

УДК 691:035.267

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-48-54

ОГРАЖДАЮЩИЕ СТЕНОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЛИТ ИЗ ЛЬНЯНЫХ ОЧЕСОВ

С.А. РОМАНОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. **А.А. БАКАТОВИЧ**
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

В статье рассмотрены теплоизоляционные материалы волокнистой структуры на основе растительных сельскохозяйственных отходов. Представлены результаты натурных испытаний утеплителя из очесов льна, применяемого для теплоизоляции наружного стенового ограждения с вентилируемой системой утепления одноэтажного жилого дома. Приведены данные исследований теплофизических характеристик стеновой ограждающей конструкции с экспериментальными материалами. Построены графики распределения температур по толщине конструкции стенового ограждения, после чего рассчитаны значения термического сопротивления теплопередаче. Выявлены зависимости распределения влажности по толщине тепловой изоляции. По итогам натурных испытаний установлено, что при температуре наружного воздуха -23°C значение термического сопротивления теплопередаче стены с экспериментальным утеплителем из очесов равно $3,24 (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$. Результаты исследований доказывают эффективную работу теплоизоляционных материалов на основе льняных очесов для стеновых ограждающих конструкций.

Ключевые слова: тепловая изоляция, льняные очесы, волокна льна, жидкое стекло, термическое сопротивление теплопередаче, влажность.

Введение. При постоянном повышении цен на энергетические ресурсы и стратегии энергосбережения строительная отрасль Беларуси ориентируется на создание эффективной тепловой изоляции, позволяющей повысить термическое сопротивление утеплителя и минимизировать тепловые потери через ограждающие конструкции зданий и сооружений. Значительных достижений по обеспечению высоких теплотехнических показателей теплоизоляционных плит удалось достичь, применяя растительные отходы сельскохозяйственного производства. Стоит отметить, что использование растительного сырья позволяет также решать проблемы с утилизацией и рациональным применением сельскохозяйственных отходов.

Утеплитель, включающий конопляные волокна, полиэстер и соду, выпускают в Германии [1; 2]. Теплоизоляционный материал применяется для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и характеризуется коэффициентом теплопроводности $0,038\text{--}0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ при плотности от 35 до $40 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В Литве и Чехии проведены исследования по модификации теплоизоляционных плит из конопляных и полиэфирных волокон [3]. Для снижения водопоглощения образцы тепловой изоляции обрабатывали гидрофобными составами. Испытания проводили на образцах утеплителя, обладающих в сухом состоянии средней плотностью $29\text{--}40 \text{ кг}/\text{м}^3$ и теплопроводностью $0,044\text{--}0,051 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$. Проведенный эксперимент подтвердил уменьшение показателя водопоглощения теплоизоляционного материала относительно необработанных составов.

Конопляные и полилактидные волокна применяли в качестве структурообразующего материала и связующего для теплоизоляционных плит в исследовательской работе [4]. Полученная тепловая изоляция обеспечивает коэффициент теплопроводности $0,037\text{--}0,039 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ и прочность на сжатие $0,25\text{--}0,51 \text{ кПа}$ при плотности от 40 до $90 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Теплоизоляционные материалы из волокон технической конопли, обработанные антипиреном, получены в Республике Казахстан. Коэффициент теплопроводности нетканого утеплителя, изготовленного иглопробивным способом, составляет $0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ [5].

Получению тепловой изоляции на основе отходов хлопка и жидкого стекла посвящены исследования в Полоцком университете. Разработанные утеплители при средней плотности от 40 до $100 \text{ кг}/\text{м}^3$ обладают коэффициентом теплопроводности в диапазоне $0,037\text{--}0,041 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ¹.

Отход хлопка в качестве структурообразующего материала также применяли для изготовления теплоизоляционных плит в работе [6]. Тепловая изоляция обеспечивает коэффициент теплопроводности $0,059 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$ при плотности $150 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В Эфиопском университете изучали возможность применения отходов трикотажного производства и поливинилацетатного клея для теплоизоляционного материала [7]. Утеплитель имеет среднюю плотность $144 \text{ кг}/\text{м}^3$ и обладает коэффициентом теплопроводности $0,123 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Теплоизоляционные плиты на основе волокон коры масличной пальмы разработаны в Малайзии². Проведенные исследования подтвердили эффективность использования волокон коры для тепловой изоляции. Полученные утеплители при плотности $66\text{--}110 \text{ кг}/\text{м}^3$ обеспечивают коэффициент теплопроводности $0,03\text{--}0,09 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

¹ Rozyev M., Bakatovich A. Thermal insulation material, using waste cotton production as a placeholder // XI Junior Researchers, Conference. European & national dimension in research. Architecture and civil engineering. – 2019. – № 11. – P. 64–66.

² Hassan S.A., Tesfamichael A., Mohd M.N. Comparison study of thermal insulation characteristics from oil palm fibre // MATEC Web of Conferences. ICPER 2014: 4th International Conference on Production, Energy and Reliability. – 2014. – Vol. 13. DOI: 10.1051/mateconf/20141302016.

Также малазийскими учеными исследованы свойства теплоизоляционных плит из смеси волокон целлюлозы и масличной пальмы [8]. В виде связующего использовали формальдегидную смолу. Анализ результатов исследований показал, что при средней плотности 250 кг/м^3 (соотношение масличных и целлюлозных волокон 1:1) коэффициент теплопроводности утеплителя равен $0,045 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

В Тринидаде в виде сырья для тепловой изоляции применяли кокосовые волокна. Теплоизоляционный материал обеспечивает коэффициент теплопроводности $0,058\text{--}0,097 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ при варьировании плотности от 30 до 115 кг/м^3 [9; 10].

Исследования коэффициента теплопроводности утеплителей на основе кокосовых волокон проводили в Андоласском университете. По результатам эксперимента выявлено, что наименьшее значение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных плит составляет $0,104 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ [11].

Тепловая изоляция из волокон кокоса [12], джута [13] и жидкого стекла разработана в Беларуси. При средней плотности $70\text{--}145 \text{ кг/м}^3$ коэффициент теплопроводности утеплителя на основе волокон кокоса равен $0,039\text{--}0,056 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Теплоизоляционные плиты из джутовых волокон характеризуются коэффициентом теплопроводности $0,037\text{--}0,049 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ при плотности от 60 до 100 кг/м^3 .

Эксперимент по получению теплоизоляционного материала из волокон джута и шерсти проведен в Италии [14]. В качестве волокнистого структурообразующего материала использовали только вторичное сырье. Утеплитель при средней плотности 20 кг/м^3 обеспечивает значение теплопроводности $0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Банановые волокна в качестве структурообразующего материала использовались для изготовления тепловой изоляции в научной работе [15]. Образцы теплоизоляционных материалов при варьировании плотности от 20 до 120 кг/м^3 обладают коэффициентом теплопроводности $0,041\text{--}0,067 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

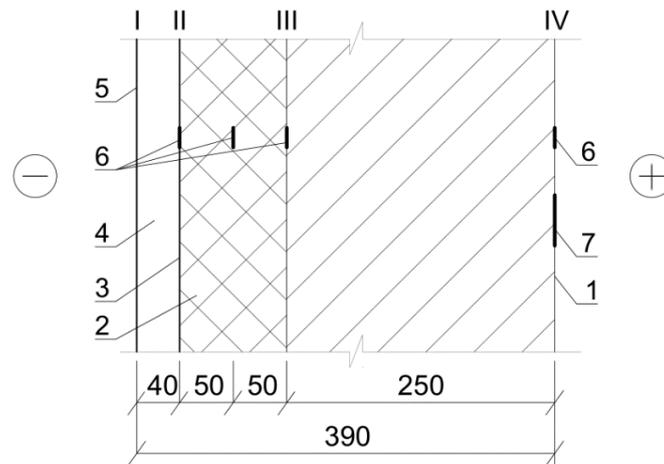
В Полоцком университете проводятся исследования по получению утеплителей из очесов льна³. В виде вяжущего применяется натриевое жидкое стекло, модифицированное комплексной добавкой извести и гипса. Использование льняных очесов для тепловой изоляции решает проблему утилизации растительных отходов льнопереработки, расширяет номенклатуру эффективных волокнистых утеплителей и обеспечивает получение полностью экологически безопасного материала. Проведенные эксперименты подтверждают возможность применения теплоизоляционных материалов в качестве утеплителя для зданий и сооружений. При этом следует отметить, что опыт экспериментальных исследований указывает на необходимость проведения натурных испытаний материалов в ограждающих конструкциях эксплуатируемых зданий для подтверждения эффективной работы теплоизоляционных плит, особенно на растительной основе.

Методика испытаний. Натурные испытания теплоизоляционных материалов из очесов льна проводили в осенне-весенние периоды 2018–2023 годов. Для сравнения исследовали утеплитель из волокон льна и модифицированного вяжущего, а также теплоизоляционные плиты на основе смеси льняных и полиэфирных волокон. Экспериментальная тепловая изоляция применялась в качестве теплоизоляционного слоя в конструкции стенового ограждения из керамического кирпича с вентилируемой системой утепления эксплуатируемого одноэтажного жилого дома. Проведение натурных испытаний выполняли на образцах в виде теплоизоляционных плит с габаритными размерами $1000\times 500\times 100 \text{ мм}$. Утеплитель из очесов (состав 1) или волокон (состав 2) льна изготавливали средней плотностью 100 кг/м^3 при следующем расходе компонентов: волокнистый структурообразующий материал – 90 кг на 1 м^3 , жидкое стекло – 9 кг на 1 м^3 , комплексная добавка извести и гипса при соотношении компонентов 1:1 – 1 кг на 1 м^3 . Образец тепловой изоляции на основе смеси льняных и полиэфирных волокон (состав 3) вырезали из теплоизоляционного материала торговой марки «Акотерм флакс» плотностью 34 кг/м^3 , т.к. применяемая технология формовки и структурообразования данных теплоизоляционных плит не позволяет получать утеплитель более высокой плотности. Коэффициенты теплопроводности в сухом состоянии теплоизоляционных материалов на основе очесов льна и плит «Акотерм флакс» составляет $0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, тепловой изоляции из льняных волокон – $0,045 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Конструкция стены включала в себя кладку из керамического полнотелого кирпича, тепловую изоляцию на основе утеплителя из очесов льна (стена 1), из льняных волокон (стена 2), а также из смеси льняных и полиэфирных волокон (стена 3), гидроветрозащитную мембрану, воздушную прослойку толщиной 40 мм и фасадные металлические кассеты. На рисунке 1 представлена схема установки датчика теплового потока и термопар для определения теплотехнических показателей ограждающей конструкции. Для более подробного исследования изменения температуры в толще теплоизоляционного материала, условно разделяли утеплитель на 2 слоя толщиной по 50 мм и устанавливали термопары.

После проведения натурных испытаний исследовали распределение влажности по толщине экспериментальных утеплителей. С данной целью по толще теплоизоляционных плит вырезали образцы-призмы размерами $50\times 50\times 100 \text{ мм}$. Далее образцы-призмы разделяли на 4 образца-фрагмента толщиной по 25 мм . Полученные образцы взвешивали, затем помещали в сушильный шкаф для высушивания до постоянной массы, после чего снова взвешивали и на основании выявленных значений вычисляли влажность образцов-фрагментов теплоизоляционных плит.

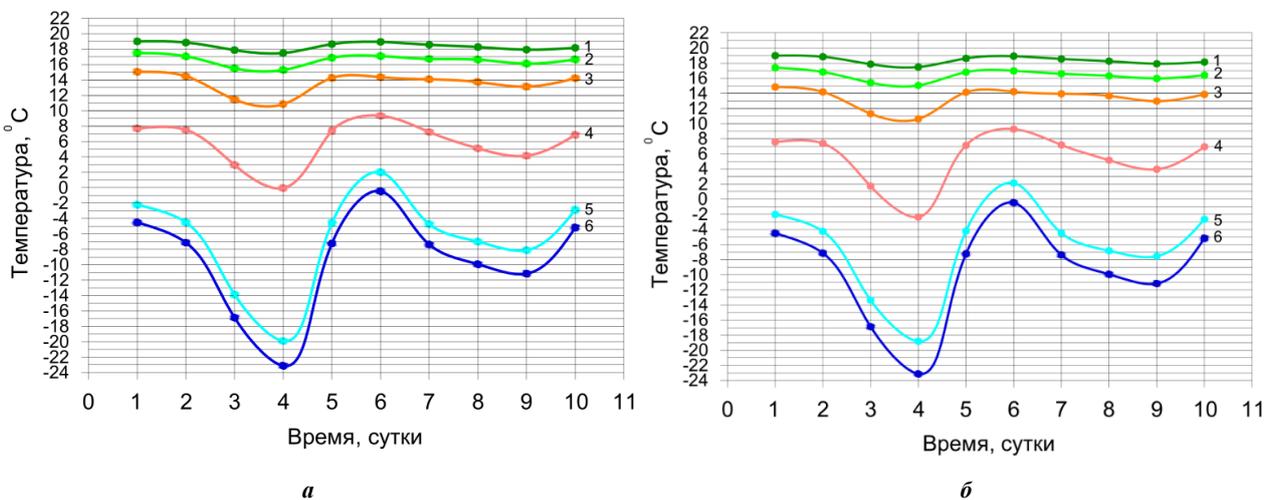
³ Romanovskiy S.A. Physical parameters of insulation with a structure-forming material from flax noils / ICBTE 2020: E3S Web of Conferences, 212, art. no. 02014. DOI: 10.1051/e3sconf /2020212020_14.



- I, II, III, IV – границы слоев конструкции стенового ограждения;
 1 – кладка из кирпича керамического; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – мембрана гидроветрозащитная;
 4 – воздушная прослойка; 5 – фасадная металлическая кассета; 6 – термопары; 7 – датчик теплового потока

Рисунок 1. – Схема расположения термопар и датчиков тепловых потоков по сечению конструкции стенового ограждения из керамического кирпича с вентиляруемой системой утепления

Результаты и обсуждения. В качестве примера рассмотрен промежуток времени с 20 февраля по 1 марта 2023 года, характеризуемый наиболее низкими температурами наружного воздуха в ночной период в Полоцком районе. На рисунке 2 приведены графики распределения температур по толщине ограждающей конструкции с утеплителями из очесов и волокон льна. График распределения температур для наружного ограждения с тепловой изоляцией на основе льняных и полиэфирных волокон не добавляли, так как показатели температур по толще конструкции стен, содержащих льняные очесы, и плиты «Акотерм флак» имеют относительно близкие значения. При построении графиков использовали значения, соответствующие средним показателям температур за временной промежуток, равный 10 часам, с девяти часов вечера до семи часов утра.



- a* – наружная стена 1; *б* – наружная стена 2;
 1 – температура внутри помещения, °C; 2 – температура кирпичной кладки внутри помещения, °C;
 3 – температура поверхности утеплителя на границе III, °C; 4 – температура в середине тепловой изоляции, °C;
 5 – температура поверхности утеплителя на границе II, °C; 6 – температура наружного воздуха, °C

Рисунок 2. – Распределение температуры по толщине конструкции стенового ограждения из керамического кирпича с вентиляруемой системой утепления

Из полученных результатов (см. рисунок 2) следует, что наиболее холодные ночные часы зафиксированы на четвертые сутки. Разница температур на поверхностях конструкции стенового ограждения 1 в ночные часы четвертых суток равна 31,5 °C, что больше показателя стены с теплоизоляционными плитами из волокон льна на 1,7 °C и практически совпадает со значением наружного стенового ограждения, содержащего тепловую изоляцию «Акотерм флак».

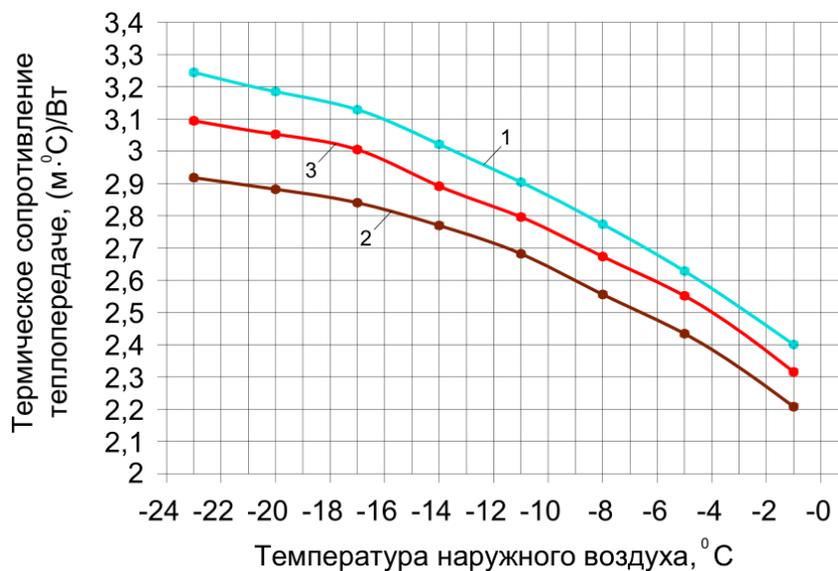
По данным графиков (см. рисунок 2) определены средние значения распределения температур в помещении, конструкции стен и наружного воздуха в период времени с 20 февраля по 1 марта. В таблице 1 представлены рассчитанные значения средних показателей температур.

Таблица 1. – Средние значения температур в помещении, конструкции стен и наружного воздуха

Показатель	Стена 1	Стена 2	Стена 3
Температура наружного воздуха, °С	-9,3	-9,3	-9,3
Температура поверхности тепловой изоляции на границе II, °С	-6,5	-5,7	-6,4
Температура в середине теплоизоляционной плиты, °С	5,6	5,1	5,4
Температура поверхности утеплителя на границе III, °С	13,9	13,2	13,7
Температура поверхности кладки из керамического кирпича на границе IV, °С	16,8	16,0	16,7
Температура воздуха в помещении, °С	18,2	18,2	18,2

Из приведенных результатов исследования (см. таблицу 1) установлено, что на поверхности тепловой изоляции стеновой конструкции 1 на границе II средний показатель температуры за 10 суток составляет $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже значения стенового ограждения 2 и практически не отличается от величины наружного ограждения 3. Средний показатель температуры теплоизоляционной плиты из очесов (стена 1) за тот же период времени на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше величины утеплителя на основе волокон льна (стена 2) и имеет близкое значение с показателем тепловой изоляции «Акотерм флакс» (стена 3). Сравнивая температуры поверхности утеплителя на границе III за промежуток времени 10 суток установлено, что средняя величина стенового ограждения, содержащего теплоизоляционный материал из очесов, характеризуется относительно близким показателем с конструкцией стены 3 и на $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше значения наружного ограждения с теплоизоляционной плитой на основе льняных волокон. За аналогичный период времени средний показатель температуры поверхности кирпичной кладки на границе IV стенового ограждения с тепловой изоляцией из очесов льна на $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше значения стены 2 и практически совпадает с величиной конструкции наружного ограждения, содержащего плиты на основе льняных и полиэфирных волокон.

На рисунке 3 представлены значения термического сопротивления теплопередаче наружного стенового ограждения в зависимости от температуры наружного воздуха, определенные на основании зафиксированных значений плотностей тепловых потоков.



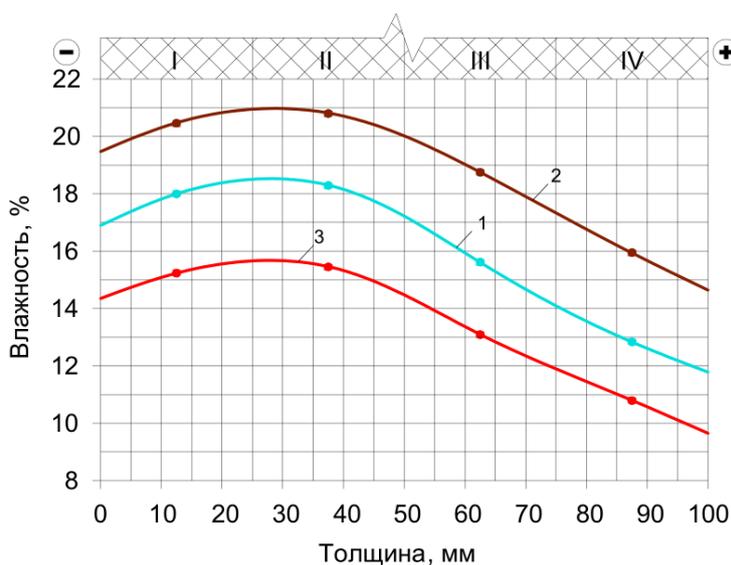
конструкция стены, содержащая тепловую изоляцию: 1 – из очесов;
2 – из льняных волокон; 3 – «Акотерм флакс»

Рисунок 3. – Сопротивления теплопередаче конструкции наружной стены в зависимости от температуры наружного воздуха

Анализ данных, представленных на рисунке 3, позволил установить, что показатель термического сопротивления теплопередаче конструкций стенового ограждения, содержащих исследуемые теплоизоляционные материалы, изменяется от $2,21$ до $2,4$ ($\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$) при температуре наружного воздуха $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значение термического сопротивления стены с утеплителем на основе очесов льна при температуре воздуха $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $3,24$ ($\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), что на 11% больше показателя наружного ограждения с тепловой изоляцией из льняных волокон, равного $2,92$ ($\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), и практически не отличается от показателя стены 3. Повышение термического сопротивления теплопередаче

наружного ограждения, включающего утеплитель на основе очесов льна, на 34% с 2,4 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ до 3,24 ($\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$ при изменении температуры наружного воздуха с -1 °C до -23 °C свидетельствует об эффективной работе теплоизоляционных плит из очесов льна в конструкции стенового ограждения эксплуатируемого одноэтажного дома.

После окончания мониторинга теплофизических показателей в стеновой ограждающей конструкции жилого дома исследованы показатели влажности экспериментальных теплоизоляционных плит (рисунок 4). Основываясь на полученных сведениях, рассчитаны средние значения влажности исследуемых теплоизоляционных плит. Средний показатель влажности для тепловой изоляции на основе очесов льна составляет 16,1%, что на 15% ниже величины утеплителя из льняных волокон и на 18% выше показателя теплоизоляционного материала «Акотерм флакс». Прирост значения влажности в образце-фрагменте I теплоизоляционной плиты из волокон льна по сравнению с утеплителем на основе очесов льна равен 18%, а относительно тепловой изоляции из смеси льняных и полиэфирных волокон – 35%. Наибольшее количество влаги зафиксировано в образцах-фрагментах II. Установлено, что в указанном образце-фрагменте влажность теплоизоляционного материала (состав 1) повышается до 18% относительно образца-фрагмента I, что, в свою очередь, на 17% выше значения тепловой изоляции «Акотерм флакс» и на 13% ниже показателя теплоизоляционной плиты на основе волокон льна. Теплоизоляционные материалы (составы 1, 2 и 3) в образце-фрагменте IV достигают влажности, равной 12,8%, 15,9% и 10,8% соответственно. При этом влажность утеплителя из очесов льна меньше величины тепловой изоляции, содержащей волокна льна, на 15% и больше показателя влажности плиты на основе льняных и полиэфирных волокон на 19%.



I–IV – образцы-фрагменты в тепловой изоляции;
1 – образцы на основе очесов; 2 – образцы основе льняных волокон;
3 – образцы на основе смеси льняных и полиэфирных волокон

Рисунок 4. – Распределение влажности по толщине утеплителей

Меньшее значение влажности в утеплителе на основе льняных и полиэфирных волокон относительно показателя тепловой изоляции из очесов или волокон льна обусловлено присутствием в составе теплоизоляционной плиты «Акотерм флакс» связующего в виде полиэфирных волокон, способствующих снижению поглощенной материалом влаги из воздуха по сравнению с льняными очесами и волокнами.

Помимо конструкции стенового ограждения из керамического кирпича с вентилируемой системой утепления натурные испытания плит на основе очесов льна также проведены для стеновой ограждающей конструкции жилого дома с деревянной каркасной системой и на чердачном перекрытии по деревянным балкам одноэтажного эксплуатируемого жилого дома. Проведенные исследования позволили установить, что конструкция стены с деревянной каркасной системой, содержащая в качестве теплоизоляции утеплитель на основе очесов, при температуре наружного воздуха -19 °C обеспечивает термическое сопротивление $4,55 (\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$. Конструкция чердачного перекрытия с теплоизоляционными плитами из льняных очесов при температуре воздуха в объеме чердачного пространства -17 °C обладает термическим сопротивлением теплопередаче, равным $6,27 (\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$. Определенные значения теплотехнических свойств приведенных ограждающих конструкций доказывают эффективность использования теплоизоляционного материала на основе очесов льна как утеплителя.

Заключение. Результаты натурных испытаний теплоизоляционных плит из льняных очесов в качестве теплоизоляционного слоя в конструкции стенового ограждения из керамического кирпича с вентилируемой системой утепления подтверждают эффективную работу теплоизоляционного материала.

По итогам проведенных испытаний установлено, что при эксплуатации конструкции стенового ограждения с тепловой изоляцией на основе очесов льна термическое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции при температуре наружного воздуха $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $2,4\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$. При снижении температуры до $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ показатель термического сопротивления повышается на 34% до значения, равного $3,24\text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$. Величина термического сопротивления конструкции стены с утеплителем из льняных очесов при температуре наружного воздуха $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 11% выше значения стенового ограждения с утеплителем на основе волокон льна. Стеновая ограждающая конструкция с теплоизоляционной плитой «Акотерм флакс» имеет достаточно близкое значение с показателем термического сопротивления стены, содержащей тепловую изоляцию из льняных очесов.

Среднее значение влажности теплоизоляционной плиты на основе очесов льна после проведения натуральных испытаний составляет 16,1%, что на 15% ниже показателя влажности теплоизоляционной плиты из волокон льна и на 18% выше величины тепловой изоляции на основе льняных и полиэфирных волокон.

Экспериментальные утеплители из льняных очесов находятся в стеновом ограждении в течение года. В указанный период проводился постоянный мониторинг состояния теплоизоляционных плит, подтвердивший отсутствие повреждений и деформаций во время эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богатова Т.В., Двойницына А.И. Преимущества и особенности безопасных природных утеплителей // Инженер. сети и сооружения. – 2016. – № 3–4 (24–25). – С. 14–19.
2. Якунина Е.А. Современные теплоизоляционные материалы как одна из тенденций экологического строительства // Синергия наук. – 2018. – № 24. – С. 625–634.
3. Development of Thermal Insulating Materials on Natural Base for Thermal Insulation Systems / J. Zach, J. Hroudová, J. Brožovský et al. // *Procedia Engineering*. – 2013. – № 57. – P. 1288–1294. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.162.
4. Development and investigation of thermal insulation from hemp-poly lactide fibres / R. Stapulionienė, R. Tupčiauskas, S. Vaitkus et al. // *Engineering structures and technologies*. – 2016. – № 8(1). – P. 23–30. DOI: 10.3846/2029882X.2016.1158127.
5. Мезенцев И.С., Красина И.В., Парсанов А.С. Разработка строительного утеплителя на основе волокон технической конопки // Технологии и качество. – 2022. – № 2(56). – С. 40–45. DOI: 10.34216/2587-6147-2022-2-56-40-45.
6. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers / X. Zhou, F. Zheng, H. Li et al. // *Energy and Buildings*. – 2010. – № 42. – P. 1070–1074. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.01.020.
7. Thermal and sound insulation properties of recycled cotton/polyester chemical bonded nonwovens / S. Sakthivel, S. Kumar, S. Mekonnen et al. // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. – 2020. – Vol. 15. DOI: 10.1177/1558925020968819.
8. Thermal Performance of Oil Palm Fibre and Paper Pulp as the Insulation Materials / S.H. Ibrahim, W.K. Sia, A. Baharun et al. // *UNIMAS e-Journal of Civil Engineering*. – 2014. – P. 22–28.
9. Kochhar G.S., Manohar K. Use of coconut fiber as a low-cost thermal insulator // *Simposia paper*. – 1997. – 01 January. – P. 283–291. DOI: 10.1520/STP12281S.
10. Manohar K., Yarbrough D.W., Kochhar G.S. Building Thermal Insulation – Biodegradable Sugarcane and Coconut Fiber // *Journal of Building Physics*. – 2000. – № 23(3). – P. 263–276. DOI: 10.1177/174425910002300308.
11. Kimura R., Ohsumi M., Susanti L. Development of Thermal Insulation Material Using Coconut Fiber to Reuse Agricultural Industrial Waste // *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. – 2018. – № 8(3). – P. 805–810. DOI: 10.18517/ijaseit.8.3.4610.
12. Конохов М.В., Послед Е.В. Теплоизоляционные плиты на основе кокосовых волокон // Электрон. сб. тр. молодых специалистов Полоц. гос. ун-та им. Евфросинии Полоцкой. Приклад. науки. Стр.-во. – 2022. – Вып. 44(114). – С. 71–72.
13. Конохов М.В., Послед Е.В. Утеплитель из джутовых волокон // Электрон. сб. тр. молодых специалистов Полоц. гос. ун-та им. Евфросинии Полоцкой. Приклад. науки. Стр.-во. – 2022. – Вып. 44(114). – С. 69–70.
14. Thermo-acoustic building insulation materials fabricated with recycled fibers – Jute, Wool and Loofah // A. Majumder, M. Achenza, C. Mastino et al. // *Energy & Buildings*. – 2023. – Vol. 293. DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113211.
15. Manohar K., Adayanju A. A Comparison of Banana Fiber Thermal Insulation with Conventional Building Thermal Insulation // *British Journal of Applied Science & Technology*. – 2016. – № 17(3). – P. 1–9. DOI: 10.9734/BJAST/2016/29070.

REFERENCES

1. Bogatova, T.V. & Dvoynitsyna, A.I. (2016). Preimushchestva i osobennosti bezopasnykh prirodnykh uteplitelei [Advantages and features of harmless natural insulation]. *Inzhenernye seti i sooruzheniya [Engineering networks and coarmaments]*, 3–4(24–25), 14–19. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Yakunina, E.A. (2018). Sovremennyye teploizolyatsionnyye materialy kak odna iz tendentsii ekologicheskogo stroitel'stva [Modern heat-insulating materials as one of the trends in ecological construction]. *Sinergiya nauk [Synergy Science]*, (24), 625–634. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Zach, J., Hroudová, J., Brožovský, J., Krejza, Z. & Gailius, A. (2013). Development of Thermal Insulating Materials on Natural Base for Thermal Insulation Systems. *Procedia Engineering*, (57), 1288–1294. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.162.
4. Stapulionienė, R., Tupčiauskas, R., Vaitkus, S. & Vejelis, S. (2016). Development and investigation of thermal insulation from hemp-poly lactide fibres. *Engineering structures and technologies*, 8(1), 23–30. DOI: 10.3846/2029882X.2016.1158127.
5. Mezentsev, I.S., Krasina, I.V. & Parsanov, A.S. (2022). Razrabotka stroitel'nogo utepliteleya na osnove volokon tekhnicheskoi konopki [Development of construction insulation based on technical hemp fibers]. *Tekhnologii i kachestvo [Technologies and quality]*, 2(56), 40–45. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.34216/2587-6147-2022-2-56-40-45.
6. Zhou, X., Zheng, F., Li, H. & Lu, C. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, (42), 1070–1074. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.01.020.

7. Sakthivel, S., Kumar, S., Mekonnen, S. & Solomon, E. (2020). Thermal and sound insulation properties of recycled cotton/polyester chemical bonded nonwovens. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, (15). DOI: 10.1177/1558925020968819.
8. Ibrahim, S.H., Sia, W.K., Baharun, A., Nawi, M.N.M. & Affandi, R. (2014). Thermal Performance of Oil Palm Fibre and Paper Pulp as the Insulation Materials. *UNIMAS e-Journal of Civil Engineering*, 22–28.
9. Kochhar, G.S. & Manohar, K. (1997). Use of coconut fiber as a low-cost thermal insulator. *Simposia paper*, (01 January), 283–291. DOI: 10.1520/STP12281S.
10. Manohar, K., Yarbrough, D.W. & Kochhar, G.S. (2000). Building Thermal Insulation – Biodegradable Sugarcane and Coconut Fiber. *Journal of Building Physics*, 23(3), 263–276. DOI: 10.1177/174425910002300308.
11. Kimura, R., Ohsumi, M. & Susanti, L. (2018). Development of Thermal Insulation Material Using Coconut Fiber to Reuse Agricultural Industrial Waste. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*, 8(3), 805–810. DOI: 10.18517/ijaseit.8.3.4610.
12. Konyukhov, M.V. & Posled, E.V. (2022). Teploizolyatsionnye plity na osnove kokosovykh volokon. *Elektronnyi sbornik trudov molodykh spetsialistov Polotskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Evfrosinii Polotskoi. Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*, 44(114), 71–72. (In Russ.).
13. Konyukhov, M.V. & Posled, E.V. (2022). Uteplitel iz dzhutovykh volokon. *Elektronnyi sbornik trudov molodykh spetsialistov Polotskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Evfrosinii Polotskoi. Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*, 44(114), 69–70. (In Russ.).
14. Majumder, A., Achenza, M., Mastino, C., Baccoli, R. & Frattolillo, A. (2023). Thermo-acoustic building insulation materials fabricated with recycled fibers – Jute, Wool and Loofah. *Energy & Buildings*, (293). DOI: 10.1016/j.enbuild.2023.113211.
15. Manohar, K. & Adeyanju, A. (2016). A Comparison of Banana Fiber Thermal Insulation with Conventional Building Thermal Insulation. *British Journal of Applied Science & Technology*, 17(3), 1–9. DOI: 10.9734/BJAST/2016/29070.

Поступила 08.12.2023

ENCLOSING WALL STRUCTURES OF OPERATED RESIDENTIAL BUILDINGS USING THERMAL INSULATION PLATES FROM LINEN NOILS

S. ROMANOVSKIY, A. BAKATOVICH
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article discusses thermal insulation materials of a fibrous structure based on plant agricultural waste. The results of full-scale tests of flax noils insulation used for thermal insulation of an external wall fence with a ventilated insulation system of a one-story residential building are presented. Data from studies of the thermophysical characteristics of a wall enclosing structure with experimental materials are presented. Temperature distribution graphs along the thickness of the wall enclosure structure were constructed, after which the values of thermal resistance to heat transfer were calculated. The dependences of the distribution of humidity along the thickness of thermal insulation were revealed. Based on the results of full-scale tests, it was revealed that at an outside air temperature of -23 °C, the value of thermal resistance to heat transfer of a wall with experimental insulation of flax noils is equal to 3,24 (m²·°C)/W. The research results prove the effective operation of thermal insulation materials based on flax noils for wall enclosing structures.

Keywords: thermal insulation, flax noils, flax fibers, liquid glass, thermal resistance to heat transfer, humidity.