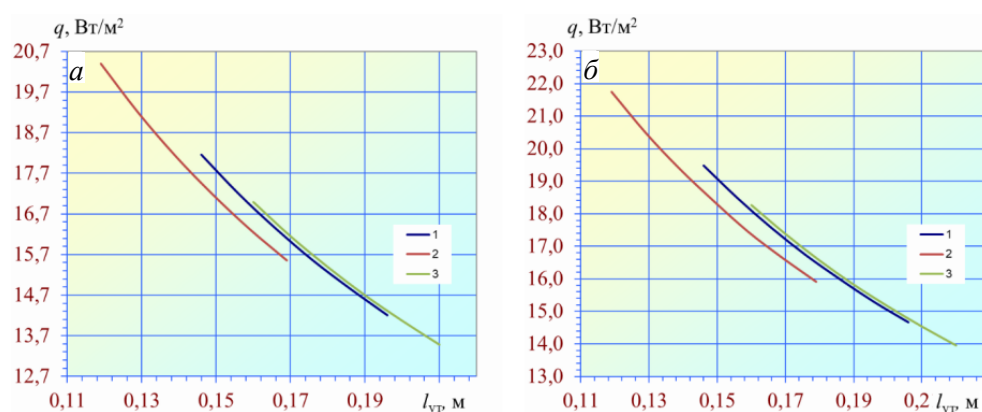


Рис. 4. Плотность теплового потока на внутренней и наружной поверхностях брусковых стен в зависимости от толщины утеплителя:

a – теплопроводность утеплителя – 0,055 Вт/(м·К); *б* – теплопроводность утеплителя – 0,06 Вт/(м·К); 1 – брус с простыми коннекторами; 2 – брус с Т-образным креплением коннекторов; 3 – брус с дополнительной внутренней ламелью

Fig. 4. Heat flux on the inner and outer surfaces of timber walls, depending on insulation thickness at different thermal conductivity:

a – 0.055 W/(m·K); *b* – 0.06 W/(m·K); 1 – simple connectors; 2 – T-shaped mounting connectors; 3 – additional internal lamellae

При сопоставимых толщинах утеплителя наибольшие значения плотности теплового потока (рис. 4, линия 3) на внутренней и наружной поверхностях стены устанавливаются при использовании конструкции с дополнительной внутренней ламелью (см. рис. 1, в).

На рис. 5 показано, как толщина утеплителя влияет на сопротивление брусковых стен теплопередаче. Наибольшие сопротивления теплопередаче при сопоставимых толщинах слоя утеплителя имеет конструкция утепленного бруса с Т-образным креплением коннекторов. Минимальная толщина слоя торфOVERМИКУЛИТОВОГО утеплителя, обеспечивающая требуемое сопротивление теплопередаче (для г. Томска), составляет:

- при теплопроводности утеплителя 0,055 Вт/(м·К):
- для бруса с простыми коннекторами – 0,17 м;
- для бруса с Т-образным креплением коннекторов – 0,164 м;
- для бруса с дополнительной внутренней ламелью – 0,172 м;
- при теплопроводности утеплителя 0,06 Вт/(м·К):
- для бруса с простыми коннекторами – 0,186 м;
- для бруса с Т-образным креплением коннекторов – 0,178 м;
- для бруса с дополнительной внутренней ламелью – 0,188 м.

Расчетом, проведенным при указанных ранее минимальных толщинах слоя утеплителя, установлено, что минимальная температура на внутренней поверхности брусковых стен составляет:

- при теплопроводности утеплителя 0,055 Вт/(м·К):
- для бруса с простыми коннекторами – 18,1 °С;
- для бруса с Т-образным креплением коннекторов – 18,13 °С;
- для бруса с дополнительной внутренней ламелью – 18,1 °С;

- при теплопроводности утеплителя $0,06 \text{ Вт/(м·К)}$:
- для бруса с простыми коннекторами – $18,11 \text{ °C}$;
- для бруса с Т-образным креплением коннекторов – $18,13 \text{ °C}$;
- для бруса с дополнительной внутренней ламелью – $18,12 \text{ °C}$.

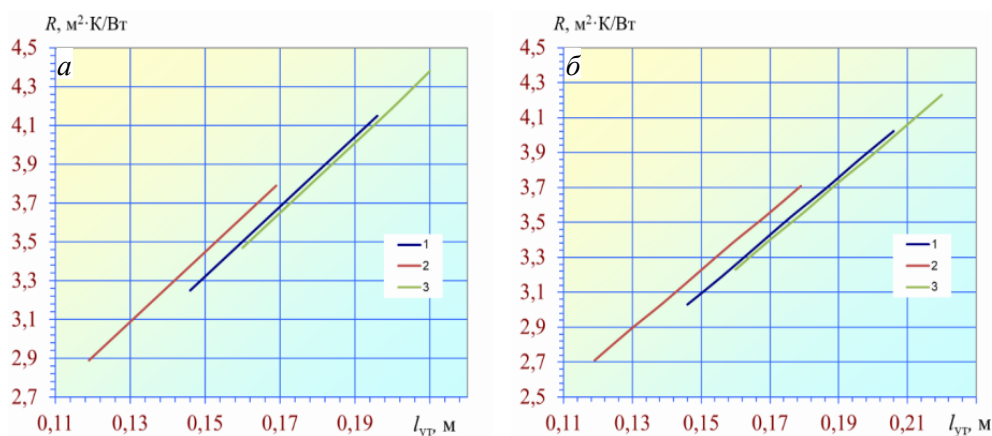


Рис. 5. Сопротивление теплопередаче брусковых стен в зависимости от толщины утеплителя: а – теплопроводность утеплителя – $0,055 \text{ Вт/(м·К)}$; б – теплопроводность утеплителя – $0,06 \text{ Вт/(м·К)}$; 1 – брус с простыми коннекторами; 2 – брус с Т-образным креплением коннекторов; 3 – брус с дополнительной внутренней ламелью

Fig. 5. Heat transfer resistance of timber walls depending on insulation thickness at different thermal conductivity: а – 0.055 W/(m·K) ; б – 0.06 W/(m·K) ; 1 – simple connectors; 2 – T-shaped mounting connectors; 3 – additional internal lamellae

Таким образом, перепад температуры на внутренней поверхности брусковых стен относительно температуры внутреннего воздуха 20 °C не превосходит $1,9 \text{ °C}$, и при полученной минимальной толщине теплоизоляции все рассмотренные брусковые конструкции удовлетворяют требованиям СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» (редакция 2022 г.) о том, что расчетный температурный перепад Δt_0 , °C , между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции не должен превышать нормируемой величины для стен $\Delta t_n = 4 \text{ °C}$.

Рассмотрим далее влияние величины коэффициента теплопроводности торфовермикулитового утеплителя в интервале $0,5\text{--}0,6 \text{ Вт/(м·К)}$ на теплозащитные свойства брусковых стен в условиях г. Томска. Толщину утеплителя будем принимать минимальной, согласно определенным ранее значениям при максимальной теплопроводности утеплителя $0,06 \text{ Вт/(м·К)}$.

Изменение теплопроводности торфовермикулитового утеплителя в интервале $0,05\text{--}0,06 \text{ Вт/(м·К)}$ практически не сказывается на температурных режимах, реализующихся на внутренней поверхности рассмотренных конструкций брусковых стен (рис. 6, а).

Абсолютное изменение минимальной температуры на внутренней поверхности брусковых стен, связанное с увеличением теплопроводности, не превосходит $0,4 \text{ °C}$.

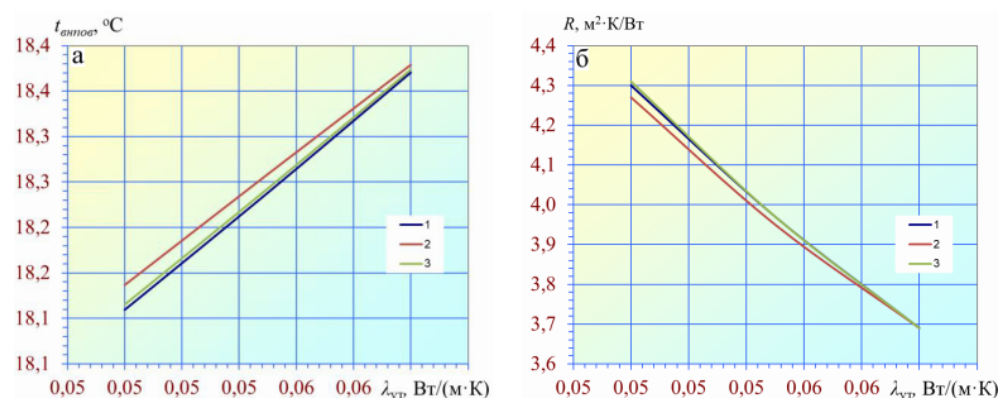


Рис. 6. Минимальная температура на внутренней поверхности брусковых стен и их сопротивления теплопередаче в зависимости от теплопроводности утеплителя (при минимально возможных толщинах утеплителя):

a – температура внутренней поверхности; *б* – сопротивление теплопередаче; 1 – брус с простыми коннекторами; 2 – брус с Т-образным креплением коннекторов; 3 – брус с дополнительной внутренней ламелью

Fig. 6. The minimum temperature on the inner surface of the timber walls and their resistance to heat transfer, depending on the thermal conductivity of the insulation (with the minimum possible thickness of the insulation):

a – temperature of the inner surface; *b* – resistance to heat transfer; 1 – timber with simple connectors; 2 – timber with T-shaped mounting connectors; 3 – timber with additional internal lamellae

С увеличением коэффициента теплопроводности торфовермикулитового утеплителя от 0,05 до 0,06 Вт/(м·К) сопротивление теплопередаче брусковых стен с коннекторами снижается в среднем в 1,16 раза (рис. 6, б). Наилучшими теплозащитными свойствами при минимально возможной толщине утеплителя обладает брусковая стена с дополнительной центральной ламелью (рис. 1, в), а минимальные термические сопротивления теплопередаче будут в стене из профилированного утепленного бруса с Т-образным креплением коннекторов.

Заключение

Таким образом, в результате проведенного моделирования температурных режимов для трех вариантов конструкций клееного профилированного бруса установлено следующее:

- использование фанерных коннекторов практически не оказывает влияния на распределение температуры по толщине брусковых стен с торфовермикулитовым утеплителем;
- добавка дополнительной центральной ламели не приводит к существенному снижению температуры на внутренней поверхности бруса в месте присоединения коннектора;
- величины тепловых потоков на внутренней и наружной поверхностях для всех рассмотренных конструкций бруса практически совпадают в местах присоединения коннекторов и вне зоны их влияния, хотя в центральной области стен (на оси коннекторов) величины тепловых потоков в значительной степени определяются особенностями конструкций коннекторов;

– величины тепловых потоков на внутренней и наружной поверхностях для всех рассмотренных конструкций бруса при одинаковой толщине стен 0,23 м различны: минимальная интенсивность теплопередачи наблюдается для стены с дополнительной внутренней продольной ламелью, а максимальная интенсивность теплопередачи будет в расчетном фрагменте бруса с Т-образным креплением коннекторов;

– при сопоставимых толщинах утеплителя наиболее низкий тепловой поток и, соответственно, наибольшее сопротивление теплопередаче наблюдается в расчетном фрагменте утепленного бруса с Т-образным креплением коннекторов (без внутренней продольной ламели);

– минимальная толщина слоя торфOVERМИКУЛИТОВОГО утеплителя, обеспечивающая выполнение базовых требований к теплозащитным свойствам ограждающих конструкций (в среднем для всех рассмотренных конструкций бруса), составляет 0,176 м;

– при минимальных толщинах слоя утеплителя минимальная температура на внутренней поверхности брусовых стен (в среднем для всех рассмотренных конструкций бруса) составляет 18,12 °С;

– наилучшие теплозащитные характеристики при минимально возможной толщине утеплителя имеет брус повышенной прочности с дополнительной центральной ламелью, а наибольшие теплопотери при этих же условиях будут в стене из профилированного утепленного бруса с Т-образным креплением коннекторов.

Результаты моделирования важны для прогнозирования эксплуатационных характеристик новых конструкций прочного профилированного бруса с торфOVERМИКУЛИТОВОЙ утепляющей вставкой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Saura-Cayuela M., Lara-Torres S., Pacheco-Fernández I., et al. Green materials for greener food sample preparation: A review // *Green Analytical Chemistry*. 2023. V. 4. P. 100053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2023.100053>
2. Kore S.D., Balaji N., Sudarsan J.S. Feasibility study of adopting green materials in construction by stake holder's perception using ANOVA based quantitative analysis technique // *Materials Today: Proceedings*. 2023. V. 92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.335>
3. Копров Д.А., Розанцева Н.В. Полнообъемные клеендеревянные конструкции как альтернативное решение при строительстве промышленных ангаров // *Технология строительного производства : материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции, посвященной 190-летию Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (ЛИСИ – СПбГАСУ), Санкт-Петербург, 28–29 апреля 2022 г. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. С. 151–157.*
4. Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В., Колесникова А.В. Физико-математическая модель теплообмена в ограждающих конструкциях из профилированного теплового бруса // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2017. № 2 (698). С. 12–20.
5. Огородников И.А., Бородин В.Ю., Низовцев М.И. Тепловой баланс дома с воздушным солнечным коллектором и аккумулятором тепла для условий Прибайкалья // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2022. № 12 (768). С. 49–63.
6. Толстикова Е.Д., Арабали Л.А., Зенкова У.В. Оценка возможности экономии энергии в деревянном доме // *Управление экономическими системами. Электронный научный журнал*. 2019. № 10 (128). С. 34–35.

7. Дубровина Ю.Ю., Цыбакин С.В. Техничко-экономическое сравнение вариантов конструкций стен индивидуальных жилых домов // Современная наука: актуальные вопросы и достижения в эпоху трансформационных процессов : сборник статей по материалам 74-й Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Караваево, 26 января 2023 г. Караваево : Костромская государственная сельскохозяйственная академия, 2023. С. 107–113.
8. Алиев С.А. Влагонакопление стеновой конструкции из дерева в десятилетнем цикле // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее : сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института, Красноярск, 19–21 октября 2022 г. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. С. 464–468.
9. Tsvetkov N.A., Tolstykh, A.V.Y., Khutornoi, A.N., et al. Mathematical modelling of renewable construction materials for green energy-efficient buildings at permafrost regions of Russia // Environmental Challenges. 2021. V. 4. P. 100101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100101>
10. Цветков Н.А., Толстых А.В., Цветков Д.Н., Дорошенко Ю.Н. Оценка возможности образования мокрых зон в ограждающих конструкциях из утепленного бруса с коннекторами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 4 (760). С. 87–98. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-760-4-87-98>
11. Wonjun Choi, Ryoza Ooka, Masanori Shukuya. Unsteady-state exergetic performance comparison of externally and internally insulated building envelopes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. V. 163. P. 120414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120414>
12. Xiaohai Zhou, Carmeliet J., Derome D. Assessment of moisture risk of wooden beam embedded in internally insulated masonry walls with 2D and 3D models // Building and Environment. 2021. V. 193. P. 107460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107460>
13. Шевцова М.А., Чернеев А.М., Безрук Г.В. Преимущество использования льняных теплоизоляционных плит в коттеджном строительстве // Перспективы науки. 2020. № 11 (134). С. 267–269.
14. Горколыцева Д.С., Копаница Н.О. ТорфOVERМИКУЛИТОВЫЕ смеси для производства теплоизоляционного гранулированного материала // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 5. С. 93–104.
15. Копаница Н.О., Ковалева М.А. Исследование вяжущих свойств низинных торфов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. Т. 36. № 3. С. 153–158.
16. 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.

REFERENCES

1. Saura-Cayuela M., Lara-Torres S., Pacheco-Fernández I., et al. Green materials for greener food sample preparation: A review. *Green Analytical Chemistry*. 2023; 4: 100053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2023.100053>
2. Kore S.D., Balaji N., Sudarsan J.S. Feasibility study of adopting green materials in construction by stake holder's perception using ANOVA based quantitative analysis technique. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 92: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.335>
3. Kopro D.A., Rozantseva N.V. Fully assembled clad-wood structures as an alternative solution for the construction of industrial hangars. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Technology of Construction Production'*. Saint-Petersburg, 2022. Pp. 151–157. (In Russian)
4. Tsvetkov N.A., Khutornoj A.N., Tolstykh A.V., Kolesnikova A.V. A physical and mathematical model of heat and moisture transfer in enclosing structures made of profiled thermal timber. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2017; 698 (2): 12–20. (In Russian)

5. Ogorodnikov I.A., Borodulin V.Yu., Nizovtsev M.I. Thermal balance of house with air solar collector and heat accumulator in Baikal region conditions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022; 768 (12): 49–63. (In Russian)
6. Tolstikhina E.D., Arabli L.A., Zenkova U.V. Assessment of saving energy in wooden house. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami*. 2019; 128 (10): 34–35. (In Russian)
7. Dubrovina Yu.Yu., Tsybakin S.V. Technical and economic comparison of wall designs of individual residential buildings. In: *Proc. 74th All-Russ. Sci. Conf. 'Modern Science: Current Issues and Achievements in the Era of Transformation Processes'*. Karavaevo: Kostroma State Agricultural Academy. 2023. Pp. 107–113. (In Russian)
8. Aliev S.A. Moisture accumulation of wooden wall structure in a ten-year cycle. In: *Proc. 74th All-Russ. Sci. Conf. 'Current Issues of Construction: Look Into The Future'*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2022. Pp. 464–468. (In Russian)
9. Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V.Y., Khutornoi A.N., et al. Mathematical modelling of renewable construction materials for green energy-efficient buildings at permafrost regions of Russia. *Environmental Challenges*. 2021; 4: 100101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100101>
10. Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Tsvetkov D.N., Doroshenko Yu.N. Wet zone formation in enclosing structures made of insulated timber with connectors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022; 760 (4): 87–98. DOI: <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-760-4-87-98>. (In Russian)
11. Wonjun Choi, Ryoza Ooka, Masanori Shukuya. Unsteady-state exergetic performance comparison of externally and internally insulated building envelopes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020; 163: 120414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120414>
12. Xiaohai Zhou, Carmeliet J., Derome D. Assessment of moisture risk of wooden beam embedded in internally insulated masonry walls with 2D and 3D models. *Building and Environment*. 2021; 193: 107460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107460>
13. Shevtsova M.A., Cherneev A.M., Bezruk G.V. Advantage of linen thermal insulation boards in cottage construction. *Perspektivy nauki*. 2020; 134 (11): 267–269. (In Russian)
14. Gorkoltseva D.S., Kopanitsa N.O. Peat-vermiculite compositions for granulated material production. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (5): 93–104. (In Russian)
15. Kopanitsa N.O., Kovaleva M.A. Investigation of astringent properties of lowland peat. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; 36 (3): 153–158. (In Russian)
16. Tsvetkov N.A., Khutornoi A.N., Tolstykh A.V., Doroshenko Yu.N. 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; 20 (2): 124–136. (In Russian)

Сведения об авторах

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

Толстых Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, tolstbu@yandex.ru

Копаница Наталья Олеговна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kopanitsa@mail.ru

Цветков Дмитрий Николаевич, преподаватель, Томский Губернаторский колледж культуры и искусств, 634009, г. Томск пр. Ленина, 125а, orf@mail.ru

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

Горколыцева Динара Сергеевна, ассистент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, gorkoltsevadina@gmail.com

Authors Details

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

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

Natalia O. Kopanitsa, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kopanitsa@mail.ru

Dmitry N. Tsvetkov, Lecturer, Tomsk Governor's College of Culture and Arts, 125 a, Lenin Ave., 634009, Tomsk, Russia, orf@mail.ru

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

Dinara S. Gorkoltseva, Assistant Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, gorkoltsevadina@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.03.2024
Одобрена после рецензирования 19.03.2024
Принята к публикации 20.03.2024

Submitted for publication 09.03.2024
Approved after review 19.03.2024
Accepted for publication 20.03.2024