
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY

Известия вузов. Строительство. 2022. № 4. С. 87–98.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (4): 87–98.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 69.022: 69.11:699.86:536.24

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-87-98

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МОКРЫХ ЗОН В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ УТЕПЛЕННОГО БРУСА С КОННЕКТОРАМИ

**Николай Александрович Цветков, Александр Витальевич Толстых,
Дмитрий Николаевич Цветков, Юлия Николаевна Дорошенко**
Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск,
Россия

Аннотация. Используется ранее построенная пространственная трехмерная модель тепловлагопереноса в наружных стенах зданий из утепленного бруса повышенной прочности с коннекторами из фанеры. Выполнена оценка влияния процессов влагопереноса на накопление влаги в утепленных брусковых конструкциях, предусматривающих использование коннекторов, при низких температурах наружного воздуха. Представлены результаты численного моделирования тепломассообменных процессов в характерных фрагментах стен из профилированного утепленного бруса. Рассчитаны поля влагосодержания и относительной влажности воздуха в выбранных неоднородных фрагментах. Показано, что максимальное увлажнение в стенах из утепленного профилированного бруса локализовано вблизи внешней поверхности стены. Установлено, что в брусковых конструкциях с внутренней продольной ламелью возможно образование областей с повышенной влажностью вблизи мест крепления коннекторов к ламелям. Результаты расчетов позволяют сделать вывод об отсутствии в выбранном расчетном фрагменте зон, в которых возможно накопление свободной (несвязанной) влаги.

Ключевые слова: утепленный профилированный брус, физико-математическая модель, тепло- и влагоперенос, влагопроводность, паропроницаемость, теплопроводность, сорбция влаги

Благодарности: публикация выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (научная тема FEMN-2022-0003).

Для цитирования: 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 вузов. Строительство. 2022. № 4. С. 87–98. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-87-98.

Original article

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF FORMATION OF WET ZONES IN ENVELOPED STRUCTURES FROM INSULATED BEAM WITH CONNECTORS

**Nikolay A. Tsvetkov, Aleksandr V. Tolstykh, Dmitriy N. Tsvetkov,
Yuliya N. Doroshenko**

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. A previously built spatial three-dimensional model of heat and moisture transfer in the outer walls of buildings made of insulated timber of increased strength with plywood connectors is used. An assessment was made of the influence of moisture transfer processes on the accumulation of moisture in insulated timber structures, involving the use of connectors, at low outdoor temperatures. The results of numerical simulation of heat and mass transfer processes in characteristic fragments of walls made of profiled insulated timber are presented. The fields of moisture content and relative air humidity in the selected heterogeneous fragments are calculated. It is shown that the maximum moisture in the walls of the insulated profiled timber is localized near the outer surface of the wall. It has been established that in timber structures with an internal longitudinal lamella, it is possible to form areas with high humidity near the places where connectors are attached to lamellas. The results of the calculations allow us to conclude that there are no zones in the selected computational fragment in which the accumulation of free (unbound) moisture is possible.

Keywords: insulated profiled timber, physical and mathematical model, heat and moisture transfer, moisture conductivity, vapor permeability, thermal conductivity, moisture sorption

Acknowledgments: the publication was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific topic FEMN-2022-0003).

For citation: Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Tsvetkov D.N., Doroshenko Yu.N. Assessment of the possibility of formation of wet zones in enveloped structures from insulated beam with connectors. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2022; (4): 87–98. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-87-98.

1. Введение. Применение различных конструкций из древесины при возведении зданий связано с ее свойствами, позволяющими использовать этот материал как экологически чистое и возобновляемое сырье при производстве строительных материалов и изделий. Профилированный утепленный брус, имеющий дополнительный слой утеплителя из современных полимерных материалов [1], является более перспективной конструкцией для средней климатической зоны [2] по сравнению с брусом, выполненным только из клееной древесины. Использование утепленного бруса приводит к уменьшению расхода материальных и финансовых ресурсов при строительстве и эксплуатации деревянных домов.

При исследованиях эксплуатационной надежности брусковых стен [3] отмечено, что в прогнозировании долгосрочной эксплуатации конструкций из дерева или для обнаружения текущих проблем необходимо учитывать влагоперенос и возможное накопление влаги в процессе эксплуатации. Исключительно важно понимать причины увлажнения той или иной огражда-

дающей конструкции, так как это явление относится к основным факторам, приводящим к изменению прочностных свойств деревянных элементов ограждающих конструкций [4, 5]. В [6, 7] рассмотрены частично изолированные деревянные части зданий, которые критически оцениваются с точки зрения возможной конденсации влаги. Авторы [8] рассматривают влияние циклически изменяющихся температуры и влажности окружающей среды на поведение деревянных стропильных конструкций с металлическими креплениями, принимая коэффициент влагоотдачи постоянным, не зависящим от температуры и влажности древесины. В работе [9] приведены случаи, когда при резком изменении граничных условий на поверхностях ограждающих конструкций из дерева обнаруживались существенные различия между измеренными и вычисленными значениями характеристик тепло-влажностных режимов.

Таким образом, моделирование комбинированного теплообмена и влагопереноса в сложных ограждающих конструкциях зданий с деревянными элементами, предусматривающее учет влияния всех реальных процессов, происходящих в холодных климатических условиях, требует дальнейших исследований. Следует заметить, что наиболее адекватные модели тепло-влажностного переноса в древесных материалах включают в себя эмпирические зависимости, основанные на экспериментальных данных по изотермам сорбции влаги [10]. С использованием данных [10] и абсолютного потенциала влагопереноса [11], характеризующего возможности перемещения влаги в древесине, предложена одномерная модель тепло- и влагопереноса в наружных деревянных ограждающих конструкциях [12, 13]. Ее главной отличительной особенностью является учет зависимости коэффициента теплопроводности древесины от температуры, что обуславливает специфику влагопереноса в наружных ограждающих конструкциях. В результате дальнейшего развития моделей [12, 13], хорошо зарекомендовавших себя при расчетах тепло-влажностного режима наружных ограждений, была построена пространственная трехмерная модель тепло-влажностного переноса [14] в наружных стенах зданий, выполненных из утепленного бруса повышенной прочности [15] с коннекторами из фанеры.

2. Материалы и методы исследования. Тепло-массоперенос моделировали в расчетных фрагментах брусковых стен (рис. 1) размером $0,225 \times 0,3 \times 0,21$ м. Ламели, используемые в обычном утепленном бруске, имеют толщину $0,04$ м. Для стен из бруса с повышенной прочностью толщина ламелей на внутренней и наружной поверхности стены составляет $0,012$ м. Толщина фанерной вклейки, прилегающей к наружным ламелям, $0,012$ м. Толщина дополнительной продольной ламели в бруске повышенной прочности равна $0,025$ м. Материал ламелей – сосна с коэффициентами теплопроводности, зависящими как от влагосодержания, так и от температуры. Общая толщина слоя утеплителя с теплопроводностью $\lambda_{ms} = 0,033$ Вт/(м · К) изменялась от $0,11$ до $0,187$ м.

В качестве значений температуры и влажности наружного воздуха использовались величины, характерные для самого холодного месяца (января) в г. Томске. Температура и относительная влажность наружного воздуха со стороны плоскости I приняты равными: -39 °С и $0,8$; внутреннего воздуха (со стороны плоскости II): 20 °С и $0,5$. На плоскости I задан коэффициент теплоотдачи 23 Вт/(м² · К), на плоскости II – $8,7$ Вт/(м² · К). Коэффициент

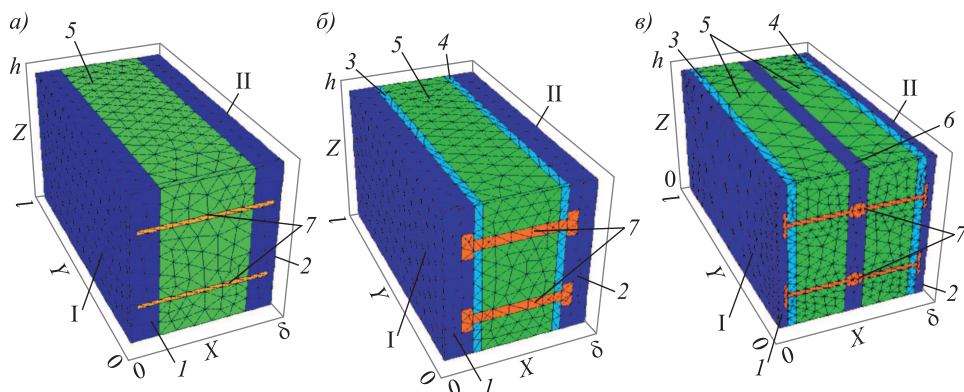


Рис. 1. Расчетные схемы фрагментов стен из утепленного клееного бруса

a – фрагмент стены из утепленного бруса с горизонтальными коннекторами; *b* – 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; *h* – высота расчетного фрагмента брусовой стены; *l* – длина высоты расчетного фрагмента брусовой стены; δ – высота расчетного фрагмента брусовой стены

Fig. 1. Design models of fragments of walls made of insulated glued laminated timber *a* – an element of the wall made of insulated timber with horizontal connectors; *b* – an element of the wall made of insulated timber with vertical H-shaped connectors; *c* – an element of the wall made of insulated timber of higher strength and vertical H-shaped connectors and central lamella 1, 2 – profiled longitudinal lamellae; 3, 4 – layers of plywood; 5 – layers of an insulator; 6 – internal longitudinal lamella; 7 – H-shaped connector; I – the external surface of the wall; II – internal surface of the wall; *h* – the height of the calculated fragment of timber wall; *l* – length of the calculated fragment of the timber wall; δ – timber wall thickness

пароотдачи [16] со стороны плоскости I равен $2,09 \cdot 10^{-8}$ кг/(м² · с · Па); внутреннего воздуха (со стороны плоскости II) – $1,04 \cdot 10^{-8}$ кг/(м² · с · Па).

Теплоперенос в рассматриваемых расчетных фрагментах был смоделирован с помощью трехмерных нестационарных уравнений тепло- и влагопереноса в декартовых координатах с использованием модели [14]. Основные замыкающие соотношения для этой модели влагопереноса, которые лишь частично представлены [14], необходимо дополнить аппроксимационными зависимостями [17], позволяющими при выполнении компьютерного моделирования, вычислять переменные теплофизические характеристики элементов бруса из древесины, фанеры и утеплителя.

Для вычисления изменения теплопроводности элементов из фанеры λ_p при накоплении влаги использовались данные [18] (рис. 2), исходя из которых была получена аппроксимационная формула:

при положительных температурах

$$\lambda_p = 0,132169 w_p + 0,388456; \quad (1)$$

при отрицательных температурах

$$\lambda_p = 0,131992 w_p + 1,104732, \quad (2)$$

где w_p – влагосодержание фанеры в долях единицы, кг/кг.

Коэффициент теплопроводности утеплителя (пенополистирола) λ_{ins} рассчитывался по зависимости

$$\lambda_{ins} = \lambda_{ins,dr}(1 + 6w_{ins}), \quad (3)$$

приведенной в [19] (w_{ins} – влагосодержание утеплителя в долях единицы, кг/кг, $\lambda_{ins,dr}$ – коэффициент теплопроводности сухого пенополистирола, принимался равным 0,033 Вт/(м·К)).

Другие характеристики, использовавшиеся при моделировании тепловлагопереноса в элементах брусовой конструкции, следующие: коэффициенты паропроводности утеплителя и фанеры – 0,012 и 0,02 мг/(м·ч·Па); теплоемкость утеплителя и фанеры – 1300 и 2300 Дж/(кг·К); начальная плотность древесины ламелей – 500 кг/м³; плотности утеплителя и фанеры – 30 и 650 кг/м³ соответственно. Начальное влагосодержание материалов принималось равновесным при температуре внутреннего воздуха 20 °С и относительной влажности 0,5.

Для того чтобы вычислить значения парциальных давлений водяного пара в расчетном фрагменте стены с влагосодержаниями, следует воспользоваться уравнениями изотерм сорбции [10]. С ростом относительной влажности ϕ от нуля сначала происходит увеличение адсорбированной влаги, а затем при $\phi > 0,7$ начинается заполнение микрокапилляров. При $\phi = 0,99$ количество влаги, связанной в древесине, достигает максимальной величины w_s , которую называют пределом гигроскопичности [20]. Эта часть изотермы сорбции не связана со свойствами различных пород древесины и для $\phi \geq 0,45$ может быть аппроксимирована зависимостью из [21]

$$w = 0,512 [0,217 - ((273 + t) / 1000)^2] / (1,22 - \phi). \quad (4)$$

С дальнейшим увеличением ϕ от 0,99 до 1,0 при максимальном заполнении макрокапилляров влагосодержание достигает максимального значения w_{max} . Величина w_{max} в отличие от w_s не зависит от температуры, но связана со свойствами конкретной породы древесины. Эта часть диаграммы сорбции обычно представляется в виде линейной зависимости

$$w = w_s + 100(w_{max} - w_s)(\phi - 0,99). \quad (5)$$

При температурах меньше нуля часть связанной влаги замерзает, и поэтому зависимость (4) дополняется выражением зависимости количества

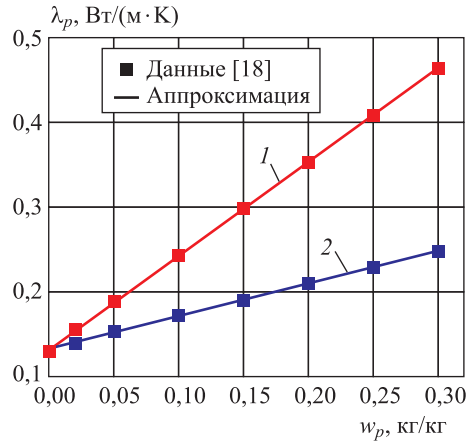


Рис. 2. Зависимости коэффициента теплопроводности фанеры λ_p от влагосодержания w_p

1 – при положительных температурах; 2 – при отрицательных температурах

Fig. 2. Dependence of thermal conductivity of plywood λ_p on moisture content w_p
1 – for positive temperatures; 2 – for negative temperatures

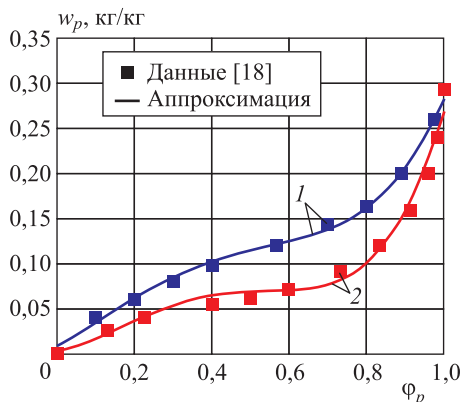


Рис. 3. Кривые равновесной влажности фанеры при 20 °С

1 – фанера, изготовленная из шпона, намазанного фенолформальдегидной смолой; 2 – фанера из шпона, пропитанного спирторастворимой фенолформальдегидной смолой

Fig. 3. Equilibrium moisture content curves for plywood at 20 °C

1 – plywood made of veneer sheet treated with phenol-formaldehyde resin; 2 – plywood made of veneer sheet treated with alcohol-soluble phenol-formaldehyde resin

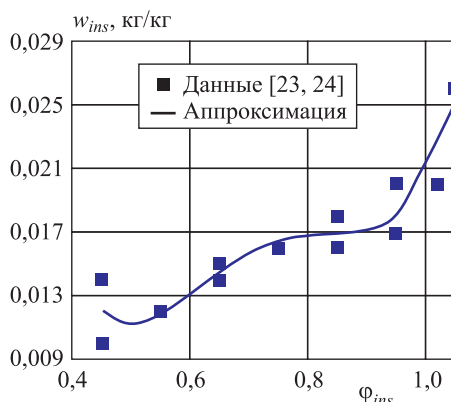


Рис. 4. Зависимость равновесной сорбционной влажности пенополистирола от относительной влажности воздуха

Fig. 4. Dependence of equilibrium sorption moisture of expanded polystyrene on relative humidity

не превратившейся в лед связанной влаги w_{bm} от температуры. Согласно данным [22], величину w_{bm} (предел гигроскопичности при $t < 0$ °С) можно вычислить с помощью формулы

$$w_{bm} = (w_s - 0,195) + 0,195 \exp(0,055t). \quad (6)$$

Влагосодержание влагостойкой фанеры из шпона можно определить с помощью изотерм сорбции (рис. 3), приведенных в [18]. Для аппроксимации изотерм влагостойкой фанеры были получены следующие соотношения: из шпона, намазанного фенолформальдегидной смолой

$$w_p = 0,008115 + 0,250231\varphi_p + 0,308411\varphi_p^2 - 1,248699\varphi_p^3 + 0,965118\varphi_p^4; \quad (7)$$

из шпона, пропитанного спирторастворимой фенолформальдегидной смолой

$$w_p = 0,004546 - 0,047302\varphi_p + 0,977389\varphi_p^2 - 2,498734\varphi_p^3 + 1,738939\varphi_p^4. \quad (8)$$

Величина влагосодержания w_{ins} в слоях пенополистирола, используемого в качестве утеплителя в рассматриваемых брусовых конструкциях, в зависимости от относительной влажности воздуха φ_{ins} определялась по аппроксимационной зависимости (рис. 4)

$$w_{ins} = 8,716160 - 2,120306 \cdot 10^3 \varphi_{ins} + 1,904561 \cdot 10^5 \varphi_{ins}^2 - 7,083122 \cdot 10^6 \varphi_{ins}^3 + 9,4437258 \cdot 10^7 \varphi_{ins}^4. \quad (9)$$

Формула (9) была получена при обработке данных по изотермам сорбции конструкционного пенополистирола, представленных в [23, 24], для интервала изменения относительной влажности воздуха $0,4 \leq \varphi_{ins} < 1$.

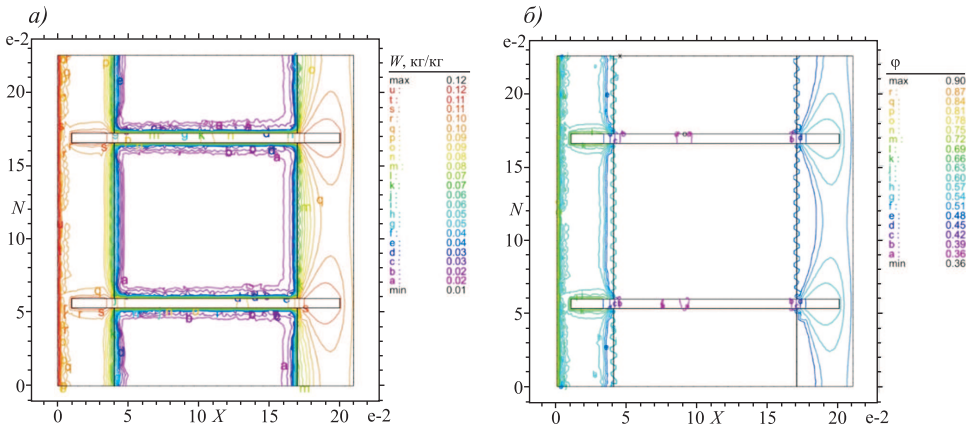


Рис. 5. Влагосодержание и относительная влажность воздуха в вертикальной плоскости симметрии коннекторов для бруса с горизонтальными коннекторами
a – влагосодержание; *b* – относительная влажность

Fig. 5. Moisture content and relative humidity of air in the vertical plane of symmetry of the connectors for timber with horizontal connectors
a – moisture content; *b* – relative humidity

3. Результаты и обсуждение. В результате численного моделирования теплообменных процессов были получены стационарные поля влагосодержания и относительной влажности (рис. 5–7) для характерных сечений утепленного профилированного бруса в вертикальной плоскости симметрии коннекторов.

Как видно из рис. 5, *a* и 7, *a* максимальное увлажнение ($w \approx 0,12$ кг/кг) в брусковых стенах, конструкция которых предусматривает использование горизонтальных коннекторов и вертикальных коннекторов с внутренней продольной ламелью, локализовано на внешней поверхности, контактирующей

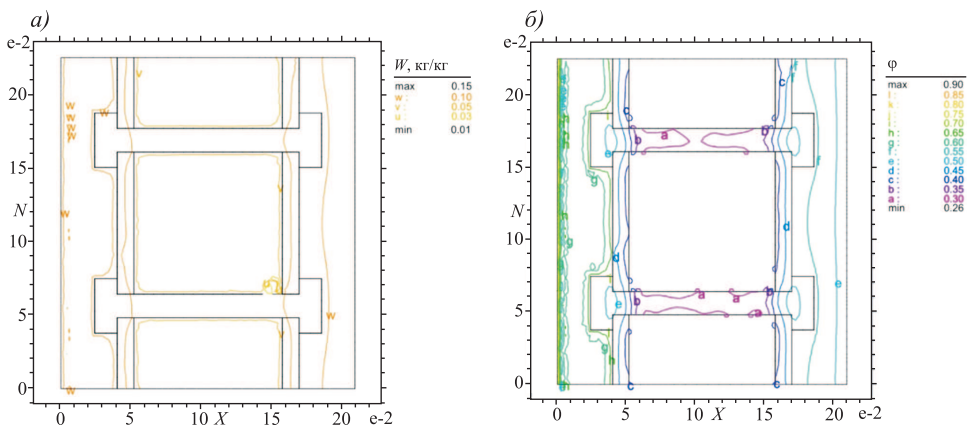


Рис. 6. Влагосодержание и относительная влажность воздуха в вертикальной плоскости симметрии коннекторов для бруса с вертикальными H-образными коннекторами
a – влагосодержание; *b* – относительная влажность

Fig. 6. Moisture content and relative humidity of air in the vertical plane of symmetry of connectors for timber with vertical H-shaped connectors
a – moisture content; *b* – relative humidity

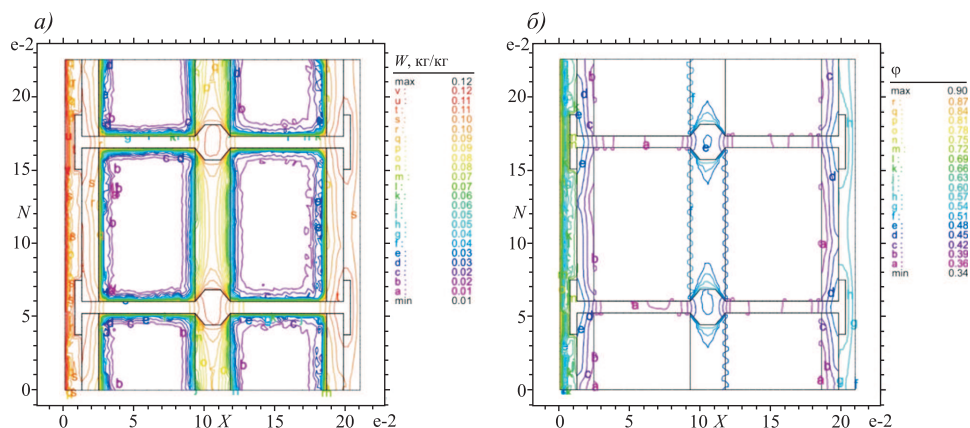


Рис. 7. Влагосодержание и относительная влажность воздуха в вертикальной плоскости симметрии коннекторов для бруса с вертикальными Н-образными коннекторами и центральной ламелью

a – влагосодержание; *b* – относительная влажность

Fig. 7. Moisture content and relative humidity of air in the vertical plane of symmetry of connectors for timber with vertical H-shaped connectors and a central lamella

a – moisture content; *b* – relative humidity

щей с наружным воздухом. Несколько большее максимальное увлажнение ($w \approx 0,12-0,13$ кг/кг), локализованное на расстоянии порядка 2 см от наружной поверхности, достигается в брусовой конструкции с вертикальными коннекторами без внутренней ламели (рис. 6, *a*). Кроме того, распределение влагосодержаний (рис. 5–7, *a*) показывает, что в конструкциях, тип которых представлен на рис. 1, *a*, *b*, в местах крепления коннекторов к ламелям образуются зоны избыточного увлажнения, где влагосодержание достигает 0,11 кг/кг.

В конструкции бруса, показанной на рис. 1, *b*, зоны с относительно высоким увлажнением не наблюдаются, влага в вертикальной плоскости симметрии коннекторов распределяется более равномерно, послойно.

Как видно из данных по относительной влажности воздуха, во всех расчетных фрагментах брусковых стен максимальных значений (0,87–0,9) эта величина достигает на наружной поверхности стены. В зонах, заполненных утеплителем, относительная влажность воздуха изменяется в диапазоне от 0,4 до 0,55.

Во всех вариантах рассмотренных конструкций брусковых стен отсутствуют так называемые «мокрые» зоны, в которых относительная влажность равна единице. Таким образом, в ограждающих конструкциях, выполненных из утепленного бруса с фанерными коннекторами, не происходит накопление свободной (несвязанной) влаги, которое может привести к существенному снижению их теплозащитных характеристик.

4. Выводы. 1. На основе использования физико-математической модели совместного тепло-влажноперевода в стенах из утепленного бруса с коннекторами, главной особенностью которой является учет зависимости коэффициентов влагопроводности, теплопроводности и теплоемкости древесины, рассчитаны поля влагосодержания и относительной влажности в характерных фрагментах брусковых стен.

2. Максимальное увлажнение в стенах из утепленного профилированного бруса локализовано на внешней поверхности стены или на небольшом расстоянии от нее в наружной ламели.

3. В брусевых конструкциях с вертикальными коннекторами (при наличии внутренней продольной ламели) возможно образование областей с повышенной влажностью вблизи мест крепления коннекторов к ламелям.

4. Во всех вариантах проведенных расчетов в выбранном фрагменте брусевой стены отсутствуют зоны со свободной (несвязанной) влагой, в которых относительная влажность равна единице.

Список источников

1. *Gao S., Liu J., Gao G.* Experimental study on structure and property of chemical building materials based on sem analysis technology // *Chemical Engineering Transactions*. 2018. Vol. 66. P. 1135–1140. <https://doi.org/10.3303/CET1866190>
2. *Тутунин А.А., Зайцева К.В.* Решение задачи оптимизации параметров ресурсосберегающих ограждающих конструкций деревянных зданий // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2007. № 20. С. 137–140.
3. *Soudek P.* Moisture monitoring of built-in wooden elements // *Applied Mechanics and Materials*. 2016. Vol. 861. P. 303–310. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.861.303>
4. *Hans G.* Coordination of performance standards on moisture control in buildings moisture migration in buildings / ed. M. Liefv and H. Trechsel. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011. P. 141–147. <https://doi.org/10.1520/STP38691S>
5. *Saft S., Kaliske M.* Numerical simulation of the ductile failure of mechanically and moisture loaded wooden structures // *Computers & Structures*. 2011. Vol. 89. P. 2460–2470. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.06.004>
6. *Wegerer P., Bednar T.* Hygrothermal performance of wooden beam heads in inside insulated walls considering air flows // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 132. P. 652–657. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.710>
7. *Wang L., Ge H.* Stochastic modelling of hygrothermal performance of highly insulated wood framed walls // *Building and Environment*. 2018. Vol. 146. P. 12–28.
8. *Fedosov S., Kotlov V.* Dynamics of heat and moisture transfer in wooden structures tied with metallic fasteners // *Dry. Technol.* 2020. Vol. 38. P. 1322–1328.
9. *Piot A., Woloszyn M., Brau J., Abele Ch.* Experimental wooden frame house for the validation of whole building heat and moisture transfer numerical models // *Energy Build.* 2011. Vol. 43, no. 6. P. 1322–1328. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.01.008>
10. *Жуков А.В.* Инженерные формулы для расчета тепловлажностных свойств древесных материалов // *Известия вузов. Строительство*. 2008. № 5. С. 81–84.
11. *Перехоженцев А.Г.* Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий. Волгоград: Изд-во Волгоград. гос. техн. ун-та, 1997. 272 с.
12. *Кузин А.Я., Цветков Н.А., Дроганов В.А.* Нестационарный тепло- и влагоперенос в многослойном наружном ограждении // *Теплофизика и аэромеханика*, 2003. Т. 10, № 4. С. 599–609.
13. *Кузин А.Я., Мирошниченко Т.А., Цветков Д.Н.* Исследование влажностного состояния наружной деревянной брусчатой стены // *Вестник ТГАСУ*. 2007. № 2. С. 186–194.
14. *Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В., Колесникова А.В.* Физико-математическая модель тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях из профилированного теплового бруса // *Известия вузов. Строительство*. 2017. № 2. С. 12–29.

15. Цветков Н.А. Повышение эксплуатационных свойств клееного профилированного бруса с утеплителем // Вестник ТГАСУ. 2012. № 2. С. 163–169.
16. Тимошенко А.Т., Ефимов С.С., Попов Г.Г. Ограждающие конструкции зданий с влажным режимом эксплуатации в экстремальных условиях Крайнего Севера. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1996. 200 с.
17. Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Khutornoi A.N., Boldyryev S., Kolesnikova A.V., Tsvetkov D.N. Mathematical modelling of renewable construction materials for green energy-efficient buildings at permafrost regions of Russia // Environmental Challenges. 2021. Vol. 4. 100101. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100101>
18. Стерлин Д.М. Сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 384 с.
19. Павлов В.А. Пенополистирол. М.: Химия, 1973. 240 с.
20. Шубин Г.С. Тепловая обработка древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 336 с.
21. Кречетов И.В. Сушка древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 432 с.
22. Серговский П.С., Рассев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 360 с.
23. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Ильинский Ю.Ю. Лабораторные исследования сорбционной влажности конструкционного пенополистирола // Сборник трудов XIII Всероссийской школы-семинара с международным участием. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. С. 136–139.
24. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.

References

1. Gao S., Liu J., Gao G. Experimental study on structure and property of chemical building materials based on sem analysis technology. *Chemical Engineering Transactions*. 2018; (66): 1135–1140. <https://doi.org/10.3303/CET1866190>
2. Titunin A.A., Zaitseva K.V. Solution of the problem of optimization of parameters of resource-saving enclosing structures of wooden buildings. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa = Actual problems of the forest complex*. 2007; (20): 137–140. (In Russ.).
3. Soudek P. Moisture monitoring of built-in wooden elements. *Applied Mechanics and Materials*. 2016; (861): 303–310. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.861.303>
4. Hans G. Coordination of performance standards on moisture control in buildings moisture migration in buildings / ed. M. Lieff and H. Trechsel. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011. P. 141–147. <https://doi.org/10.1520/STP38691S>
5. Saft S., Kaliske M. Numerical simulation of the ductile failure of mechanically and moisture loaded wooden structures. *Computers & Structures*. 2011; (89): 2460–2470. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.06.004>
6. Wegerer P., Bednar T. Hygrothermal performance of wooden beam heads in inside insulated walls considering air flows. *Energy Procedia*. 2017; (132): 652–657. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.710>
7. Wang L., Ge H. Stochastic modelling of hygrothermal performance of highly insulated wood framed walls. *Building and Environment*. 2018; (146): 12–28.
8. Fedosov S., Kotlov V. Dynamics of heat and moisture transfer in wooden structures tied with metallic fasteners. *Dry. Technol.* 2020; (38): 1322–1328.
9. Piot A., Woloszyn M., Brau J., Abele Ch. Experimental wooden frame house for the validation of whole building heat and moisture transfer numerical models. *Energy Build.* 2011; 43(6): 1322–1328. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.01.008>

10. Zhukov A.V. Engineering formulas for calculating heat and humidity properties of wood materials. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2008; (5): 81–84. (In Russ.).
11. Perekhozhentsev A.G. Questions of the theory and calculation of the moisture state of heterogeneous sections of building envelopes. Volgograd: Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 1997. 272 p. (In Russ.).
12. Kuzin A.Ya., Tsvetkov N.A., Draganov V.A. Non-stationary heat and moisture transfer in multi-layer external fencing. *Teplofizika i aeromekhanika = Thermophysics and Aeromechanics*. 2003; 10(4): 599–609. (In Russ.).
13. Kuzin A.Ya., Miroshnichenko T.A., Tsvetkov D.N. Non-stationary heat and moisture transfer in multi-layer external fencing. *Vestnik TGASU = Journal of Construction and Architecture*. 2007; (2): 186–194. (In Russ.).
14. Tsvetkov N.A., Khutornoy A.N., Tolstykh A.V., Kolesnikova A.V. Physical and mathematical model of heat and moisture transfer in enclosing structures made of profiled thermal timber. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2017; (2): 12–29. (In Russ.).
15. Tsvetkov N.A. Thermal engineering justification of external building fences made of glued wooden energy-efficient grades. *Vestnik TGASU = Journal of Construction and Architecture*. 2012; (2): 163–169. (In Russ.).
16. Timoshenko A.T., Efimov S.S., Popov G.G. Building envelope with wet operation in extreme conditions of the Far North Federal Research Centre. Yakutsk: The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1996. 200 p. (In Russ.).
17. Tsvetkov N.A., Tolstykh A.V., Khutornoi A.N., Boldyryev S., Kolesnikova A.V., Tsvetkov D.N. Mathematical modelling of renewable construction materials for green energy-efficient buildings at permafrost regions of Russia. *Environmental Challenges*. 2021; (4): 100101. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100101>
18. Sterlin D.M. Drying in the production of plywood and chipboards. Moscow, 1977. 384 p. (In Russ.).
19. Pavlov V.A. Styrofoam. Moscow, 1973. 240 p. (In Russ.).
20. Shubin G.S. Thermal processing of wood. Moscow, 1990. 336 p. (In Russ.).
21. Krechetov I.V. Wood drying. Moscow, 1980. 432 p. (In Russ.).
22. Sergovskiy P.S., Rashev A.I. Hydrothermal processing and preservation of wood. Moscow, 1987. 360 p. (In Russ.).
23. Fedyuk R.S., Mochalov A.V., Ilyinskiy Yu.Yu. Laboratory studies of the sorption moisture content of structural polystyrene foam. Proceedings of the XIII All-Russian School-Seminar with International Participation. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2013. P. 136–139. (In Russ.).
24. Fokin K.F. Structural heat engineering of enclosing parts of buildings / ed. Yu.A. Tabunshchikov, V.G. Gagarin. Moscow: AVOK-PRESS, 2006. 256 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Н.А. Цветков – доктор технических наук, профессор, nac.tsuab@yandex.ru
А.В. Толстых – кандидат физико-математических наук, доцент, tolstbu@yandex.ru
Д.Н. Цветков – старший преподаватель, orf@mail.ru
Ю.Н. Дорошенко – кандидат технических наук, доцент, kafotopvent1@rambler.ru

Information about the authors

N.A. Tsvetkov – DSc, Professor, nac.tsuab@yandex.ru
A.V. Tolstykh – PhD, Ass. Professor, sinvintie@rambler.ru
D.N. Tsvetkov – Senior Lecturer, orf@mail.ru
Ju.N. Doroshenko – PhD, Ass. Professor, kafotopvent1@rambler.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 10.03.2022
Одобрена после рецензирования 07.04.2022
Принята к публикации 14.04.2022

The article was submitted 10.03.2022
Approved after reviewing 07.04.2022
Accepted for publication 14.04.2022