

УДК 666.973.2

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ЗАПОЛНИТЕЛЕ
ИЗ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ХЛОПКОВОГО ВОЛОКНА**

*канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ;
канд. техн. наук, доц. Н.В. ДАВЫДЕНКО; М.А. РОЗЫЕВ
(Полоцкий государственный университет)*

Приведен краткий анализ теплоизоляционных материалов на основе минеральных волокон и растительного волокнистого сырья. Представлены результаты по определению плотности и теплопроводности отходов волокна хлопка, экспериментальных плит на основе волокон хлопка и модифицированного жидкого стекла. Установлено, что наименьший коэффициент теплопроводности, равный $0,039 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, достигается при плотности плит $58 \text{ кг}/\text{м}^3$. Проанализированы данные исследований плотности и коэффициента теплопроводности при выдерживании образцов плит в камере при относительной влажности воздуха 97%. После 35 суток выдерживания в камере влажность образцов составила 48,1%, при этом коэффициент теплопроводности возрос в 2,1 раза, а плотность увеличилась на 48,3%.

Ключевые слова: теплоизоляционный материал, отход волокна хлопка, модифицированное жидкое стекло, плотность, влажность, теплопроводность.

Введение. В странах Средней Азии и Европы большие объемы производства приходится на выпуск минеральной ваты как эффективного утеплителя, в то же время особое внимание в технологиях получения теплоизоляционных материалов уделяется волокнистым отходам растительного происхождения, образующимся после сбора или переработки урожая. Растительные отходы служат не только дополнительным источником экологически безопасного сырья и обеспечивают расширение спектра местных строительных материалов, но и способствуют сохранности и рациональному потреблению невозобновляемых природных ресурсов. Наибольшее распространение в термоизоляции среди материалов на основе волокнистого сырья получили минераловатные плиты и маты, формируемые из базальтовых и стеклянных волокон. Минераловатные материалы при плотности $30\text{...}190 \text{ кг}/\text{м}^3$ обеспечивают коэффициент теплопроводности $0,032\text{...}0,048 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ [1]. По группе горючести плиты и маты относятся к негорючим материалам. При высоких теплотехнических характеристиках минераловатный утеплитель имеет существенные недостатки: высокое водопоглощение более 100% по массе; значительное увеличение в объеме в водонасыщенном состоянии; при замерзании минеральной ваты в водонасыщенном состоянии происходят необратимые деструктивные процессы в теплоизоляционном слое. Применение синтетических смол, в том числе и на основе фенолформальдегида, оказывает негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду.

Альтернативой минераловатным плитам и матам являются теплоизоляционные материалы на заполнителях растительного происхождения. Так, в Беларуси и России выпускают теплоизоляционные плиты «АКОТЕРМ FLAKS» и «Экотеплин» на основе льняных волокон [2; 3]. В составе плит «АКОТЕРМ FLAKS» в качестве связующего материала вводят синтетические полиэфирные волокна в количестве 15% от массы заполнителя. Коэффициент теплопроводности плит «АКОТЕРМ FLAKS» равен $0,038 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ при плотности $32 \text{ кг}/\text{м}^3$. Вместе с тем плиты имеют группу горючести Г4, поэтому высокая пожароопасность является основным недостатком утеплителя. Специфика технологии формования не позволяет изготавливать жесткие плиты, в результате мягкий утеплитель нельзя использовать при устройстве термостуб, что ограничивает область применения материала.

Теплоизоляционные плиты «Экотеплин» изготавливают с применением крахмала как вяжущего компонента, а для огне- и биозащиты волокна обрабатывают солями бора [3]. В результате плиты соответствуют группе горючести Г1 и относятся к слабогорючим материалам. При плотности $32\text{...}34 \text{ кг}/\text{м}^3$ теплопроводность плит «Экотеплин» соответствует $0,037 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. По причине низкой плотности утеплитель имеет ограничения по области применения. Несмотря на экологическую безопасность таких плит, к существенным недостаткам относится высокая стоимость утеплителя.

В настоящее время на кафедре строительного производства Полоцкого государственного университета ведутся исследования физико-механических свойств разработанного утеплителя на основе *очесов льняных волокон и жидкого стекла*. Плитный утеплитель из очесов волокна льна характеризуется коэффициентом теплопроводности $0,036\text{...}0,041 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ и прочностью на сжатие при 10%-ной деформации $0,11\cdot 10^{-2}\text{...}0,33\cdot 10^{-2} \text{ МПа}$ при плотности $50\text{...}110 \text{ кг}/\text{м}^3$ [4]. Высокая теплоизоляционная способность плит обусловлена присутствием в очесах элементарных волокон диаметром $8\text{...}12 \text{ мкм}$ и наличием пустотных каналов в элементарных волокнах диаметром $4\text{...}6 \text{ мкм}$.

Мох сфагнум также возможно использовать в качестве основного волокнистого компонента плитного утеплителя [5]. Дополнительно в композицию вводится дробленый тростник или солома для устранения усадочных деформаций при сушке утеплителя. Наибольший эффект достигается при замене 40% мха дробленой соломой. При плотности 156...190 кг/м³ коэффициент теплопроводности составляет 0,044...0,046 Вт/(м·°С). Широкое применение утеплителя на основе смеси мха и соломы сдерживают ограничения по сбору мха сфагнума.

В тропических широтах стран Азиатского и Африканского регионов значительный интерес представляет применение в качестве заполнителя для теплоизоляционных плит волокон *коры масличной пальмы* [6]. Полученные образцы плит в процессе испытаний показали следующие характеристики: коэффициент теплопроводности 0,054 Вт/(м·°С), плотность 50 кг/м³. Необходимо отметить, что при испытаниях теплоизоляционный материал показал абсолютную стойкость к появлению плесневых грибов на поверхности волокон при относительной влажности воздуха 97%, что обусловлено химическим составом самих волокон и климатическими условиями произрастания масличных пальм.

Известно применение джутовых волокон для производства теплоизоляционных материалов, обладающих высокой стойкостью к загниванию и вредному воздействию насекомых [7]. Волокна получают из джутового растения и для связывания между собой в полотно пропускают через иглопробивной станок. При плотности утеплителя 150 кг/м³ коэффициент теплопроводности достигает 0,036 Вт/(м·°С), а паропроницаемость – 0,4 мг/(м·ч·Па). Основным отрицательным фактором при эксплуатации является пожаро-опасность материала.

При производстве теплоизоляционных плит, выпускаемых в России под торговой маркой «Vauplit Cocos», в виде заполнителя применяют волокна кокоса [8]. В своем составе материал содержит 85% кокосовых и 15% полиэфирных волокон. В процессе формовки волокнистая смесь обрабатывается горячим воздухом и полиэфирные волокна подплавляются, склеиваются между собой и кокосовыми волокнами, образуя прочный структурный массив. Коэффициент теплопроводности плит «Vauplit Cocos» составляет 0,038...0,042 Вт/(м·°С). При этом материал имеет ряд недостатков, включая высокую стоимость, так как производится из привозного сырья. По пожароопасности утеплитель относится к группе горючести Г4. Кроме того, характеризуется низкой плотностью, равной 30 кг/м³, ограничивая тем самым применение «Vauplit Cocos» по причине отсутствия такого свойства, как прочность на сжатие.

На основе древесных волокон в Германии и Польше производят теплоизоляционные плиты «STEICO» с применением в качестве вяжущего компонента парафина [9]. При плотности 50...270 кг/м³ плиты обладают коэффициентом теплопроводности в пределах 0,038...0,07 Вт/(м·°С). Для теплоизоляционных плит «STEICO» основными недостатками являются: высокая цена, ломкость и крошение при нарушении условий транспортировки и технологии укладки. Американские ученые по результатам ряда проведенных исследований установили, что при горении парафин выделяет вредные химические соединения, содержащие бензол и толуол, являющиеся опасными веществами для здоровья человека [10].

Основываясь на приведенных выше данных, можно сделать вывод, что дополнительным источником сырья для производства теплоизоляционных материалов могут служить и отходы *волокон хлопка*. Такие отходы в больших объемах образуются в процессе экономической деятельности в странах Средней Азии, в частности в Туркменистане.

Материалы и методы испытаний. В процессе проведения исследований для изготовления образцов в качестве заполнителя использовали отходы волокна хлопка, образующиеся на стадии предварительной подготовки волокон на хлопкоперерабатывающих заводах Туркменистана. В исследованиях использовали отходы волокна хлопка длиной до 10 см.

При изготовлении теплоизоляционных плит в качестве вяжущего компонента использовали натриевое жидкое стекло производства ОАО «Домановский производственно-торговый комбинат» (Беларусь), соответствующее требованиям ГОСТ 13078.

В *первой серии* образцы формовали без введения связующего. Связанность структуры обеспечивалась переплетением волокон. Отходы волокна взвешивали. Необходимое количество материала укладывали в форму размером 250×250 мм послойно и подпрессовывали до достижения образцом толщины 50 мм. Полученную мягкую плиту извлекали из формы, определяли среднюю плотность и помещали в прибор ИТП-МГ4 для установления показателя теплопроводности.

Для составов *второй серии образцов* совместно с отходами волокон использовали модифицированное жидкое стекло. Предварительно производили дозировку компонентов. В жидкое стекло вводили известь и перемешивали до однородной консистенции, затем добавляли гипс.

Отходы волокна укладывали в форму с послойной пропиткой модифицированным жидким стеклом и подпрессовывали. Образцы выдерживали в форме 4 часа при температуре 20±2 °С, затем высушивали в течение 6 часов в сушильном шкафу при температуре 40...45 °С. После этого определяли среднюю плотность и теплопроводность полужестких плит.

Среднюю плотность и теплопроводность образцов определяли согласно ГОСТ 17177 и СТБ 1618 соответственно на образцах-плитах размером 250×250×50 мм.

Для определения влияния влажности на плотность и теплопроводность плиты предварительно высушивали до постоянной массы и взвешивали. Высушенные образцы помещали в герметичную камеру с предварительно залитой водой ниже уровня плиты на 40 мм. Температура воздуха в камере составляла 20 ± 2 °С, относительная влажность воздуха – 97%. Через определенные промежутки времени образцы извлекали из камеры и определяли влажность, плотность и теплопроводность плит.

Экспериментальная часть. В первой серии образцов среднюю плотность варьировали в пределах от 40 до 120 кг/м³. Принятый для исследования диапазон средних плотностей объясняется необходимостью определить минимальный коэффициент теплопроводности для плит из отходов волокон хлопка. Результаты определения средней плотности и коэффициента теплопроводности приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Физические характеристики теплоизоляционных плит из отходов волокон хлопка

№ образцов	Средняя плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
1	40	0,039
2	50	0,037
3	60	0,037
4	70	0,038
5	80	0,039
6	90	0,039
7	100	0,041
8	120	0,044

Анализ полученных данных позволил установить, что наименьший показатель теплопроводности 0,037 Вт/(м·°С) соответствует плотности отходов волокон 50...60 кг/м³ (образцы 2, 3). Наилучший результат по теплопроводности достигается за счет уменьшения объема и размеров пустот с одновременной локализацией на отдельные замкнутые микропространства, не сообщающиеся между собой. При этом функционирование сквозных воздушных потоков прекращается. Такая организация внутреннего воздушного пространства предположительно обуславливается оптимальным количеством соприкосновений (точек контакта между волокнами).

Снижение плотности до 40 кг/м³ вызывает повышение теплопроводности на 0,002 Вт/(м·°С), что можно объяснить разуплотнением волокнистой структуры, ведущей к снижению количества точек контакта между волокнами и способствующей прохождению воздушных потоков через материал.

Увеличение плотности плит первой серии в 1,6...2 раза (партии образцов 5...8) относительно партий образцов 2, 3 также ведет к постепенному увеличению коэффициента теплопроводности. Так, при плотности 100...120 кг/м³ коэффициент теплопроводности увеличивается на 11...19% относительно показателей партий образцов 2, 3. Предположительно, в данных образцах постепенно сокращается количество закрытых микропустот с отсутствием циркуляции в них воздуха – в итоге площадь и численность точечных контактов между волокнами возрастает и приводит к увеличению теплопроводности.

С целью повышения жесткости плит, обеспечения целостности структуры и связанности волокон использовали модифицированное жидкое стекло. Также, опираясь на имеющийся положительный опыт применения жидкого стекла [11], введение в состав данного вяжущего направлено на снижение горючести утеплителя из хлопковых волокон. Предварительные исследования по определению оптимальной дозировки расхода жидкого стекла проводили на образцах, содержащих отходы хлопковых волокон в количестве 50 кг на 1 м³. Модифицированное жидкое стекло вводили в количестве 6...14 кг по сухому веществу. Наименьшую теплопроводность при сохранении достаточной жесткости плит и связанности волокон получили при добавлении модифицированного жидкого стекла в количестве 8 кг по сухому веществу, что соответствует 16% от массы волокон хлопка. В жидкое стекло известь и гипс вводили в количестве по 0,5% от массы по сухому веществу. Показатели средней плотности и теплопроводности плит, содержащих жидкое стекло, приведены в таблице 2.

При введении в образцы 2, 3 (см. таблицу 1) жидкого стекла показатели теплопроводности незначительно повысились – до 0,039 Вт/(м·°С), о чем свидетельствуют данные таблицы 2. Увеличение расхода хлопкового волокна и, соответственно, вяжущего (составы 4, 5) вызывает возрастание коэффициента теплопроводности на 8...10%. Повышение плотности с 58 кг/м³ (состав 2) в 2...2,4 раза (составы 7, 8) влечет за собой ухудшение показателей теплопроводности на 21...28%.

Установлено, что при сопоставлении результатов в таблицах 1 и 2 введение жидкого стекла повышает плотность образцов и, соответственно, показатели коэффициентов теплопроводности для расхода волокна 90...120 кг на 1 м³ (составы 6–8) на 12...14%.

Таблица 2. – Физические характеристики теплоизоляционных плит на основе отходов волокон хлопка и модифицированного жидкого стекла

№ образцов	Средняя плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
1	46,4	0,041
2	58	0,039
3	69,6	0,039
4	81,2	0,042
5	92,8	0,042
6	104,4	0,044
7	116	0,047
8	139,2	0,05

Для оценки эффективной работы утеплителя на основе хлопкового волокна и жидкого стекла в соответствии с методикой, приведенной в работах [11; 12], исследовали влияние показателя влажности на плотность и коэффициент теплопроводности. Теплоизоляционные плиты выдерживали в камере над водой в течение 2, 5, 10, 20 и 35 суток, после чего извлекали, определяли плотность и коэффициент теплопроводности. Через 35 суток после начала испытаний показатель влажности не изменялся, т.е. оставался постоянным. Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Физические показатели теплоизоляционных плит

№ образцов	Время выдерживания образца в камере, сут	Показатели образца			
		масса, г	плотность, кг/м ³	влажность, %	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
1	0	181	58	0	0,039
2	2	205	66	13,3	0,046
3	5	224	72	23,8	0,057
4	10	241	77	31,4	0,068
5	20	256	82	41,4	0,076
6	35	268	86	48,1	0,082

В первые двое суток наблюдался значительный прирост влажности образцов – до 13,3%, что повлекло за собой увеличение плотности на 13,7% относительно образца № 1, находящегося в абсолютно сухом состоянии. При этом коэффициент теплопроводности возрос на 17,9%. Через 5 суток после начала испытаний влажность достигла 23,8%, плотность повысилась на 24,1%, а теплопроводность – на 46,1%.

За последующие пять суток отмечалось снижение темпов прироста влажности. Показатель влажности увеличился только на 31,9% при возрастании плотности на 6,9% и коэффициента теплопроводности на 19,3%. Спустя 35 суток наступил период стабилизации показателя влажности. Максимальный показатель влажности образцов при хранении плит в условиях влажности воздуха 97% составил 48,1%. Плотность образца № 6 превысила показатель образца № 1 в 1,48 раза, а теплопроводность возросла в 2,1 раза.

Проведенные ранее аналогичные исследования на утеплителях из костросоломенных смесей, волоках и очесах льна [11; 12] подтверждают, что теплоизоляционные материалы на растительном сырье обладают особенностью – высокая сорбция влаги из воздуха, но также легко отдают влагу при уменьшении влажности воздуха. Несмотря на значительное увеличение показателей влажности, плотности, коэффициента теплопроводности, образцы в период их эксплуатации в условиях относительной влажности воздуха 97% находятся только в период выпадения атмосферных осадков в виде дождя. Таким образом, полученных максимальных значений основных показателей утеплитель не может достичь при соблюдении условий эксплуатации ограждающих конструкций здания.

Заключение. Отходы волокна хлопка являются эффективным структурообразующим материалом для производства утеплителей. При плотности 50...60 кг/м³ показатель теплопроводности отходов хлопковых волокон составляет 0,037 Вт/(м·°С).

Использование жидкого стекла в качестве вяжущего обеспечивает получение полужестких плит и понижает горючесть утеплителя. При введении модифицированного жидкого стекла наименьший показатель теплопроводности $0,039 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ соответствует плотности плит $58...69,6 \text{ кг/м}^3$.

Значительное увеличение показателей влажности, плотности, коэффициента теплопроводности при нахождении образцов в условиях относительной влажности воздуха 97% свойственно теплоизоляционным материалам на растительной основе. В условиях относительной влажности воздуха 60...70% влажность утеплителя составляет 11...12%, а коэффициент теплопроводности находится в пределах $0,049...0,051 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Таким образом, по результатам исследований получен эффективный теплоизоляционный материал в виде полужестких плит на основе отходов волокон хлопка и жидкого стекла для Туркменистана и других стран Среднеазиатского региона, выращивающих хлопковую культуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор каменной ваты [Электронный ресурс] // Сайт «TutKnow.ru». – Режим доступа: <http://tutknow.ru/building/uteplenie/6213-obzor-kamennou-vaty.html>. – Дата доступа: 14.05.2019.
2. Плиты теплоизоляционные звукопоглощающие. Технические условия : ТУ ВУ 391129716.001-2015. – Введ. 27.07.2015. – Ореховск, 2015. – 10 с.
3. 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.
4. Романовский, С.А. Применение микроскопического анализа для оценки перспективы использования очесов волокна льна в производстве теплоизоляционного материала / С.А. Романовский, А.А. Бакатович // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 8. – С. 14–18.
5. Bakatovich, A. Composite material for thermal insulation based on moss raw material / A. Bakatovich, F. Gaspar // Construction and Building Materials : International Journal (Elsevier). – 2019 (180). – P. 1–9.
6. Romanovskiy, S. Influence of the Fibrous Structure on the Physical and Mechanical Characteristics of Insulating Slabs from Flax Noils / S. Romanovskiy, A. Bakatovich // Construction Science : Scientific Journal of Riga Technical University. – 2017. – Vol. 20. – P. 10–16.
7. Что такое джут, джутовый утеплитель: характеристики [Электронный ресурс] // Сайт «ФБ». – Режим доступа: <http://fb.ru/article/249861/chto-takoe-djut-djutovyy-uteplitel/>. – Дата доступа: 16.05.2019.
8. Утеплитель из кокоса Bauplit [Электронный ресурс] // Сайт компании «GreeBauldTrade». – Режим доступа: <http://g-b-t.ru/collection/kokosovye-utepliteli/product/uteplitel-iz-kokosa-bauplit-cocos>. – Дата доступа: 25.05.2017.
9. STEICO [Электронный ресурс] // Сайт «Дома Э3». – Режим доступа: <http://steico-rus.ru/katalog>. – Дата доступа: 12.05.2019.
10. Вреден ли парафин [Электронный ресурс] // Сайт Вредно ли? – Режим доступа: <http://vredno-ili-net.ru/ostalnoe/vreden-li-parafin.html>. – Дата доступа: 12.05.2019.
11. Bakatovich, A. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste / A. Bakatovich, N. Davydenko, F. Gaspar // Energy and Building : International Journal (Elsevier). – 180 (2018). – P. 72–82.
12. Романовский, С.А. Особенности влияния влажности на теплопроводность волокнистого теплоизоляционного материала из очесов льна / С.А. Романовский, А.А. Бакатович // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : сб. материалов II Нац. науч.-практ. конф., Омск, 18–19 апр. 2019 г. ; Сиб. гос. автомобильно-дорожный ун-т, 2019. – С. 432–439.

Поступила 10.06.2019

INSULATING MATERIAL ON A FILLER FROM COTTON FIBER PROCESSING WASTE

A. BAKATOVICH, N. DAVYDENKO, M. ROZYEV

A brief analysis of heat-insulating materials based on mineral fibers and plant fiber raw materials is given. The results of determining the density and thermal conductivity of waste cotton fiber, experimental plates based on cotton fibers and modified water glass are presented. It was found that the lowest thermal conductivity coefficient equal to $0.039 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$ is achieved at a plate density of 58 kg/m^3 . The data of studies of the density and coefficient of thermal conductivity during aging of plate samples in the chamber at a relative humidity of 97% are analyzed. After 35 days in the chamber, the humidity of the samples is 48.1%, while the coefficient of thermal conductivity increases by 2.1 times, and the density increases by 48.3%.

Keywords: heat-insulating material, cotton fiber waste, modified water glass, density, humidity, thermal conductivity.