

4. Шашкин, А. Г. Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга / А. Г. Шашкин. – М. : Академическая наука – Геомаркетинг, 2014. – 352 с.
5. Строительные нормы Республики Беларусь. Инженерные изыскания для строительства : СН 1.02.01-2019. – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 113 с.
6. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. – М. : Стройиздат, 1975. – 156 с.
7. Программа проведения испытаний оснований фундаментов участка здания, расположенного по адресу: г. Минск, ул. Казимировская, 12 в осях 15...28. – Брест. – 21 с.
8. Письмо № 20 от 22.03.2021г. Объект «Спортивно-оздоровительный и торгово-развлекательный центр на пересечении ул. Казимировской – ул. Каменногорской в г. Минске». – Минск, 2021. – 12 с.
9. Строительные правила Республики Беларусь. Общие положения проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений : СП 5.01.01-2023. – Минск : Минстройархитектуры, 2023. – 143 с.
10. Морарескул, Н. Н. Основание и фундаменты в торфяных грунтах : учебное пособие / Н. Н. Морарескул. – СПб. : Петербургский гос. университет путей сообщения, 1999. – 49 с.
11. Проектирование фундаментов зданий и подземных сооружений / под ред. Б. И. Долматова. – М. : Изд. АСВ ; СПб., СПбГАСУ, 2006. – 428 с.

УДК 691:035.267

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН

С. А. Романовский¹, А. А. Бакатович²

*¹ Старший преподаватель кафедры строительного производства,
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Беларусь, e-mail: s.romanovskiy@psu.by*

*² К. т. н., доцент, декан инженерно-строительного факультета,
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
Новополоцк, Беларусь, e-mail: a.bakatovich@psu.by*

Реферат

Приведены результаты комплексных исследований теплоизоляционных плит, содержащих в качестве волокнистого структурообразующего материала льняные очесы. Представлены сведения о составе и соотношении компонентов утеплителя на основе очесов льна. Установлены показатели сорбционной влажности при относительной влажности воздуха 40–97 % и коэффициенты паропроницаемости теплоизоляционного материала из льняных очесов. На основании натурных испытаний подтверждена эффективность теплоизоляционных плит из очесов льна в качестве тепловой изоляции для ограждающих конструкций жилых домов.

Ключевые слова: очесы льна, теплоизоляционные плиты, состав, физические показатели.

Введение

Рациональное использование вторичного сырья растительного или сельскохозяйственного происхождения принадлежит к актуальным вопросам современного этапа развития науки. Эффективным решением поставленной задачи является использование растительных волокон в качестве структурообразующего материала утеплителей в комплексе с экологически безопасными вяжущими. К ограничивающим факторам применения теплоизоляционных плит из растительного сырья в Беларуси и России относятся высокая стоимость, горючесть и отсутствие жесткости при малой средней плотности. Однако проводимые исследования по разработке тепловой изоляции с применением растительных волокон подтверждают востребованность данного направления.

Наибольшее распространение в качестве структурообразующего материала теплоизоляционных плит на основе сырья растительного происхождения получили древесные волокна. Связующими компонентами могут выступать поливинилацетатный клей [1], смола [2], парафин [3] и синтетические волокна [4]. Тепловая изоляция из волокон древесины имеют следующие физико-механические характеристики: средняя плотность – $30\text{--}270\text{ кг/м}^3$, коэффициент теплопроводности – $0,038\text{--}0,059\text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$, прочность на сжатие при 10 % деформации – $0,01\text{--}0,15\text{ МПа}$.

В настоящее время особое внимание уделяется исследованиям по рациональному использованию вторичного сырья сельскохозяйственных культур. Данные о составах, средней плотности и коэффициентах теплопроводности наиболее известных теплоизоляционных плит из волокон сельскохозяйственного сырья представлены в таблице 1.

Приведенные физико-механические показатели (таблица 1) тепловой изоляции на основе вторичного сырья сельскохозяйственных культур подтверждают эффективность утеплителей на основе структурообразующих материалов волокнистой структуры. Однако поиск максимально эффективного структурообразующего материала из вторичных волокон сельскохозяйственных культур для теплоизоляционных материалов остается весьма актуальной и важной задачей.

Основная часть

Основная задача исследований заключалась в получении экологически безопасных утеплителей с высокими теплофизическими характеристиками, обеспечивающими экологическую безопасность для человека и окружающей среды.

Компоненты образцов теплоизоляционных плит

Льняные очесы длиной от 5 до 10 см использовали в качестве структурообразующего материала для изготовления образцов тепловой изоляции. Для проведения сравнительных испытаний получали образцы утеплителя из волокон льна. Жидкое натриевое стекло, модифицированное двухкомпонентной добавкой извести и гипса, применяли в виде вяжущего компонента.

Таблица 1 – Состав, средняя плотность и коэффициент теплопроводности тепловой изоляции на основе вторичных волокон сельскохозяйственного сырья

№	Структурообразующий материал	Связующее	Добавки	Средняя плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Ссылка
1	Льняное волокно	полиэфирное волокно	–	32–34	0,04	[5]
2	Льняное волокно	крахмал	соли бора	32–34	0,038–0,04	[6]
3	Конопляное волокно	полиэстр	сода	35–40	0,038–0,04	[7]
4	Волокно хлопка	жидкое стекло	–	40–100	0,037–0,041	[8]
5	Волокно хлопка	–	–	150–450	0,059–0,082	[9]
6	Волокно коры масличной пальмы	жидкое стекло	–	135–168	0,046–0,047	[10]
7	Кокосовые волокна	–	–	30–115	0,058–0,097	[11]
8	Джутовые волокна	жидкое стекло	–	60–100	0,037–0,049	[12]

Основные свойства тепловой изоляции

Оценка результатов исследования коэффициентов теплопроводности утеплителей на основе льняных очесов и волокон свидетельствует о том, что при варьировании средней плотности от 60 до 100 кг/м³ коэффициент теплопроводности образцов изменяется в пределах 0,035–0,045 Вт/(м·°С). При этом, значения коэффициентов теплопроводности образцов из очесов льна в среднем на 16 % ниже показателей образцов на основе волокон льна. Также стоит отметить, что минимальные значения 0,035 Вт/(м·°С) и 0,042 Вт/(м·°С) у образцов из очесов льна и льняных волокон определены при средней плотности 80 кг/м³.

Анализ полученных данных о прочности на сжатие при 10 % деформации позволил выявить, что при плотности 60 кг/м³ показатели прочности образцов на основе очесов и волокон льна составляют 0,17·10⁻² МПа и 0,26·10⁻² МПа соответственно. Повышение средней плотности образцов до 100 кг/м³ приводит к увеличению прочности на сжатие при 10 % деформации в 1,8 и 1,6 раза. Замена льняных волокон на очесы льна в исследуемом диапазоне средней плотности снижает значения прочности в среднем на 29–35 %.

Количественный состав теплоизоляционных материалов

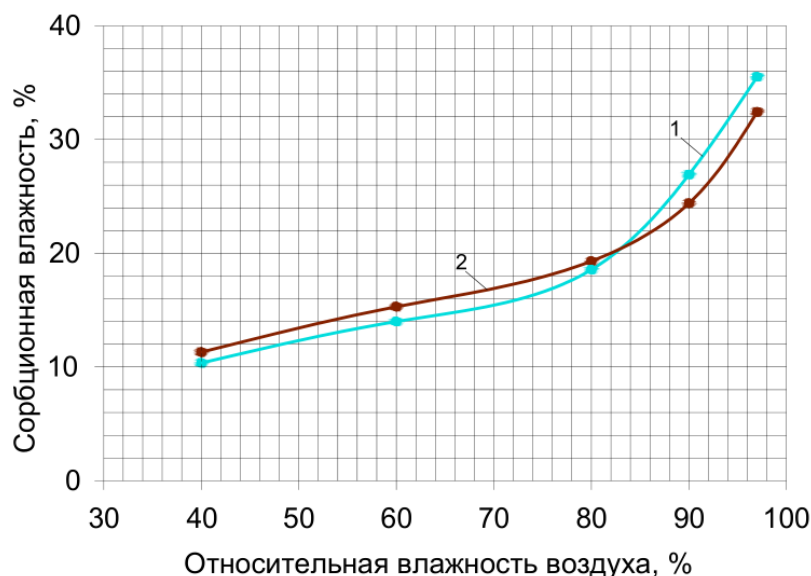
По результатам проведенных исследований коэффициента теплопроводности и прочности на сжатие при 10 % деформации установлен и приведен в таблице 2 необходимый количественный состав тепловой изоляции, обеспечивающий высокие теплофизические характеристики утеплителей из очесов и волокон льна.

Таблица 2 – Количественный состав и плотность теплоизоляционных плит

Расход компонентов на 1 м ³ , кг				Средняя плотность, кг/м ³
структурообразующий материал	вяжущее			
льняные очесы или волокна	жидкое стекло	известь	гипс	
52–92	4,5–12,5	0,2–0,8	0,2–0,8	

Сорбционная влажность теплоизоляционных плит

Значения сорбционной влажности утеплителей на основе льняных очесов и волокон определяли на образцах, отобранных из теплоизоляционных материалов со средней плотностью 70 кг/м³. Теплоизоляционные плиты имели следующий расход компонентов на 1 м³: структурообразующий материал – 60 кг/м³, натриевое жидкое стекло – 9 кг/м³, гипс – 0,5 кг/м³ и известь – 0,5 кг/м³. Изотермы сорбции водяного пара образцами тепловой изоляции, полученные по результатам проведенного эксперимента, представлены на рисунке 1.



Составы на основе: 1 – очесов льна; 2 – волокон льна

Рисунок 1 – Изотермы сорбции водяного пара материалами

На основании полученных данных (рисунок 1) установлено, что при относительной влажности воздуха 40 % и 60 % сорбционная влажность образцов на основе очесов льна составляет 10,2 % и 14 % соответственно, что на 9 % ниже показателей образцов из льняных волокон. Сорбционная влажность образцов на структурообразующем материале из очесов при влажности воздуха 80 % равна 18,2 %, что практически совпадает с величиной образцов на основе волокон льна. Влажность воздуха 90 % способствует возрастанию сорбционной влажности образцов из очесов льна до 27 %, что выше значения образцов на основе льняных волокон на 12 %. Поглощение водяных паров образцами, содержащими очесы льна, при относительной влажности воздуха 97 % составляет 37,6 %, что на 15 % выше величины сорбции водяных паров образцами из волокон льна.

Большие показатели сорбционной влажности у образцов на основе льняных очесов относительно образцов из волокон льна при относительной влажности воздуха от 90 до 97 % объясняются тем, что разделённые элементарные волокна в очесах имеют большую геометрическую площадь контакта поверхности с внешней средой относительно показателей волокон льна, состоящих из плотных пучков плотно прилегающих друг к другу элементарных волокон.

Влияние показателя влажности на теплопроводность утеплителей

Исследования проводили на образцах со средней плотностью 70 кг/м³. Масса образцов в сухом состоянии составляла 219 г. Коэффициент теплопроводности образцов из очесов и волокон льна равен 0,035 Вт/(м·°C) и 0,041 Вт/(м·°C) соответственно. Результаты исследований приведены в таблице 3.

Из экспериментальных данных (таблица 3) следует, что через двое суток показатель влажности образцов 1 из очесов льна достигает 9,3 % и практически идентично значению образцов 5 на основе льняных волокон. Для образцов 2, содержащих очесы льна, через 120 часов после начала испытаний показатель влажности повышается до 23,2 %, что на 12 % больше значения образцов 6 из волокон льна. В течение следующих 5 суток величина влажности образцов 3, изготовленных на основе очесов, увеличивается до 32,4 %, что превышает значение образцов 7 из льняных волокон на 19 %. По сравнению с показателями сухих материалов, после 20 суток испытания, содержание влажности в образцах 4 и 8 увеличилось до 36,9 % и 32,1 %.

Основываясь на полученных результатах (таблица 3) установлено, что прирост коэффициента теплопроводности образцов 1 и 5, содержащих очесы и волокна льна, после 48 часов испытаний составил и 23 % и 17 % соответственно. После пяти суток выдерживания плит в герметичной камере коэффициент теплопроводности образцов 2 и 6 из льняных очесов и волокон увеличился на 66 % и 43 %. Изменение коэффициента теплопроводности образцов 3 за вторые 120 часов составляет 16 %, а для образцов 7–20 %. Коэффициент теплопроводности образцов 4 и 8 на основе очесов и волокон льна после 20 суток испытания повысился в 1,9–2,1 раза относительно показателей сухих материалов, при этом значение образцов 8 превышает показатель образцов 4 на 7 %.

С использованием полученных зависимостей изменения коэффициентов теплопроводности от показателя влажности (таблица 3) определено, что зависимость коэффициента теплопроводности от влажности для экспериментальных теплоизоляционных материалов из волокон растительного происхождения достаточно точно аппроксимируется полиномиальной функцией вида $K = a \cdot W + b$. Коэффициент корреляции уравнения для плит на основе очесов льна равен $R^2 = 0,993$; для образцов из волокон льна $R^2 = 0,974$.

Зависимости коэффициента теплопроводности от изменения показателя влажности рассматриваемых теплоизоляционных плит можно представить в виде выражений 1 и 2:

$$\lambda_w = \lambda_0 \cdot (0,0302 \cdot W + 0,9721); \quad (1)$$

$$\lambda_w = \lambda_0 \cdot (0,0292 \cdot W + 0,9532), \quad (2)$$

где λ_w – коэффициент теплопроводности утеплителя при данной влажности, Вт/(м·°С); λ_0 – коэффициент теплопроводности сухого теплоизоляционного материала, Вт/(м·°С); W – влажность плит, %.

Таблица 3 – Показатели массы, плотности, влажности и коэффициента теплопроводности образцов теплоизоляционных плит во влажном состоянии

№ партии образцов	Время выдерживания образцов в камере, сутки (часы)	Показатели образцов				
		масса, г	средняя плотность, кг/м ³	влажность, %	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	изменение коэффициента теплопроводности
теплоизоляционные плиты из льняных очесов						
1	2 (48)	239,4	76,6	9,3	0,043	1,23
2	5 (120)	269,8	86,3	23,2	0,058	1,66
3	10 (240)	290	92,8	32,4	0,067	1,91
4	20 (480)	299,8	95,8	36,9	0,075	2,14
теплоизоляционные плиты из волокон льна						
5	2 (48)	238,9	76,4	9,1	0,049	1,2
6	5 (120)	264,3	84,5	20,7	0,06	1,46
7	10 (240)	278,6	89,1	27,2	0,072	1,76
8	20 (480)	289,4	92,5	32,1	0,08	1,95

При аппроксимации полученных данных выведена эмпирическая зависимость коэффициента теплопроводности экспериментальных утеплителей от показателя влажности общего вида:

$$\lambda_w = \lambda_0 \cdot (a \cdot W + b), \quad (3)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности сухого материала, Вт/(м·°С); W – влажность материала, %; a , b – эмпирические коэффициенты (для материала на основе очесов льна и модифицированного жидкого стекла $a = 0,0302$, $b = 0,9721$; для материала из волокон льна и модифицированного жидкого стекла $a = 0,0292$, $b = 0,9532$).

Коэффициент паропроницаемости

Для определения коэффициента паропроницаемости изготавливали образцы средней плотностью от 60 до 100 кг/м³. В таблице 4 представлен количественный состав, средняя плотность и коэффициенты паропроницаемости исследуемых теплоизоляционных материалов.

Согласно данным таблицы 4, образцы тепловой изоляции на основе очесов льна средней плотностью от 60 до 100 кг/м³ обеспечивают коэффициент паропроницаемости в пределах 0,36–0,39 мг/(м·ч·Па). При указанном диапазоне средних плотностей образцы теплоизоляционных плит из льняных волокон имеют показатели паропроницаемости, равные 0,4–0,42 мг/(м·ч·Па). Сравнительный анализ значений паропроницаемости образцов на основе

волокон сельскохозяйственного происхождения показал, что коэффициенты паропроницаемости теплоизоляционных материалов, содержащих льняные очесы, на 5–10 % ниже значений тепловой изоляции из льняных волокон.

Таблица 4 – Количественный состав, средняя плотность и коэффициенты паропроницаемости исследуемых образцов

№ образца	Расход компонентов на 1 м ³ , кг					Средняя плотность, кг/м ³	Коэффициент паропроницаемости, мг/м·ч·Па
	очесы льна	волокна льна	жидкое стекло	гипс	известь		
2	50	–	9	0,5	0,5	60	0,39
4	–	50	9	0,5	0,5	60	0,42
6	70	–	9	0,5	0,5	80	0,38
8	–	70	9	0,5	0,5	80	0,41
10	90	–	9	0,5	0,5	100	0,36
12	–	90	9	0,5	0,5	100	0,4

Теплофизические показатели теплоизоляционных материалов из очесов и волокон льна в условиях эксплуатации зданий

В осенне-весенний периоды 2017–2025 годов выполнялись наблюдения за теплофизическими процессами, происходящими в ограждающих конструкциях одноэтажного жилого дома, содержащими в качестве тепловой изоляции исследуемые теплоизоляционные плиты на основе льняных волокон и очесов. Средняя плотность образцов для конструкции чердачного перекрытия соответствовала 70 кг/м³. В наружных ограждающих конструкциях стен домов с вентилируемой системой утепления и с деревянной каркасной системой использовали теплоизоляционные материалы со средней плотностью 100 кг/м³.

По результатам проведенных натурных испытаний выявлено, что при температуре воздуха в объеме чердачного пространства –17 °С показатель термического сопротивления теплопередаче чердачного перекрытия с теплоизоляционными плитами на основе очесов льна составляет 6,27 (м²·°С)/Вт, что на 13 % превышает значение конструкции перекрытия с материалами из льняных волокон. Стеновое ограждение с устройством вентилируемой системы утепления, включающее тепловую изоляцию на основе очесов льна, при температуре наружного воздуха –23 °С обеспечивает термическое сопротивление теплопередаче 3,24 (м²·°С)/Вт, что выше показателя ограждающей конструкции с утеплителями из льняных волокон на 11 %. Сопротивление теплопередаче стены дома с деревянной каркасной системой, содержащей в качестве утепления теплоизоляционные материалы на основе очесов, при минимальной температуре наружного воздуха –22 °С на 17 % превышает значение ограждающей конструкции с плитами из волокон льна, равное 3,78 (м²·°С)/Вт. Полученные показатели указывают на обеспечение экспериментальными материалами высоких теплоизолирующих свойств в зимний период.

Заключение

На основании исследований установлено, что при средней плотности 60–100 кг/м³ тепловая изоляция на основе очесов льна имеет следующий физико-механические характеристики: коэффициент теплопроводности – 0,035–0,04 Вт/(м·°С), прочность на сжатие при 10 % деформации – 0,17–0,31·10⁻² МПа, коэффициент паропроницаемости – 0,36–0,39 мг/(м·ч·Па).

При относительной влажности воздуха 60–80 % сорбционная влажность тепловой изоляции на основе очесов составляет 14–19 %, что является достаточно низким показателем для материалов из растительного сырья.

Изменение показателя влажности оказывает существенное влияние на среднюю плотность и коэффициент теплопроводности теплоизоляционных плит на основе очесов и волокон льна. Увеличение влажности теплоизоляционных материалов приводит к повышению плотности на 32–37 % и коэффициента теплопроводности в 1,9–2,1 раза. На основании полученных данных выведена эмпирическая зависимость коэффициента теплопроводности утеплителей из льняных очесов и волокон от показателя влажности общего вида, позволяющая прогнозировать значения коэффициента теплопроводности с учётом влажности материала.

Полученные результаты натурных испытаний ограждающих конструкций в условиях эксплуатации зданий свидетельствуют о том, что при минимальных значениях наружного воздуха конструкции, включающие теплоизоляционные плиты из очесов льна, имеют значения сопротивления теплопередаче, равные 3,24–6,27 (м²·°С)/Вт, что превышает показатели стеновых конструкций и чердачного перекрытия с теплоизоляционными материалами на основе льняных волокон на 11–17 %. Проведённые испытания подтверждают возможность применения теплоизоляционных плит из очесов льна как эффективного утеплителя для ограждающих конструкций жилых домов.

Список использованных источников

1. Патент России № 2556596. Сырьевая смесь для получения теплоизоляционного материала // Опубл. в бюлл. Изобр. – 2015. – № 19.
2. Толстик, Ю. В. Теплоизоляционные древесноволокнистые плиты: сравнительный анализ основных свойств и перспективы развития / Ю. В. Толстик, И. К. Божелко, А. А. Титунин // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Кострома, 8–11 сентября 2021 г. – Кострома : Костромской государственный университет, 2021. – С. 95–97.
3. Бакатович, А. А. Теплоизоляционный материал на заполнителе из отходов переработки хлопкового волокна / А. А. Бакатович, Н. В. Давыденко, М. А. Розыев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2019. – № 8. – С. 29–33.
4. Thermal insulating materials made up of poplar wood fibres / P. Vignon, M. Hobballah, H. Tran [et al.] // 2nd Conference on Engineered Wood Products based on Poplar/willow Wood. León, Spain / September 8th-10th 2016. – 2016. – P. 37–50.
5. Плиты теплоизоляционные звукопоглощающие. Технические условия ТУ ВУ 391129716.001-2015. – Введ. 27.07.2015. – Ореховск, 2015. – 10 с.

6. Советников, Д. О. Оптимальная толщина утеплителя наружной стены для создания энергоэффективного и экологичного здания в условиях Санкт-Петербурга / Д. О. Советников, Д. О. Семашкина, Д. В. Баранова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2016. – № 12 (51). – С. 7–19.
7. Богатова, Т. В. Преимущества и особенности безопасных природных утеплителей / Т. В. Богатова, А. И. Двойцына // Инженерные сети и сооружения. – 2016. – № 3–4 (24–25). – С. 14–19.
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. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers / X. Zhou, F. Zheng, H. Li, C. Lu // Energy and Buildings. – 2010. – № 42. – P. 1070–1074. – DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.01.020.
10. 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 stage University. – Novopolotsk : PSU, 2017. – P. 104–107.
11. Manohar, K. Building Thermal Insulation – Biodegradable Sugarcane and Coconut Fiber / K. Manohar, David W. Yarbrough, G. S Kochhar // Journal of Thermal Envelope and Building Science. – 2000. – № 23 (3). – P. 263–276. – DOI: 10.1177/174425910002300308.
12. Конюхов, М. В. Утеплитель из джутовых волокон / М. В. Конюхов, Е. В. Послед // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой. – 2022. – Вып. 44 (114): Прикладные науки. Строительство. – С. 69–70.

УДК 691.327.332

МЕТОДИКА И ПРИМЕР РАСЧЕТА СОСТАВА НЕАВТОКЛАВНОГО ЯЧЕИСТОГО ГАЗОБЕТОНА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ФРАКЦИЙ ГРАНИТНОГО ОТСЕВА

Ю. Д. Самуйлов¹, Э. И. Батяновский²

¹ *М. т. н., мл.н.с. НИИЛ БУСМ филиала «НИПИ» БНТУ, Минск, Беларусь,
e-mail: ppublikatsii@mail.ru*

² *Д. т. н., профессор каф. СМУТС СФ БНТУ, Минск, Беларусь,
e-mail: bat47@tut.by*

Реферат

Широкое использование теплоизоляционных строительных материалов на строительных площадках Республики Беларусь ярко демонстрирует высокий спрос на данный сегмент продукции. Однако данный вид строительных материалов на сегодняшний день представлен в основном газосиликатными и ке-