

19. Sposob modifitsirovaniya betona kompleksnoj dobavkoj, vklyuchayushchej gidrotermal'nye nanochasticy SiO₂ i mnogoslojnye uglerodnye nanotrubki: patent RF №2750497, СРК S04V 28/04, S04V 14/06, S04V 24/04, B82Y 30/00 / V.V. Potapov, E.N. Polonina, S.N. Leonovich, S.A. ZHdanok. - № 2020138511; zayavl. 23.11.2020; data publikacii 28.06.2021g.

20. ZHdanok, S.A. Modifikaciya cementnyh betonov dobavkami, soderzhashchimi nanorazmernye materialy / S.A. ZHdanok, V.V. Potapov, E.N. Polonina, S.N. Leonovich // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. - 2020. - Tom 93, №3 (maj-iyun'). –С. 669-673.

21. Polonina, E.N. Mekhanizm povysheniya prochnosti cementno-vodnyh obrazcov, modifitsirovannyh nanochasticami SiO₂ i MUNT / E.N. Polonina, V.V. Potapov, S.A. ZHdanok, S.N. Leonovich // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. - 2021. - Tom 94, №1 (yanvar'-fevral'). –С. 72-83.

22. Polonina, E.N. Tekhnologiya betona, modifitsirovannogo kompleksnoj dobavkoj gidrotermal'nogo nanokremnezema i mnogoslojnyh uglerodnyh nanotrubok/ E.N. Polonina // Vestnik BrGTU. Stroitel'stvo i arhitektura. - 2021. - №2 (125). – S. 27-34.

23. Polonina, E.N. Primenenie metoda nanoindentirovaniya dlya izucheniya struktury modifitsirovannogo cementnogo kamnya / E.N. Polonina, O. Lahayne, J. Eberhardsteiner, V.V. Potapov, S.A. ZHdanok, S.N. Leonovich // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. - 2021. Tom 94, №5 – С.1221-1234

24. ZHdanok, S. A. Sinergeticheskoe vliyanie nanochastic SiO₂ i uglerodnyh nanotrubok na svojstva betona / S. A. ZHdanok, S. N. Leonovich, E. N. Polonina // Dokl. Nac. akad. nauk Belarusi. – 2022. – Т. 66, № 1. – S. 109–112. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112>

25. Kovshar, S.N. Ocenka sedimentacionnoj ustojchivosti kompleksnoj nanodobavki/ S.N. Kovshar, E.N. Polonina, S.A. ZHdanok, S.N. Leonovich // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal. - 2022. Tom 95, №4 –С. 969-976.

УДК 691: 035.267

ТЕПЛО- И ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ И МИНЕРАЛЬНЫХ ВОЛОКОН

С. А. Романовский¹, А. А. Бакатович²

¹ *Магистр технических наук, ассистент кафедры строительного производства Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Беларусь, e-mail : s.romanovskiy@psu.by*

² *К. т. н., доцент, доцент кафедры строительного производства Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой, Новополоцк, Беларусь, e-mail : a.bakatovich@psu.by*

Реферат

Рассмотрены результаты исследований тепло- и гидрофизических характеристик теплоизоляционных плит, полученные на основе структурообразующего сырья растительного происхождения - очесов или волокон льна, а также мине-

раловатных утеплителей, содержащих базальтовые или стеклянные волокна. Определены показатели сорбционной влажности теплоизоляционных материалов при относительной влажности воздуха 40–97%. Установлены коэффициенты паропроницаемости теплоизоляционных плит. Приведены сведения об испытаниях экспериментальных материалов в климатической камере. Полученные экспериментальные данные подтверждают эффективность использования растительных волокон в качестве структурообразующего материала для тепловой изоляции зданий.

Ключевые слова: теплоизоляционный материал, очесы льна, сорбционная влажность, паропроницаемость, термическое сопротивление теплопередаче.

COMPARISON OF THERMAL AND HYDROPHYSICAL PARAMETERS OF PLANT AND MINERAL FIBER INSULATION MATERIALS

A. A. Bakatovich, S. A. Romanovskiy

Abstract

The results of studies of thermal and hydrophysical characteristics of thermal insulation boards obtained on the basis of structure-forming raw materials of plant origin - noils or flax fibers, as well as mineral wool insulation containing basalt or glass fibers are considered. The indicators of sorption humidity of thermal insulation materials at a relative humidity of 40-97% were determined. The coefficients of vapor permeability of thermal insulation boards have been established. The information about the tests of experimental materials in the climate chamber is given. The experimental data obtained confirm the effectiveness of using plant fibers as a structure-forming material for thermal insulation of buildings.

Keywords: thermal insulation material, flax noils, sorption humidity, vapor permeability, thermal resistance to heat transfer.

Введение

Растительные отходы представляют собой постоянно возобновляемые многотоннажные продукты, получаемые во всем мире. Технологии по использованию растительного сырья реализуются во многих странах для производства волокнистых теплоизоляционных материалов благодаря высоким физико-механическим показателям и экологической чистоте получаемых утеплителей. Результаты исследований, а также характеристики производимых теплоизоляционных материалов подтверждают, что композиции на растительной основе составляют конкуренцию традиционным минераловатным утеплителям.

Основным сырьем, применяемым для производства данных утеплителей, являются волокна древесины. Выпуск теплоизоляционных материалов из древесных волокон с использованием различных технологий и разнообразных связующих относится к наиболее развитым производствам.

В научной работе Л.В. Журавлевой и А.Н. Девятловской приводятся данные по исследованию мягких древесно-волокнистых плит марки М-2 [1]. При плотно-

сти 150–250 кг/м³ материал обладает теплопроводностью 0,06 Вт/(м·°С), пределом прочности при изгибе 0,5– 1,2 МПа, влажностью 12% и водопоглощением 30%.

Получению теплоизоляционных плит малой плотности из древесного волокна на основе связующего природного происхождения посвящены исследования ученых Сибирского государственного аэрокосмического университета. В виде заполнителя применяется древесное волокно, в качестве связующего используется биоклей. Результаты исследований указывают на возможность получения утеплителя средней плотностью 50 до 100 кг/м³ из древесных волокон сухим способом [2].

Древесноволокнистые плиты в Республике Беларусь производят под торговой маркой «BELTHERMO» [3]. Теплоизоляционный материал включает следующие компоненты: древесное волокно из лесоматериалов хвойных пород – 94%, смола на пенополиуретановой основе быстрого отверждения без формальдегида – 5% и парафин – 1%. При плотности 110–200 кг/м³ утеплитель обеспечивает коэффициент теплопроводности 0,038–0,042 Вт/(м·°С) и прочность на сжатие при 10% деформации 60–150 кПа.

Состав теплоизоляционного материала на основе вторичной волокнистой массы разработан А.В. Ермолиной и П.В. Мироновым. В качестве основы для плит использовалась волокнистая масса, полученная из тарного картона путем механического размола, а поливинилацетатный клей (ПВА) применяли в виде связующего [4]. Теплопроводность утеплителя при 5%-ой влажности равна 0,049–0,051 Вт/(м·°С), прочность на сжатие при 10%-ой линейной деформации 0,03 МПа, предел прочности при статическом изгибе 0,13 МПа, предел гигроскопичности 26,9% при плотности 69,2 кг/м³.

Следует отметить, что кроме волокон древесного происхождения в строительной индустрии предлагается использовать различные растительные волокна.

Инновационной разработкой являются теплоизоляционные плиты из мха-сфагнома и жидкого стекла [5]. При плотности 155–170 кг/м³ коэффициент теплопроводности составляет 0,034–0,04 Вт/(м·°С). Однако, утеплителю на основе мха присущ недостаток – значительные усадочные деформации материала в процессе сушки. Для устранения данной проблемы предложено вводить дроблёную солому в количестве 20–30% от массы мха [6]. Новый теплоизоляционный материал обладает теплопроводностью 0,044–0,046 Вт/(м·°С), обеспечивает прочность на сжатие 0,2–0,21 МПа при средней плотности 156–190 кг/м³.

Возможность применения волокон эвкалипта в виде заполнителя для утеплителя исследовали в Чили [7]. Связующим являлась фенольная смола. При плотности от 80 кг/м³ до 250 кг/м³ теплопроводность плит равна 0,05–0,07 Вт/(м·°С).

В Туркменистане и других странах центральной Азии значительный интерес вызывает использование отходов хлопкового производства и натриевого жидкого стекла для получения теплоизоляционного материала. При варьировании плотности от 40 кг/м³ до 100 кг/м³ теплопроводность изменяется в пределах 0,037–0,041 Вт/(м·°С) [8].

Немецкая фирма Hock GmbH & Co. KG выпускает теплоизоляционные плиты «Thermo-Hanf» на основе волокон конопли [9, 10]. Утеплитель включает следующие компоненты: 83–87% волокнистый заполнитель, 10–12% полиэстер,

3–5% сода, применяемая в качестве антипирена. Теплоизоляционный материал обладает коэффициентом теплопроводности 0,038–0,04 Вт/(м·°С) при плотности 35–40 кг/м³.

Наиболее известным производимым утеплителем из кокосовых волокон являются плиты торговой марки «Vauplit Cocos», на 85% состоящие из кокосового волокна и 15% из полиэфирных волокон. При средней плотности материала 30 кг/м³ коэффициент теплопроводности достигает 0,038–0,042 Вт/(м·°С) [11].

Состав утеплителя на основе банановых волокон разработан в Вест-Индском университете. Коэффициент теплопроводности плит при плотности 71 кг/м³ составляет 0,041 Вт/(м·°С) [12].

На кафедре машиностроения Технологического университета PETRONAS проводились исследования по изучению возможности применения волокон коры масличной пальмы в качестве теплоизоляционного материала [13]. По результатам испытаний установлено, что при варьировании средней плотности от 66 кг/м³ до 110 кг/м³ теплопроводность утеплителя изменяется в пределах 0,03–0,09 Вт/(м·°С).

Также выполнялись исследования по получению теплоизоляционных плит из волокон коры масличной пальмы длиной до 4 см и натриевого жидкого стекла в Полоцком университете [14]. Для повышения водостойкости связующего применялись добавки из извести и гипса. Теплоизоляционный материал имеет плотность 135–168 кг/м³, обладая коэффициентом теплопроводности 0,046–0,047 Вт/(м·°С) и обеспечивает прочность на сжатие при 10% линейной деформации 0,2–0,24 МПа.

В Беларуси выпускают теплоизоляционные плиты торговой марки «Акотерм флак» [15]. Утеплитель содержит 85% льняных волокон и 15% полиэфирных волокон. Теплопроводность материала характеризуется показателем 0,038–0,04 Вт/(м·°С), коэффициент паропроницаемости равен 0,4 мг/м·ч·Па, звукопоглощение составляет 0,98 при плотности 30 кг/м³.

Утеплитель из льняных волокон «Экотеплин» производят в России. Заполнителем в плитах являются льняные волокна. В качестве связующего используется крахмал. Для повышения огнезащиты и предотвращения возникновения плесени и грибков добавляются соли бора [16]. Теплоизоляционный материал имеет следующие показатели: средняя плотность 32–34 кг/м³, коэффициент теплопроводности 0,038–0,04 Вт/(м·°С), коэффициент звукопоглощения 0,74–0,98, коэффициент паропроницаемости 0,403 мг/м·ч·Па, группа горючести Г1.

В настоящее время в лабораториях кафедры строительного производства Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой проводятся комплексные исследования по разработке теплоизоляционных плит со структурообразующим материалом из очесов льна и модифицированного жидкого стекла [17, 18]. Полученные утеплители при плотности 60–100 кг/м³ обеспечивают теплопроводность в пределах 0,035–0,04 Вт/(м·°С). Для сравнения исследуются физические характеристики плит на основе льняных, базальтовых и стеклянных волокон. Применение льняных очесов для изготовления утеплителей решает проблему утилизации растительных отходов льнопереработки и расширяет номенклатуру эффективных теплоизоляционных материалов безопасных для окружающей среды и здоровья человека.

Целью проведенных комплексных исследований является определение тепло- и гидрофизических показателей утеплителей из очесов или волокон льна, а также материалов на основе минеральных волокон и проверка эффективной работы исследуемых материалов в качестве тепловой изоляции при температурно-влажностных режимах, максимально соответствующих условиям эксплуатации.

Материалы и методика испытаний.

Для изготовления теплоизоляционных плит в качестве структурообразующего материала использовали льняные очесы длиной от 5 до 10 см и волокна льна длиной до 25 см, полученные на льнозаводах Витебской, Могилевской и Гродненской областей Республики Беларусь. Очесы льна, применяемые в испытаниях, представляют собой льняные волокна, непригодные для производства текстиля и перешедшие после первичной обработки льняной тресты в отходы трепания.

В экспериментальных составах теплоизоляционных материалов связующим компонентом являлось жидкое натриевое стекло, производимое на ОАО «Домановский производственно-торговый комбинат», соответствующее требованиям ГОСТ 13078 [19].

Для обеспечения нерастворимости жидкого стекла после затвердевания в качестве модифицирующих добавок использовали строительную гидратную известь без добавок II сорта производства ОАО «Забудова» по СТБ EN 459-1 [20] и строительный гипс, изготовленный на ПТ ООО «Тайфун», соответствующий требованиям ГОСТ 125–2018 [21].

Образцы утеплителей на основе очесов льна или льняных волокон для исследований изготавливали, соблюдая определенную последовательность выполнения технологических операций. Предварительно производили дозировку компонентов. Для получения модифицированного вяжущего в жидкое стекло вводили сначала известь и перемешивали до однородной консистенции, а затем добавляли гипс. После распределения вяжущего по поверхности волокон структурообразующего материала и формовки образцы утеплителей выдерживали в форме 6 часов при температуре 20 ± 2 °С, а затем высушивали в течение 4 часов в сушильном шкафу при температуре 45–55 °С.

Образцы на основе базальтовых волокон вырезали из теплоизоляционных плит «Белтеп», для получения материала, содержащего стеклянные волокна, использовали утеплитель «Isover».

Значения сорбционной влажности теплоизоляционных материалов определяли согласно СТБ EN 12088 «Изделия строительные теплоизоляционные. Метод определения сорбционного увлажнения» [22].

Паропроницаемость образцов утеплителей определяли в соответствии с СТБ EN 12086 «Изделия строительные теплоизоляционные. Метод определения паропроницаемости» [23].

Теплофизические свойства теплоизоляционных плит в климатической камере исследовали, применяя информационно-измерительный комплекс «РТП-1-32Т». Температура окружающего воздуха на поверхности и внутри исследуемых материалов фиксировали при помощи термопар, а значения теплового потока измеряли, используя преобразователи теплового потока. Схема расположения датчиков и методика проведения исследований приведены в основной части данной статьи.

Для изучения распределения влажности в экспериментальных плитах предварительно по толщине утеплителей вырезали образцы-призмы размером в поперечном сечении 50×50 мм. Призму по поперечному сечению разрезали на образцы (слои) толщиной по 25мм. Далее каждый образец взвешивали и помещали в сушильный шкаф. По достижении постоянной массы фрагменты снова взвешивали. Влажность определяли по величине изменения массы образцов до и после высушивания по ГОСТ 17177 [24].

Основная часть. Сорбционная влажность

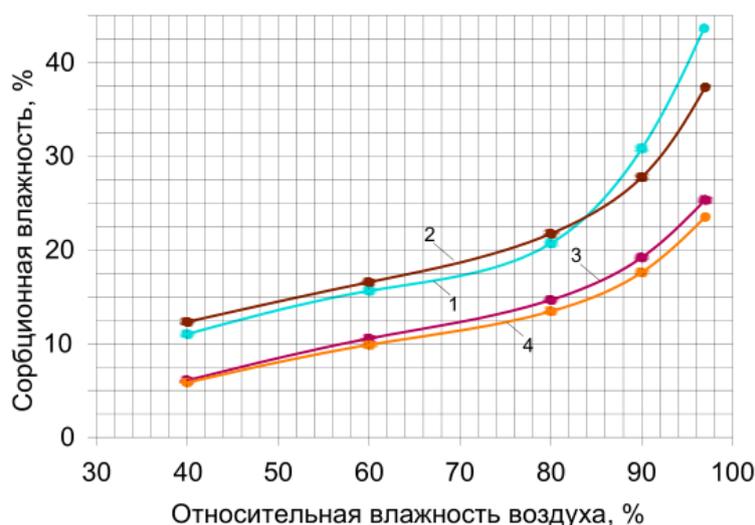
Исследование сорбционной влажности утеплителей на основе очесов (состав 1) или волокон (состав 2) льна проводили на образцах, отобранных из материалов со средней плотностью 100 кг/м³. Количественный состав и средняя плотность теплоизоляционных плит в сухом состоянии представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Количественный состав и плотность теплоизоляционных материалов

№ состава	Расход компонентов на 1 м ³ , кг					Средняя плотность, кг/м ³
	очесы льна	волокно льна	жидкое стекло	известь	гипс	
1	90	-	9	0,5	0,5	100
2	-	90	9	0,5	0,5	100

Также в испытаниях использовали образцы утеплителей на основе базальтовых волокон (состав 3) плотностью 110 кг/м³ и стеклянных волокон (состав 4) плотностью 100 кг/м³.

Построенные зависимости сорбционной влажности экспериментальных материалов от относительной влажности воздуха по результатам исследований в виде изотерм сорбции представлены на рисунке 1.



Составы материалов на основе: 1 – льняных очесов; 2 – льняных волокон; 3 – базальтовых волокон; 4 – стеклянных волокон

Рисунок 1. – Изотермы сорбции водяного пара

Из приведенных данных (рис. 1) установлено, что сорбционная влажность образцов на основе очесов льна (состав 1) при влажности воздуха 40% состав-

ляет 11,2%, что в 1,8–1,9 раза превышает значение материалов из базальтовых (состав 3) и стеклянных (состав 4) волокон и ниже показателя образцов на основе волокон льна (состав 2) на 9%.

При влажности воздуха 60% величина сорбционной влажности утеплителей из льняных очесов (состав 1) выше значений плит «Белтеп» (состав 3) и «Isover» (состав 4) в 1,6 и 1,7 раза соответственно.

Поглощение водяных паров утеплителями из базальтовых (состав 3) и стеклянных (состав 4) волокон при относительной влажности воздуха 80% составляет 14,4% и 13,3% соответственно. Сорбционная влажность материалов на основе очесов (состав 1) выше показателей образцов (составы 3 и 4) в 1,4 и 1,5 раза соответственно и практически совпадает со значением утеплителей из волокон льна (состав 2).

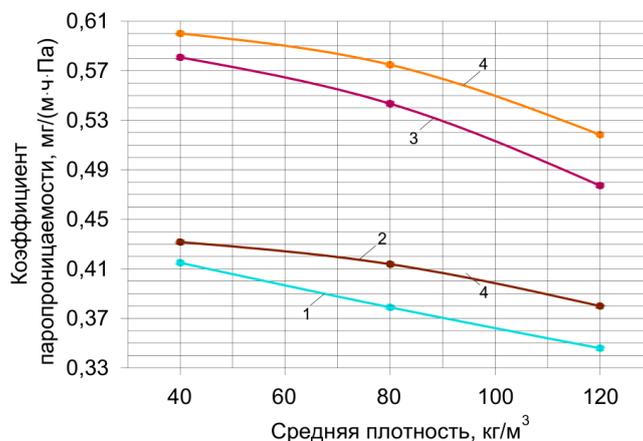
Показатели сорбционной влажности образцов (составы 2–4) меньше в 1,1–1,7 раза в сравнении со значениями материалов на основе очесов льна (состав 1), равным 30,6% при относительной влажности воздуха 90%.

Сорбционная влажность утеплителей (состав 1) при относительной влажности воздуха 97% превышает показатели теплоизоляционных материалов из волокон льна (состав 2) на 16%, образцов «Белтеп» (состав 3) в 1,7 и материалов «Isover» (состав 4) в 1,8 раза.

Существенное отличие значений сорбционной влажности утеплителей из очесов льна (состав 1) относительно показателей теплоизоляционных материалов (составы 3, 4) при относительной влажности воздуха от 90 до 97% обусловлено значительной величиной сорбционной влажности самих льняных очесов. Как показали исследования оптической микроскопии очесы льна представляют собой элементарные волокна, имеющие форму полой трубки диаметром 8–12 мкм [25]. Таким образом, льняные очесы имеют большую геометрическую площадь контакта поверхности с внешней средой, что и обуславливает повышенную сорбцию влаги из окружающей среды.

Паропроницаемость

Паропроницаемость исследуемых утеплителей определяли на образцах размером 110×110×50 мм и средней плотностью от 40 до 120 кг/м³. На рисунке 2 приведены зависимости коэффициента паропроницаемости от плотности теплоизоляционных плит.



Составы утеплителей на основе: 1 – льняных очесов; 2 – льняных волокон; 3 – базальтовых волокон; 4 – стеклянных волокон

Рисунок 2. – Зависимость коэффициента паропроницаемости теплоизоляционных материалов от средней плотности

По результатам исследований (рис. 2) установлено, что материалы из очеса льна (состав 1) обеспечивают более низкий коэффициент паропроницаемости, чем теплоизоляционные плиты на основе льняных, базальтовых и стекловолокон (составы 2–4).

При минимальном значении средней плотности 40 кг/м^3 показатели паропроницаемости образцов из очесов льна (состав 1) и материалов на основе льняных волокон (состав 2) составляет $0,41$ и $0,43 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$ соответственно, что в $1,4$ и $1,5$ раза ниже значений утеплителей «Белтеп» и «Isover» (составы 3 и 4).

Прирост средней плотности до 80 кг/м^3 приводит к снижению паропроницаемости теплоизоляционных материалов для всех образцов. Так, для плит из льняных очесов (состав 1) коэффициент паропроницаемости снижается до $0,37 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$, что в $1,4$ и $1,5$ раза ниже показателей утеплителей (состав 3 и 4) и на 10% меньше значения образцов на основе льняных волокон (состав 2).

Коэффициент паропроницаемости теплоизоляционных плит из очесов льна (состав 1) равен $0,34 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$ при средней плотности 120 кг/м^3 . Паропроницаемость утеплителей на основе очесов (состав 1) при данной плотности на 11% меньше показателя материалов из льняных волокон (состав 2) и в $1,3$ и $1,5$ раза ниже показателей плит на основе базальтовых и стеклянных волокон (составы 3 и 4).

Анализ экспериментальных данных позволил выявить зависимость влияния плотности исследуемых волокнистых утеплителей на коэффициент паропроницаемости. Определено, что с повышением средней плотности теплоизоляционных материалов происходит постепенное уменьшение значения паропроницаемости. Установлено, что исследуемый параметр утеплителей (составы 1–4) при плотности 40 кг/м^3 уменьшается в $1,1$ – $1,2$ раза при возрастании плотности до 120 кг/м^3 .

Испытания в климатической камере

Образцы теплоизоляционных плит размером $300\times 200\times 100$ мм помещали между теплым и холодным отделением климатической камеры. Количественный состав и плотность образцов соответствовала материалам испытаний по определению сорбционной влажности. Коэффициент теплопроводности плит в сухом состоянии составлял: образец 1 на основе льняных очесов – $0,038 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, образец 2 из волокон льна – $0,045 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, образец 3, содержащий базальтовые волокна, – $0,042 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, образец 4 из стеклянных волокон – $0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Предварительно образцы выдерживали в климатической камере на протяжении трёх недель при температуре воздуха 18 °C и относительной влажности воздуха 50 – 60% .

Во время проведения испытаний в холодном отделении климатической камеры температуру (t_n) варьировали от 0°C до -25°C с шагом 5°C . Образцы выдерживали при каждом значении температуры в течении 120 часов. В теплом отделении камеры температура воздуха поддерживалась на постоянном уровне 18°C и относительной влажности воздуха в пределах 50 – 60% . Изменение температур в утеплителях начинали фиксировать при 0°C в холодном отделении камеры. Для определения температур в толще материала (рис. 3) каждый образец условно разделяли на 4 участка толщиной по 25 мм и на границах данных участков устанавливали датчики термодатчиков.

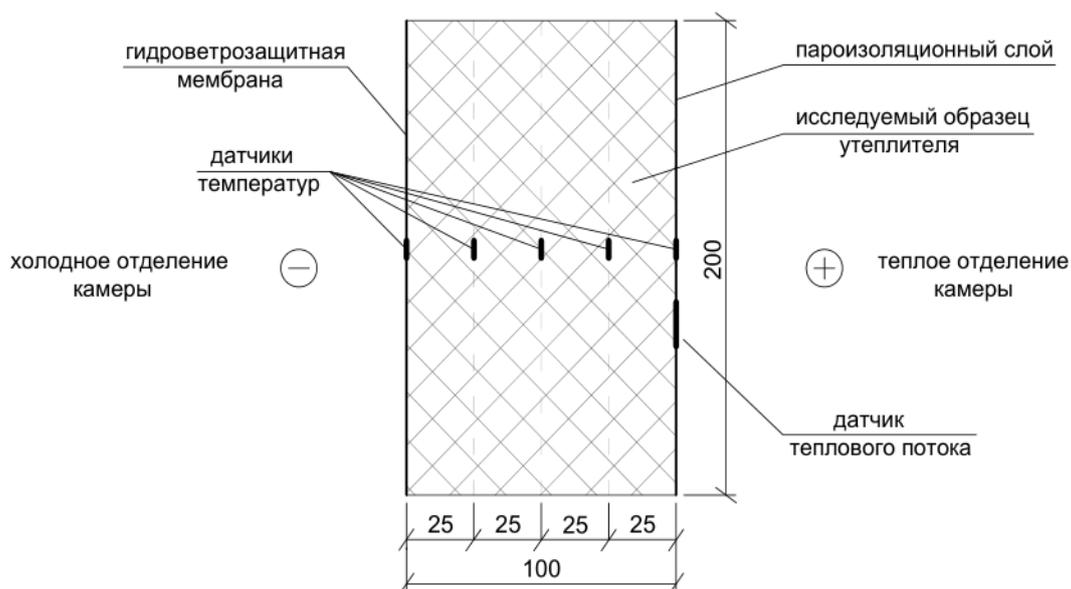


Рисунок 3. – Схема расположения датчиков на поверхности и внутри теплоизоляционных материалов

Первоначально ставилась задача исследовать работу и состояние образцов без установки защитных мембран. После проведения полного цикла испытаний в структуре образцов выявили образование льда. Толщина слоя льда в структуре экспериментальных утеплителей со стороны холодного отделения климатической камеры составила от 12 до 16 мм. Присутствие льда в теплоизоляционных плитах недопустимо, так как снижает теплофизические свойства и отрицательно влияет на долговечность утеплителей, что может привести к разрушению материала. На следующем этапе испытания, с целью устранения данной проблемы, для защиты материалов от внешней влаги и потоков холодного воздуха со стороны холодного отделения камеры устанавливалась гидроветрозащитная мембрана. А со стороны теплого отделения фиксировали пароизоляционный слой для предотвращения прохождения насыщенных воздушных паров из помещения.

В процессе исследований значения температур фиксировали круглосуточно. Проведенные исследования позволили получить данные о распределении температур на поверхности и по толщине образцов теплоизоляционных плит. На основании полученных данных определены коэффициенты теплопроводности и термические сопротивления теплопередач образцов при заданных значениях температур наружного воздуха. Результаты экспериментальных и расчетных данных представлены в таблице 2.

На основании полученных данных (табл. 2) установлено, что при температуре 0°C в холодном отделении климатической камеры плотность теплового потока через плиту из очесов льна (образец 1) составляет $10,34 \text{ Вт/м}^2$, что незначительно меньше, чем у образцов 3 и 4 на основе базальтовых и стеклянных волокон и на 10% ниже значения утеплителя (образце 2) из волокон льна. Постепенное снижение температуры до -25°C приводит к повышению плотности теплового потока экспериментальных материалов (образцы 1–4) в 1,7–1,8 раза. Исследуемый показатель при температуре -25°C для утеплителя на основе льняных очесов (образец 1) равен 18 Вт/м^2 , что на 10–17% ниже значений образцов 2–4.

Таблица 2 – Теплотехнические характеристики теплоизоляционных плит по результатам эксперимента и расчетным данным

Температура наружного воздуха, °С	Плотность теплового потока, Вт/м ²				Термическое сопротивление теплопередаче, (м ² ·°С)/Вт				Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)			
	образец 1	образец 2	образец 3	образец 4	образец 1	образец 2	образец 3	образец 4	образец 1	образец 2	образец 3	образец 4
0	10,34	11,43	11,04	10,96	1,52	1,28	1,33	1,35	0,066	0,078	0,075	0,074
-5	12,54	13,82	13,38	13,18	1,61	1,37	1,43	1,47	0,062	0,073	0,07	0,068
-10	14,15	15,78	15,44	15,1	1,75	1,49	1,52	1,59	0,057	0,067	0,066	0,063
-15	15,56	17,98	17,26	16,91	1,89	1,56	1,61	1,69	0,053	0,064	0,062	0,059
-20	16,53	19,59	18,51	18,17	2,04	1,67	1,72	1,79	0,049	0,06	0,058	0,056
-25	18,00	20,99	20,39	20,02	2,13	1,75	1,81	1,89	0,047	0,057	0,055	0,053

Термическое сопротивление теплопередаче образца 1 при температуре воздуха -25°C в холодном отделении камеры равно $2,13 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$ и превышает величину экспериментальных плит (образцы 2–4) на 13–22%. Относительно показателей при температуре 0°C в холодном отделении климатической камеры прирост термического сопротивления всех утеплителей (образцы 1–4) при достижении максимальной отрицательной температуры составляет 36–40%.

Коэффициент теплопроводности материала из очесов льна (образец 1) при температуре воздуха 0°C в холодном отделении климатической камеры ниже показателей утеплителей (образцы 2–4) на 11–18%. Значения теплопроводности образцов при температуре воздуха -25°C понизились на 27–29% по сравнению с показателями при температуре 0°C в холодном отделении камеры. При температуре -25°C коэффициент теплопроводности образца 1 составляет $0,047 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, что на 11–18% превышает значения плит (образцы 2–4), равные $0,053\text{--}0,057 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$.

Таким образом, повышение плотности теплового потока, термического сопротивления и снижения коэффициента теплопроводности при понижении температуры воздуха подтверждают эффективную работу исследуемых теплоизоляционных плит, включая тепловую изоляцию из очесов льна.

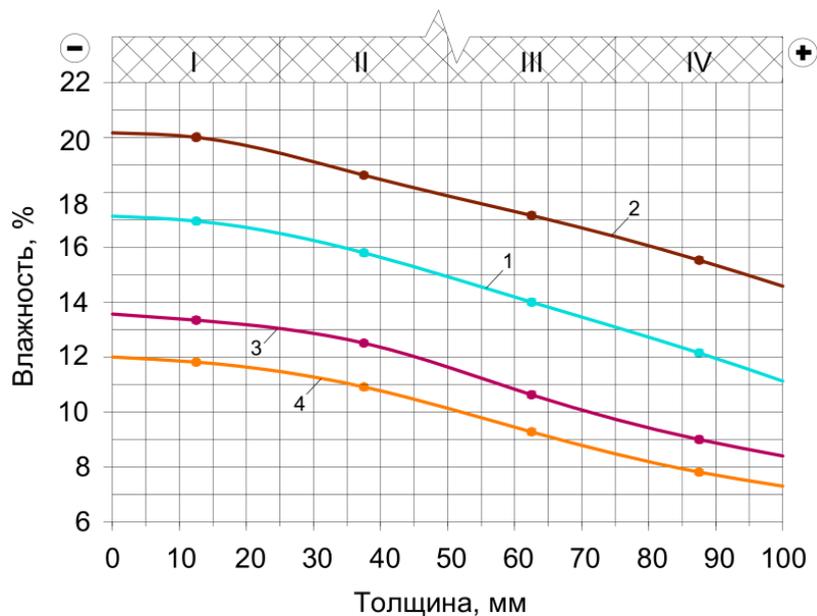
По окончании проведения испытаний по определению теплофизических показателей утеплителей на основе волокон растительного происхождения, а также минераловатных плит, определены значения влажности указанных теплоизоляционных материалов. Изменение влажности по толщине исследуемых образцов представлено на рисунке 4.

Из полученных зависимостей (рис. 4) следует, что среднее значение влажности утеплителей из очесов льна по толщине материала (образец 1) составляет 14,6%, что на 18% ниже величины теплоизоляционного материала на основе волокон льна (образец 2). Прирост среднего значения влажности образца 1 относительно показателей влажности плит «Белтеп» (образец 3) и «Isover» (образец 4) составляет 29% и 47%.

Влажность утеплителя из льняных очесов (образец 1) в слое IV достигает 12,2%, что меньше значения плит на основе волокон льна (образец 2) на 21%

и превышает показатели теплоизоляционных материалов из базальтовых (образец 3) и стеклянных волокон (образец 4) в 1,35–1,5 раза.

В слое I влажность всех образцов повышается в 1,3–1,5 раза и достигает максимальных значений. При этом, влажность утеплителей, содержащих очесы льна (образец 1), на 15% ниже показателей образца 2, равного 20% и превышает влажность плит «Белтеп» (образец 3) и «Isover» (образец 4) на 28% и 44% соответственно.



I-IV – слои в образце материала
 Образцы из: 1 – очесов; 2 – волокон льна; 3 – смеси льняных и полиэфирных волокон;
 4 – базальтовых волокон; 5 – стекловолокон

Рисунок 4 – Распределение влажности по толщине теплоизоляционных плит

Заключение

По итогам испытаний сорбционной влажности эксикаторным методом установлено, что при относительной влажности воздуха 60% сорбционная влажность утеплителя из льняных очесов равна 15,6%, что практически совпадает со значением образцов на основе волокон льна и превышает в 1,6–1,7 раза показатели материалов, содержащих базальтовые и стеклянные волокна. Дальнейшее увеличение влажности воздуха до 97% вызывает прирост сорбционной влажности образцов из очесов в 2,8 раза до 43,5%, что выше значения утеплителей на основе льняных волокон на 16%, образцов «Белтеп» в 1,7 раза и материалов «Isover» в 1,8 раза.

Полученные данные по кинетике сорбции водяных паров теплоизоляционными плитами позволяют рассчитывать влажностный режим ограждающих конструкций. Также, для выполнения расчетов влажностного режима ограждающих конструкций определена паропроницаемость теплоизоляционных экспериментальных материалов. При средней плотности 40–120 кг/м³ паропроницаемость утеплителей на основе очесов находится в пределах от 0,34 до 0,41 мг/(м·ч·Па), что незначительно меньше показателей плит из волокон льна и ниже значений материалов, содержащих минеральные волокна, в 1,3–1,5 раза.

В результате проведенных исследований установлено, что теплоизоляционные плиты «Белтеп» и «Isover» имеют близкие значения влажности. Более низкая влажность изоляции в указанных материалах относительно значений плит на основе очесов льна обусловлена присутствием в утеплителях минеральных волокон, обладающих низкой сорбцией водяных паров из воздуха по сравнению с очесами льна. Однако, не смотря на более высокую влажность, при температуре воздуха $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ термическое сопротивление утеплителя на основе льняных очесов во влажном состоянии составляет $2,13\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$, что превышает показатели материалов из льняных и минеральных волокон на 13–22%. В итоге, при температурно-влажностном режиме, максимально близким к условиям эксплуатации, коэффициент теплопроводности образцов на основе очесов льна равен $0,047\text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, что ниже значений плит, содержащих льняные, базальтовые или стеклянные волокна на 11–18%.

Список цитированных источников

1. Журавлева, Л.Н. Мягкие древесноволокнистые плиты – теплоизоляционный материал / Л.Н. Журавлева, А.Н. Девятловская // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 11. – С. 181–184.
2. Стрикун, В.В. Получение теплоизоляционного материала из древесного волокна на основе биоклея / В.В. Стрикун, М.А. Баяндин, А.В. Намятов, В.Н. Ермолин // Актуальные проблемы лесного хозяйства. – 2017. – № 48. – С. 86–87.
3. Толстик, Ю.В. Теплоизоляционные древесноволокнистые плиты: сравнительный анализ основных свойств и перспективы развития / Ю.В. Толстик, И.К. Божелко, А.А. Титунин // Материалы IV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса». Кострома, 8-11 сентября 2021 г. / «Костромской государственной университет», 2021. – С. 95–97.
4. Ермолина, А.В. Получение и свойства теплоизоляционного материала на основе вторичной волокнистой массы / А.В. Ермолина, П.В. Миронов // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2011. – № 4. – С. 109–114.
5. Bialosau, A. Materiais compostos para isolamento termico de materias-primas naturais e aglutinantes minerais / A. Bakatovich, F. Gaspar // Livro de Resumos 3^o Congresso Luso – Brasileiro de Materiais de construcao sustentaveis. Coimbra, Portugal. – 2018. PP. 16 – 27.
6. Бакатович, А.А. Микроструктура как основной критерий, определяющий использование мха сфагнума в качестве заполнителя для эффективного плитного теплоизоляционного материала / А.А. Бакатович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 8. – С. 42–46.
7. Vecerra, C. A new biobased composite material using bark fibres eucalyptus / C. Vecerra, J. Montory // The 13th pacific rim bio-based composites symposium «Bio-based composites for a sustainable future, Chile. – 2016. PP. 46–50.
8. Rozyev, M. Thermal insulation material, using waste cotton production as a placeholder / M. Rozyev, A. Bakatovich // XI Junior Researchers' Conference. European & national dimension in research. Architecture and civil engineering. Polotsk state University. Novopolotsk, PSU, 2019. – № 11. – P. 64–66.

9. Богатова, Т.В. Преимущества и особенности безопасных природных утеплителей / Т.В. Богатова, А.И. Двойцына // Инженерные сети и сооружения. ISSN 2074-188X. – 2016. – № 3–4 (24–25). – С. 14–19.
10. Якунина, Е.А. Современные теплоизоляционные материалы, как одна из тенденций экологического строительства / Е.А. Якунина // Синергия наук. – 2018. – № 24. – С. 625–634.
11. Крыласова, Е.А. «Зеленые технологии» в архитектуре / Е.А. Крыласова, Е.В. Смирнова // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 4-6. – С. 793–796.
12. Manohar K. A Comparison of Banana Fiber Thermal Insulation with Conventional Building Thermal Insulation / K. Manohar, A. Adeyanju // British Journal of Applied Science & Technology. – 2016. – № 17 (3). – Pp. 1–9.
13. Hassan, S. Comparison study of thermal insulation characteristics from oil palm fibre / S. Hassan, A. Tesfamichael, M. Mohd Nor // MATEC Web of Conferences. ICPEER 2014 - 4th International Conference on Production, Energy and Reliability. – 2014. – Volume 13. – P. 5.
14. Romanovskiy, S., Insulating material on the basis of bark fibre of the olive palm tree / S. Romanovskiy, A. Bakatovich // European and National Dimension in Research: IX Junior Researchers' Conference, Novopolotsk, April 26–27, 2017: in 3 p. // Polotsk State University. – Novopolotsk, PSU, 2017. – P. 3. – P. 104–107.
15. ТУ ВУ 391129716.001-2015. Плиты теплоизоляционные звукопоглощающие. Технические условия – Введ. 27.07.2015. Ореховск. 2015. 10 с.
16. Советников Д.О., Семашкина Д.О., Баранова Д.В. Оптимальная толщина утеплителя наружной стены для создания энергоэффективного и экологичного здания в условиях Санкт-Петербурга // Строительство уникальных зданий и сооружений. ISSN 2304-6295. – 2016. – № 12 (51). – С. 7–19.
17. Романовский, С.А. Степень влияния факторов на основные физико-механические показатели теплоизоляционных плит из очёсов льна / С.А. Романовский, А.А. Бакатович // Вест. Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Прикладные науки. Строительство. – 2018. – № 16. – С. 56-61.
18. Romanovskiy, S. Bakatovich, A. Physical parameters of insulation with a structure-forming material from flax noils // E3S Web of Conferences 212, 02014 (2020), 2020 International Conference on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control (ICBTE 2020) : doi.org/10.1051/e3sconf/202021202014.
19. Стекло натриевое жидкое. Технические условия: ГОСТ 13078-81. – Введ. 01.01.1982. – М. :Стандартинформ. – 2005. – 14 с.
20. Известь строительная. Часть 1. Определения, требования и критерии соответствия : СТБ EN 459-1-2007. – Введ. 30.01.2007. – Минск. : Минстройархитектуры Республики Беларусь. – 2007. – 26 с.
21. Вяжущие гипсовые. Технические условия : ГОСТ 125–2018. – Взамен ГОСТ 125–79 ; Введ. 01.05.2019. – Москва. : Стандартинформ. – 2018. – 10 С.
22. Изделия строительные теплоизоляционные. Метод определения сорбционного увлажнения : СТБ EN 12088–2018. – Взамен СТБ EN 12088-2008 ; Введ. 01.07.2017. – Минск. : Минстройархитектуры Республики Беларусь. – 2016. – 12 с.
23. Изделия строительные теплоизоляционные. Метод определения паропроницаемости : СТБ EN 12086–2016. – Взамен СТБ EN 12086-2007 ; Введ. 01.07.2017. – РУП. Стройтехнорм. – 2016. – 20 с.

24. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний : ГОСТ 17177-94. – Введ. 22.08.1995. – Минск : Минстройархитектур. – 1996. – 56 с.

25. Романовский, С.А. Применение микроскопического анализа для оценки перспективы использования очесов волокна льна в производстве теплоизоляционного материала / С.А. Романовский, А.А. Бакатович // Вест. Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Прикладные науки. Строительство. 2017. № 8. С. 14–18

References

1. ZHuravleva, L.N. Myagkie drevesnovoloknistye plity – teploizolyacionnyj material / L.N. ZHuravleva, A.N. Devyatlovskaya // Vestnik KrasGAU. – 2010. – № 11. – S. 181–184.

2. Strikun, V.V. Poluchenie teploizolyacionnogo materiala iz drevesnogo volokna na osnove biokleya / V.V. Strikun, M.A. Bayandin, A.V. Namyatov, V.N. Ermolin // Aktual'nye problemy lesnogo hozyajstva. – 2017. – № 48. – S. 86–87.

3. Tolstik, YU.V. Teploizolyacionnye drevesnovoloknistye plity: sravnitel'nyj analiza osnovnyh svojstv i perspektivy razvitiya / YU.V. Tolstik, I.K. Bozhelko, A.A. Titunin // Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa». Kostroma, 8-11 sentyabrya 2021 g. / «Kostromskoj gosudarstvennyj universitet», 2021. – S. 95–97.

4. Ermolina, A.V. Poluchenie i svojstva teploizolyacionnogo materiala na osnove vto-richnoj voloknistoj massy / A.V. Ermolina, P.V. Mironov // IVUZ. Lesnoj zhurnal. – 2011. – № 4. – S. 109–114.

5. Bialosau, A. Materiais compositos para isolamento termico de materias-primas naturais e aglutinantes minerais / A. Bakatovich, F. Gaspar // Livro de Resumos 30 Congresso Luso – Brasileiro de Materiais de construcao sustentaveis. Coimbra, Portugal. – 2018. PP. 16 – 27.

6. Bakatovich, A.A. Mikrostruktura kak osnovnoj kriterij, opredelyayushchij ispol'zovanie mha sfagnuma v kachestve zapolnitelya dlya effektivnogo plitnogo teploizolyacionnogo materiala / A.A. Bakatovich // Vestn. Poloc. gos. un-ta. Ser. F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. – 2017. – № 8. – С. 42–46.

7. Becerra, C. A new biobased composite material using bark fibres eucalyptus / C. Becerra, J. Montory // The 13th pacific rim bio-based composites symposium «Bio-based composites for a sustainable future, Chile. – 2016. PP. 46–50.

8. Rozyev, M. Thermal insulation material, using waste cotton production as a placeholder / M. Rozyev, A. Bakatovich // XI Junior Researchers' Conference. European & national dimension in research. Architecture and civil engineering. Polotsk state University. Novopolotsk, PSU, 2019. – № 11. – P. 64–66.

9. Bogatova, T.V. Preimushchestva i osobennosti bezopasnyh prirodnyh utplitelej / T.V. Bogatova, A.I. Dvojcyina // Inzhenernye seti i sooruzheniya. ISSN 2074-188H. – 2016. – № 3–4 (24–25). – С. 14–19.

10. YAkunina, E.A. Sovremennye teploizolyacionnye materialy, kak odna iz tendencij ekologicheskogo stroitel'stva / E.A. YAkunina // Sinergiya nauk. – 2018. – № 24. – С. 625–634.

11. Krylasova, E.A. «Zelenye tekhnologii» v arhitekture / E.A. Krylasova, E.V. Smirnova // Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik. – 2017. – № 4-6. – С. 793–796.

12. Manohar K. A Comparison of Banana Fiber Thermal Insulation with Conventional Building Thermal Insulation / K. Manohar, A. Adeyanju // *British Journal of Applied Science & Technology*. – 2016. – № 17 (3). – Pp. 1–9.
13. Hassan, S. Comparison study of thermal insulation characteristics from oil palm fibre / S. Hassan, A. Tesfamichael, M. Mohd Nor // *MATEC Web of Conferences*. ICPER 2014 - 4th International Conference on Production, Energy and Reliability. – 2014. – Volume 13. – P. 5.
14. Romanovskiy, S., Insulating material on the basis of bark fibre of the olive palm tree / S. Romanovskiy, A. Bakatovich // *European and National Dimension in Research: IX Junior Researchers' Conference*, Novopolotsk, April 26–27, 2017: in 3 p. // *Polotsk State University*. – Novopolotsk, PSU, 2017. – P. 3. – P. 104–107
15. TU BY 391129716.001-2015. Plity teploizolyacionnye zvukopogloshchayushchie. Tekhni-cheskie usloviya – Vved. 27.07.2015. Orekhovsk. 2015. 10 s.
16. Sovetnikov D.O., Semashkina D.O., Baranova D.V. Optimal'naya tolshchina uteplitelya naruzhnoj steny dlya sozdaniya energoeffektivnogo i ekologichnogo zdaniya v usloviyah Sankt-Peterburga // *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*. ISSN 2304-6295. – 2016. – № 12 (51). – S. 7–19.
17. Romanovskij, S.A. Stepen' vliyaniya faktorov na osnovnye fiziko-mekhanicheskie po-kazateli teploizolyacionnyh plit iz ochyosov l'na / S.A. Romanovskij, A.A. Bakatovich // *Vest. Polockogo gos. un-ta. Seriya F, Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*. – 2018. – № 16. – S. 56-6.
18. Romanovskiy, S.Bakatovich, A. Physical parameters of insulation with a structure-forming material from flax noils // *E3S Web of Conferences* 212, 02014 (2020), 2020 International Conference on Building Energy Conservation, Thermal Safety and Environmental Pollution Control (ICBTE 2020) : doi.org/10.1051/e3sconf/202021202014.
19. Steklo natrievoe zhidkoe. Tekhnicheskie usloviya: GOST 13078-81. – Vved. 01.01.1982. – M. :Standartinform. – 2005. – 14 s.
20. Izvest' stroitel'naya. CHast' 1. Opredeleniya, trebovaniya i kriterii sootvetstviya : STB EN 459-1-2007. – Vved. 30.01.2007. – Minsk. : Minstrojarhitektury Respubliki Bela-rus'. – 2007. – 26 s.
21. Vyazhushchie gipsovye. Tekhnicheskie usloviya : GOST 125–2018. – Vzamen GOST 125–79 ; Vved. 01.05.2019. – Moskva. : Standartinform. – 2018. – 10 S.
22. Izdeliya stroitel'nye teploizolyacionnye. Metod opredeleniya sorbcionnogo uvlazhneniya : STB EN 12088–2018. – Vzamen STB EN 12088-2008 ; Vved. 01.07.2017. – Minsk. : Minstrojarhitektury Respubliki Belarus'. – 2016. – 12 s.
23. Izdeliya stroitel'nye teploizolyacionnye. Metod opredeleniya paropronicaemosti : STB EN 12086–2016. – Vzamen STB EN 12086-2007 ; Vved. 01.07.2017. – RUP. Strojtekhnorm. – 2016. – 20 s.
24. Materialy i izdeliya stroitel'nye teploizolyacionnye. Metody ispytaniy : GOST 17177-94. – Vved. 22.08.1995. – Minsk : Minstrojarhitektur. – 1996. – 56 s.
25. Romanovskij, S.A. Primenenie mikroskopicheskogo analiza dlya ocenki perspektivy ispol'zovaniya ochesov volokna l'na v proizvodstve teploizolyacionnogo materiala / S.A. Romanovskij, A.A. Bakatovich // *Vest. Polockogo gos. un-ta. Seriya F, Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*. 2017. № 8. S. 14–18.