

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА  
ИЗ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ  
НА ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE COMPOSITE STRUCTURE  
OF CELLULOSE-CONTAINING WASTE ON ITS PERFORMANCE INDICATORS**

*И.В. СУСОЕВА, А.А. ТИТУНИН, Т.Н. ВАХНИНА, Ю.Б. ГРУНИН, Б.Е. НАРМАНИЯ*

*I.V. SUSOEVA, A.A. TITUNIN, T.N. VAHNINA, YU.B. GRUNIN, B.E. NARMANIA*

**(Костромской государственной университет,  
Поволжский государственный технический университет,  
Ивановский государственный политехнический университет)**

**(Kostroma State University,  
Volga State University of Technology,  
Ivanovo State Polytechnical University)**

E-mail: i.susoeva@yandex.ru

*В качестве альтернативы традиционно применяемой минеральной вате рассмотрен теплоизоляционный материал из отходов прядения льна и хлопка и мягких отходов переработки древесины. Наполнитель является капиллярно-пористым телом и способен впитывать влагу, в результате чего меняется его теплопроводность. Однако при циклических температурно-влажностных воздействиях формоустойчивость композита на основе целлюлозосодержащего наполнителя выше, чем у минеральной ваты, что объясняется наличием обширного фронта прочных водородных связей в структуре композита.*

*Для исследования температурных полей композита в зависимости от его структуры и температурно-влажностных воздействий предложено использовать программный комплекс Comsol.*

*As an alternative to the traditionally used mineral wool, an insulating material made of flax and cotton spinning waste and soft wood processing waste is considered. The filler is a capillary-porous body and is capable of absorbing moisture, as a result of which its thermal conductivity changes. However, under cyclic temperature and humidity effects, the form stability of the composite based on the cellulose-containing filler is higher than that of mineral wool, which is explained by the presence of an extensive front of strong hydrogen bonds in the composite structure.*

*To study the temperature fields of the composite, depending on its structure and temperature and humidity effects, it is proposed to use the Comsol software package.*

**Ключевые слова:** растительные отходы, лен, хлопок, древесина, композиционные плиты, коэффициент теплопроводности.

**Keywords:** vegetable waste, flax, cotton, wood, composite boards, coefficient of thermal conductivity.

Одной из главных задач современного строительного производства является рациональное использование энергоресурсов и

повышение энергоэффективности зданий. Работы по ресурсо- и энергосбережению в строительной отрасли относятся к приори-

тетным направлениям развития науки и техники Российской Федерации. Огромная доля в потреблении энергоресурсов принадлежит зданиям; общий технологический потенциал энергосбережения в РФ консервативно оценивается в 350 млн. тонн условного топлива, из которых около 130 млн. тонн условного топлива – за счет снижения непроизводительных энергопотерь в зданиях [1].

Строительство зданий, как жилых, так и общественных и большинства промышленных, должно осуществляться в соответствии с требованиями к тепловой защите. Для удовлетворения этим требованиям в практике строительного производства применяются многослойные стеновые конструкции с эффективными теплоизоляционными материалами [2]. Ассортимент применяемых теплоизоляционных материалов достаточно разнообразен по виду исходного сырья, структуре, форме, их техническим и теплофизическим характеристикам [3]. Преимущественно на отечественном рынке используются волокнистые материалы на основе стеклянного и базальтового волокна, минеральной и шлаковой ваты. Минераловатные утеплители для стен имеют, пожалуй, самую низкую по сравнению с другими утеплителями объемную массу (плотность) – от 40 кг/м<sup>3</sup>. Однако минеральная вата имеет ряд существенных недостатков – она дорогостояща [4], пылит при изготовлении и монтаже [5], негативно воздействуя на органы дыхания, имеет высокое водопоглощение, дает усадку при эксплуатации [6...9].

Многолетний опыт применения минераловатных утеплителей выявил и другие трудноустраняемые недостатки таких материалов, а именно – возможность конденсатообразования в сечении конструкции [10], приводящего к снижению теплотехнической эффективности утеплителя; ограниченная долговечность теплоизоляционных материалов [11].

Отмеченные недостатки инициировали поиск и разработку других альтернативных материалов теплоизоляционного назначения, в первую очередь, получаемых на основе матрицы из поликонденсационного

связующего и многокомпонентного наполнителя из целлюлозосодержащих отходов прядения хлопка, льна и мягких отходов переработки древесины, являющихся возобновляемым ресурсом по своей природе [12], [13].

С позиций теории тепломассопереноса [14] мягкие отходы деревообработки, а также отходы прядения льна и хлопка можно рассматривать как систему мелкодисперсных частиц, каждая из которых представляет собой капиллярно-пористое тело, содержащее влагу в макро- и микрокапиллярах, а также осмотическую влагу, входящую в растительные клетки. Так как вода имеет коэффициент теплопроводности в 25 раз больше, чем неподвижный воздух, то ее количество будет оказывать влияние на основной эксплуатационный показатель теплоизоляционных материалов – коэффициент теплопроводности и характер температурных полей в структуре композита.

В общем случае, согласно теории Фурье, температурное поле тела определяется характером его теплообмена с окружающей средой, причем теплообмен обусловлен двумя факторами – непосредственной передачей тепла от нагретого тела к более холодной среде и излучением тепла в окружающее пространство.

При эксплуатации зданий наружные и внутренние стороны ограждающих конструкций практически всегда находятся в разных температурных условиях. Вследствие этого формируется градиент температур  $\text{grad } T$ , и из-за разницы температур происходит перенос теплоты, или тепловой поток. Согласно закону Био–Фурье, вектор теплового потока  $q$  прямо пропорционален градиенту температуры  $T$ :

$$q = -\lambda \text{grad} T . \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  уравнения (1), то есть коэффициент теплопроводности, Вт/(мК), характеризует способность материала проводить теплоту. Именно коэффициент теплопроводности является одним из основных параметров термического сопротивления материала.

Коэффициент теплопроводности зависит от комплекса характеристик материала – его природы, температуры, плотности, влажности и др. Если не затрагивать теплопередачу в металлах, можно для твердых тел утверждать, что теплопередача обусловлена колебательными движениями молекул. Исходя из этого, изменение температуры влияет на коэффициент теплопроводности, однако на практике при ограниченном изменении температуры материала (порядка 50...60°C) изменение коэффициента теплопроводности невелико, в строительных расчетах оно обычно не учитывается.

Существенное влияние на величину коэффициента теплопроводности оказывает плотность материала. Коэффициент теплопроводности материала тем меньше, чем меньше объемная масса материала. Эта зависимость обусловлена тем, что в материале меньшей плотности больше пор, заполненных воздухом, теплопроводность которого очень низкая.

Одной из задач создания эффективных теплоизоляционных материалов является получение такой структуры композита, которая удовлетворяла бы требованиям к тепловой защите<sup>1</sup>, а также при неизбежных процессах конденсации влаги внутри утеплителя вследствие образования точки росы позволила бы обеспечить формоустойчивость материала и продлить срок его службы.

Рассматривая, в качестве одного из примеров, краевую задачу тепломассопереноса в целлюлозосодержащем материале под воздействием циклических изменений нагревание – охлаждение в анализируемой системе [15], процесс изменения температуры принято описывать системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа с нелинейными граничными условиями и произвольным видом функций, определяющих начальные распределения потенциалов переноса без учета влияния баропереноса [16...19]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(\operatorname{agrad}(t)) + \varepsilon \frac{r^*}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} &= \operatorname{div}(k \operatorname{grad}(u)) + \operatorname{div}(k \delta_T \operatorname{grad}(t)). \end{aligned} \right\} (2)$$

Первое уравнение может быть названо дифференциальным уравнением теплопереноса, второе – уравнением влагопереноса. Эти уравнения описывают тепловлажностное состояние теплоизоляционного материала под воздействием изменяющихся параметров окружающей среды. Здесь  $a$ ,  $k$  – коэффициенты тепло- и влагопроводности наполнителя;  $\delta_T$  – коэффициент термодиффузии, характеризующий влияние градиента влагосодержания на теплоперенос;  $c$  – теплоемкость древесины;  $\varepsilon$  – критерий фазового превращения, показывающий долю влаги, перемещающейся в материале в виде пара;  $r^*$  – скрытая теплота парообразования.

В общем случае коэффициенты тепло-температуро- и массопроводности, а также теплофизические характеристики материала зависят от его температуры, плотности, влажности и могут изменяться во времени процесса. Поэтому они и находятся под знаками математических операторов дивергенции [15]. Также следует отметить, что целлюлозосодержащий материал является сложным комплексом макромолекул с различной плотностью упаковки. Согласно одной из структурных схем [20] макромолекулы целлюлозы представляют из себя немного свернутую спиралевидную ленту с поперечным размером 0,39×0,83 нм. Ленты укладываются в плоскости по 10...15 штук в пачки макромолекул из 8...10 слоев. Вследствие обширного фронта межмолекулярных водородных связей для целлюлозы крайне длительное время сохраняется жесткая и прочная структура, но это утверждение справедливо только для кристаллической области макромолекулы, составляющей 15...17 нм. Следующие за кристаллическими областями аморфные участки имеют в длину 2,5...3,0 нм.

<sup>1</sup> СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М.: Госстрой России, 2003.

Физические характеристики материала целлюлозосодержащего наполнителя изменяются в процессе сорбции. Внутри аморфных областей имеются поры размером 0,5...1,0 нм. При сорбции влаги макромолекулы целлюлозы на данных участках раздвигаются и приобретают характер "бус". Именно это является причиной изменения физических характеристик целлюлозосодержащих материалов при увлажнении.

Кристаллические участки целлюлозы обеспечивают начальную стойкость материала к воздействию воды, внутрь кристаллитов целлюлозы адсорбат не проникает. Создание адсорбционного монослоя воды приводит к расклинивающим воздействиям в аморфной области целлюлозы, и, как следствие, к разбуханию материала [20], [21], причем моноадсорбированная вода прочно связана с активной поверхностью адсорбента [22]. Насколько велико негативное влияние влаги на формоустойчивость и теплопроводность композита из целлюлозосодержащих отходов, можно оценить по результатам лабораторных исследований.

В лаборатории кафедры лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств (ЛДП) Костромского государственного университета (КГУ), г. Кострома, Россия, разработаны теплоизоляционные композиционные плиты на основе целлюлозосодержащих наполнителей и матрицы из синтетических связующих. Образцы изготавливались по технологии древесноволокнистых плит мокрого способа производства. В качестве матрицы для производства плит было использовано синтетическое термореактивное связующее – фенолоформальдегидная смола (ФФС). Композиционный плитный материал изготавливался средней плотности 240...260 кг/м<sup>3</sup>, расход связующего составлял 40 % от

массы растительного наполнителя. Образцы материала высушивались при 80 °С до влажности 8±0,5 %. Оценивалась теплопроводность и размерная стабильность композиционных плит после пребывания в воде в течение 24 часов.

Определялись влагопоглощение по массе  $W_{п}$ , %, коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К), и относительное изменение параметров – коэффициента теплопроводности  $\Delta\lambda$ , %, и толщины материала  $\Delta h$ , %. Значение коэффициента теплопроводности материала определялось с помощью измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 в соответствии с ГОСТ 7076–99<sup>2</sup>.

На рис. 1 представлены фото образцов плит из отходов прядения льна и мягких древесных отходов (а), из отходов прядения хлопка и мягких древесных отходов (б) и минеральной ваты (в) до и после пребывания в воде в течение 24 часов.

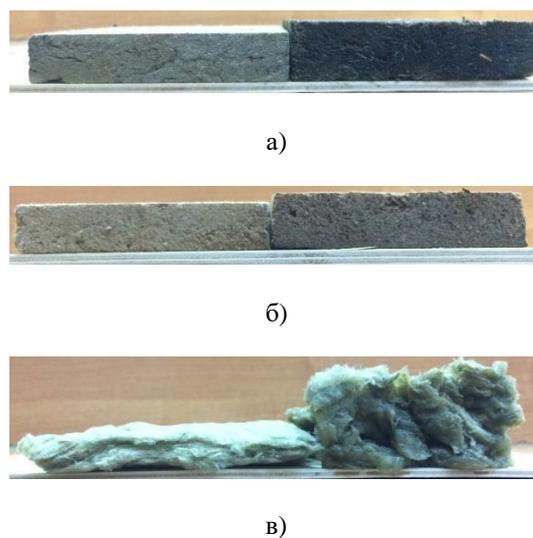


Рис. 1

Результаты определения параметров материалов после воздействия воды представлены в табл. 1.

<sup>2</sup> ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – М.: ГУП ЦПП, 2000.

Вид материала	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)		Изменение коэффициента теплопроводности $\Delta\lambda$ , %	Разбухание по толщине $P_h$ , %
	до увлажнения	после увлажнения		
Композит из отходов хлопка и древесины	0,086	0,246	186	15,3
Композит из отходов льна и древесины	0,061	0,245	302	13,8
Минеральная вата	0,048	1,076	2141	153,4

Как видно из табл. 1, минераловатный утеплитель вследствие попадания в его структуру влаги значительно утратил свои теплоизоляционные свойства и увеличился по толщине. В то время как теплоизоляционный композит на основе целлюлозосодержащих отходов показал примерно в 10 раз лучшие показатели устойчивости к влажностным воздействиям. Тем самым в ходе лабораторных исследований было подтверждено предположение о том, что, несмотря на наличие расклинивающих воздействий влаги в аморфной области целлюлозы, композит из отходов прядения льна, хлопка и мягких отходов деревообработки обладает более высокой стойкостью к влажностным воздействиям.

При изучении явления тепломассопереноса в теплоизоляционном композите из целлюлозосодержащего наполнителя также следует предположить, что от равномерности распределения его компонентов будет зависеть его теплопроводность в целом. И, наоборот, неоднородность структуры ком-

позита, наличие участков концентрации связующего или влаги будут ухудшать теплоизоляционные свойства материала. Поэтому в процессе его создания следует соблюдать рекомендуемые технологические режимы производства композита. Для проверки этого положения мы не можем рассматривать композит как ортотропное тело однородной структуры. С учетом многокомпонентной структуры композита и сложностью процессов, протекающих в нем при приложении тепловой нагрузки, система уравнений (2) не может быть решена аналитическими методами. А значит, мы не можем получить ответ на вопрос, при каких условиях в композите будут образовываться участки концентрации влаги. Поэтому авторами предложено использовать возможности программного комплекса Comsol для расчета и анализа температурных полей в композите на основе многокомпонентного целлюлозосодержащего наполнителя.

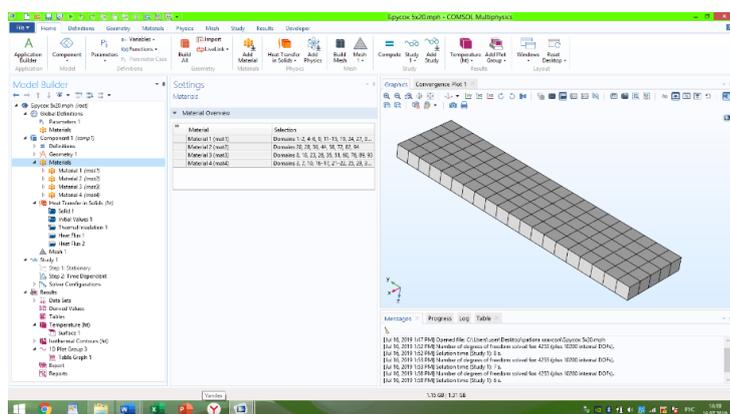


Рис. 2

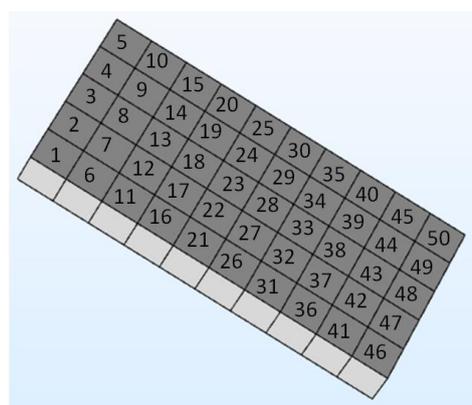


Рис. 3

Для выполнения расчетов в среде Comsol необходимо иметь трехмерную модель

объекта (рис. 2), построенную непосредственно в системе трехмерного моделиро-

вания Comsol или импортированную в систему с помощью средств импорта моделей. Для предварительного анализа принят однослойный элемент материала в виде тонкой пластины. Длина пластины соответствует толщине теплоизоляционного слоя композита в некоторой ограждающей конструкции. Взаимное расположение компонентов в композите представлено на рис. 3 где: 9, 20, 27, 38 – воздух; 3,15, 22, 29, 36 – вода; 2, 4, 7, 10, 17, 18, 26, 28, 30, 31, 34, 40, 42, 43, 44 – связующее; 1, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 14, 16, 19, 21, 23, 24, 25, 32, 33, 35, 37, 39, 41, 45, 46, 47, 48, 49, 50 – наполнитель.

Для исследований выбираем нестационарный процесс, соответствующий реальным условиям работы конструктивного элемента. Зададим параметры временного анализа: время моделирования 7200 с, шаг моделирования 600 с, начальная температура 20°C, плотность теплового потока 10 Вт/м<sup>2</sup>. После этого проведем расчет и про-

анализируем полученные результаты. В отличие от стационарного теплового расчета, в котором фигурирует один главный результат – установившаяся в системе температура, в результате нестационарного расчета получаем температурные поля в различные моменты времени в пределах заданного временного интервала (рис. 4).

Анализируя полученные результаты, видно, что в местах расположения разных компонентов происходит более интенсивное изменение температуры. Уже через 600 с после приложения тепловой нагрузки к правой поверхности композита на нем устанавливается температура 306 до 294 К, при этом на противоположной – левой стороне – температура практически не меняется за исключением тех участков, где расположены компоненты воды и связующего и сказывается влияние наполнителя с хорошими теплоизоляционными свойствами.

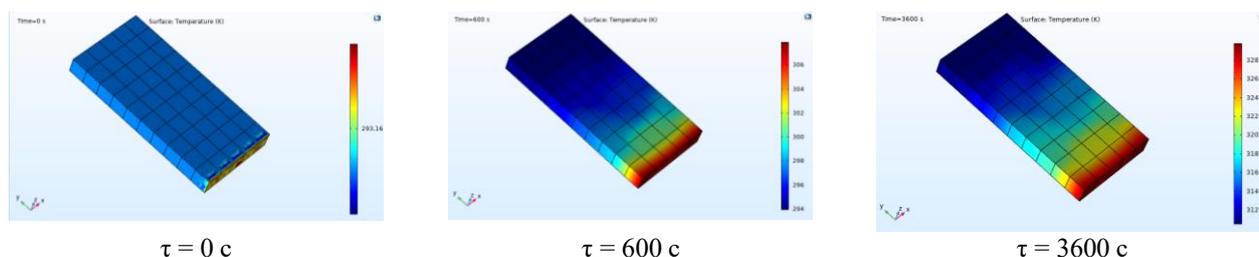


Рис. 4

Компоненты, состоящие из воды и связующего, интенсивнее проводят тепло, чем из воздуха и наполнителя, что подтверждает соответствие модели общим положениям теории теплопроводности.

Анализ результатов показал, что для достижения стабильности теплоизоляционных свойств материала необходимо в процессе формирования структуры композита обеспечить равномерность совмещения наполнителя со связующим (матрицей) и максимальную степень осмоления наполнителя.

Это позволит исключить из композиции большемерные участки связующего и воды, создающие значительный вклад в проводимость тепла в материале.

## ВЫВОДЫ

1. Сравнительные испытания теплоизоляционных материалов показали преимущества разработанного авторами композиционного материала на основе целлюлозосодержащего наполнителя по сравнению с минеральной ватой, что объясняется наличием обширного фронта прочных водородных связей в структуре композита.

2. Установлено, что при увлажнении сравниваемых видов утеплителей приращение коэффициента теплопроводности и разбухание минеральной ваты примерно в 10 раз выше, чем у композита на основе целлюлозосодержащих наполнителей.

3. Предложено для анализа влияния структуры композита на основе многокомпонентного целлюлозосодержащего наполнителя на его теплопроводность использовать программный комплекс Comsol.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алоян Р.М., Федосов С.В., Опарина Л.А. Энергоэффективные здания – состояние, проблемы и пути решения. – Иваново, 2016.

2. Граник Ю.Г. Теплоэффективные ограждающие конструкции жилых и гражданских зданий // Строительные материалы. – 1999, № 2. С. 4...6.

3. Горлов Ю.П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. – М., 1989.

4. European Commission Joint Research Centre Institute for prospective technological studies. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass <http://glassresearch.ru/uploads/items/NDT/> (дата обращения: 23.12.2020).

5. Бобров Ю.Л. Теплоизоляционные материалы и конструкции. – М., 2003.

6. Гусев Б.В., Езерский В.А., Монастырев П.В. Изменение линейных размеров минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий // Промышленное и гражданское строительство. – 2004, № 8. С. 32...34.

7. Гусев Б. В., Езерский В.А., Монастырев П.В. Потеря массы минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий // Кровельные и изоляционные материалы. – 2005, № 2. С. 48...49.

8. Ярцев В.П., Дорофеев А.М. Влияние силовых и атмосферных воздействий на теплофизические характеристики минераловатных плит // Кровельные и изоляционные материалы. – 2010, № 4. С. 14...15.

9. Ярцев В.П., Мамонтов А.А., Мамонтов С.А. Эксплуатационные свойства и долговечность теплоизоляционных материалов // Кровельные и изоляционные материалы. – 2013, № 1. С. 8...11.

10. Грошев А.Е., Данкер М.П., Боброшов А.В., Замолоцких П.С. Исследование различных видов наружных ограждающих конструкций в монолитном домостроении // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012, №1. С. 62...65.

11. Корниенко С.В. Температурный режим трехслойной стеновой панели // Жилищное строительство. – 2001, №9. С. 20...21.

12. Susoeva I.V., Vakhnina T.N., Titunin A.A., Asatkina J.A. The performance of composites from vegetable raw materials with changes in temperature and humidity // Magazine of Civil Engineering. – 2017, 3(71). P. 39...50.

13. Palumbo M., Navarro A., Avellaneda J., Lacasta A. M. Characterization of thermal insulation materials developed with crop wastes and natural binders // World Barcelona. – 2014. P. 1...10.

14. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968.

15. Федосов С.В., Котлов В.Г., Алоян Р.М., Ясинский Ф.Н., Бочков М.В. Моделирование теплопереноса в системе газ – твердое при нагелном соединении элементов деревянных конструкций. – Ч.1. Общая физико-математическая постановка задачи // Строительные материалы. – 2014, № 7. С.86...91.

16. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.

17. Kreith F., Manglik R.M., Bohn M.S. Principles of heat transfer. 7 edition. – Cengage Learning, 2010.

18. Incropera F., DeWitt D. Fundamentals of heat and mass transfer. 6 edition. – New York: Wiley, 2007.

19. Рудобаашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980.

20. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров. – СПб., 1999.

21. Грунин Ю.Б., Грунин Л.Ю., Шевелева Н.Н., Масас Д.С., Федосов С.В., Котлов В.Г. Характер изменения надмолекулярной структуры целлюлозы в процессе ее увлажнения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, №2. С. 233...237.

22. Грунин Ю.Б., Грунина Т.Ю., Иванова М.С., Федосов С.В., Котлов В.Г. Изучение методом ЯМР-<sup>1</sup>H-релаксации характера надмолекулярных перестроек хлопковой целлюлозы в результате ее биохимической деградации // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019, № 5. С.124...130.

#### REFERENCES

1. Aloyan R.M., Fedosov S.V., Oparina L.A. Energoeffektivnye zdaniya – sostoyanie, problemy i puti resheniya. – Ivanovo, 2016.

2. Granik Yu.G. Teploeffektivnye ogradhdayushchie konstruksii zhilykh i grazhdanskikh zdaniy // Stroitel'nye materialy. – 1999, № 2. S. 4...6.

3. Gorlov Yu.P. Tekhnologiya teploizolyatsionnykh i akusticheskikh materialov i izdeliy. – M., 1989.

4. European Commission Joint Research Centre Institute for prospective technological studies. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass <http://glassresearch.ru/uploads/items/NDT/> (data ob-rashcheniya: 23.12.2020).

5. Bobrov Yu.L. Teploizolyatsionnye materialy i konstruksii. – M., 2003.

6. Gusev B.V., Ezerskiy V.A., Monastyrev P.V. Izmenenie lineynykh razmerov mineralovatnykh plit v usloviyakh ekspluatatsionnykh vozdeystviy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2004, № 8. S.32...34.

7. Gusev B. V., Ezerskiy V.A., Monastyrev P.V. Poterya massy mineralovatnykh plit v usloviyakh ekspluatatsionnykh vozdeystviy // Krovel'nye i izolyatsionnye materialy. – 2005, № 2. S. 48...49.

8. Yartsev V.P., Dorofeev A.M. Vliyanie silovykh i atmosferykh vozdeystviy na teplofizicheskie kharak-

teristiki mineralovatnykh plit // Krovel'nye i izolyatsionnye materialy. – 2010, № 4. S. 14...15.

9. Yartsev V.P., Mamontov A.A., Mamontov S.A. Eksploatatsionnye svoystva i dolgovechnost' teploizolyatsionnykh materialov // Krovel'nye i izolyatsionnye materialy. – 2013, № 1. S. 8...11.

10. Groshev A.E., Danker M.P., Bobroshov A.V., Zamolotskikh P.S. Issledovanie razlichnykh vidov naruzhnykh ograddayushchikh konstruktsiy v monolitnom domostroenii // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. – 2012, №1. S. 62...65.

11. Kornienko S.V. Temperaturnyy rezhim trekhsloynoy stenovoy paneli // Zhilishchnoe stroitel'stvo. – 2001, №9. S. 20...21.

12. Susoeva I.V., Vakhnina T.N., Titunin A.A., Asatkina J.A. The performance of composites from vegetable raw materials with changes in temperature and humidity // Magazine of Civil Engineering. – 2017, 3(71). P. 39...50.

13. Palumbo M., Navarro A., Avellaneda J., Lacasta A. M. Characterization of thermal insulation materials developed with crop wastes and natural binders // World Barcelona. – 2014. P. 1...10.

14. Lykov A.V. Teoriya sushki. – M.: Energiya, 1968.

15. Fedosov S.V., Kotlov V.G., Aloyan R.M., Yasinitskiy F.N., Bochkov M.V. Modelirovanie teplo-massoperenosa v sisteme gaz – tverdoe pri nagel'nom soedinenii elementov derevyannykh konstruktsiy. – Ch. 1.

Obschchaya fiziko-matematicheskaya postanovka zadachi // Stroitel'nye materialy. – 2014, № 7. S.86...91.

16. Lykov A.V., Mikhaylov Yu.A. Teoriya teplo- i massoperenosa. – M.–L.: Gosenergoizdat, 1963.

17. Kreith F., Manglik R.M., Bohn M.S. Principles of heat transfer. 7 edition. – Cengage Learning, 2010.

18. Incropera F., DeWitt D. Fundamentals of heat and mass transfer. 6 edition. – New York: Wiley, 2007.

19. Rudobashta S.P. Massoperenos v sistemakh s tverdoy fazoy. – M.: Khimiya, 1980.

20. Azarov V.I., Burov A.B., Obolenskaya A.B. Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov. – SPb., 1999.

21. Grunin Yu.B., Grunin L.Yu., Sheveleva N.N., Masas D.S., Fedosov S.V., Kotlov V.G. Kharakter izmeneniya nadmolekulyarnoy struktury tsellyulozy v protsesse ee uvlazhneniya // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2017, №2. S. 233...237.

22. Grunin Yu.B., Grunina T.Yu., Ivanova M.S., Fedosov S.V., Kotlov V.G. Izuchenie metodom YaMR-1N-relaksatsii kharaktera nadmolekulyarnykh perestroek khlopkovoy tsellyulozy v rezul'tate ee biokhimicheskoy degradatsii // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2019, № 5. S.124...130.

Рекомендована кафедрой лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств КГУ. Поступила 16.12.20.