

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 666.973.2

DOI 10.52928/2070-1683-2022-32-14-2-9

ИЗОЛЯЦИОННЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ СМЕСИ РИСОВОЙ ЛУЗГИ И СОЛОМЫ

канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ, И ЧЖАН
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)
д-р философии, проф. Ф. ГАСПАР
(Политехнический институт г. Лейрии, Португалия)

Настоящее исследование направлено на получение экологически чистых теплоизоляционных плит, содержащих в качестве основного структурообразующего материала рисовую лузгу. Вторым компонентом структурообразующего состава является пшеничная солома. Приведены экспериментальные данные о физических свойствах теплоизоляционных плит, включая плотность, теплопроводность, сорбционную влажность и прочность на сжатие. Использование соломы в количестве до 50% от общей массы состава позволяет снизить коэффициент теплопроводности изоляционных плит до 0,054–0,055 Вт/(м·К). Показатели коэффициента теплопроводности изоляционных плит обусловлены микроструктурой шелухи и пшеничной соломы, что подтверждается результатами электронной микроскопии, полученными в ходе исследований. Жидкое стекло обеспечивает формирование жесткой и долговечной структуры экологически безопасных теплоизоляционных плит и предотвращает повреждение изоляции грызунами.

Ключевые слова: *рисовая лузга, измельченная солома, теплоизоляционные плиты, микроструктура, теплопроводность, сорбционная влажность.*

Введение. После получения рисового зерна в качестве отхода образуется рисовая солома и лузга. В отличие от соломы рисовая лузга очень стойка к процессам гниения и не распадается в земле ввиду наличия в ней диоксида кремния¹, поэтому использование ее в качестве удобрения не особо эффективно.

Традиционным способом утилизации лузги является использование в качестве источника тепловой энергии, т.е. сжигание. Рисовая лузга признана одним из основных потенциальных возобновляемых источников энергии [1]. В свою очередь зола лузги содержит большое количество макро- и микроэлементов, что делает ее особо ценным минеральным удобрением [2]. Применение рисовой золы обеспечивает снижение расхода цемента, необходимого для производства бетона [3].

Перспективным направлением в строительстве считается использование рисовой лузги в составах стеновых и теплоизоляционных материалов. В исследованиях² предлагается часть древесных отходов в арболите заменять рисовой лузгой для снижения коэффициента теплопроводности стеновых блоков до 0,079–0,087 Вт/(м·К). В Кубанском технологическом университете получены образцы арболита на основе цемента, рисовой лузги и комплекса добавок для 3D печати зданий [4].

Имеются сведения [5] о возможности применения гранулированной рисовой лузги в качестве структурного материала для тепловой изоляции. Международной группой ученых созданы биоизоляционные плиты на рисовой лузге [6] с коэффициентом теплопроводности в пределах 0,046–0,057 Вт/(м·К) при минимальной плотности 154 кг/м³.

В Таиланде разработали теплоизоляционные плиты из рисовой лузги с использованием формальдегидной и фенолформальдегидной смолы³. При плотности плит 139–168 кг/м³ коэффициент теплопроводности равен 0,046–0,056 Вт/(м·К). Однако присутствие смол не позволяет обеспечить экологическую безопасность теплоизоляционных плит.

Использование рисовой лузги в качестве структурообразующего компонента теплоизоляционных композитов является перспективным направлением. Поэтому основной целью исследований является получение на основе лузги экологически безопасных теплоизоляционных материалов, обеспечивающих комплекс эксплуатационных показателей, включая низкую теплопроводность.

Материалы и методы. Во многих странах мира рис выращивают как злаковую культуру. Зерно риса защищено оболочкой, которую ученые называют цветковой чешуей, а производители – лузгой или шелухой [7]. По информации The Food and Agriculture Organization, ежегодно в мире производится около 740 миллионов тонн риса. Выход лузги составляет около 20% от массы необработанного риса⁴. Таким образом, ежегодно в мире

¹ Калита, Е. Рисовая шелуха: методы и технологии утилизации. URL: <https://greenologia.ru/othody/utilizaciya-i-peregerabotka/risovaya-sheluxa.html>.

² Щибря, А.Ю. Эффективный теплоизоляционный материал из поризованного арболита на рисовой лузге : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / А.Ю. Щибря ; Кубанский гос. технол. ун-т. – Ростов-на-Дону, 2000. – 21 с.

³ Panyakaew, S. Agricultural waste materials as thermal insulation for dwellings in Thailand: preliminary results / S. Panyakaew, S. Fotios // PLEA : 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22–24 Oct. 2008. – Dublin, 2008. URL: http://web5.arch.cuhk.edu.hk/server1/staff1/edward/www/plea2018/plea/2008/content/papers/oral/PLEA_FinalPaper_ref_321.pdf.

⁴ Данг, Ш.Л. Высокоэффективный пенобетон с применением золы рисовой шелухи : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Ш.Л. Данг ; Московский гос. строит. ун-т. – М., 2006. – 26 с.

образуется около 148 миллионов тонн рисовой лузги. Насыпная плотность рисовой лузги составляет 100–105 кг/м³. В экспериментальных составах рисовая лузга использовалась в качестве структурообразующего материала без предварительной подготовки.

В качестве второго компонента структурообразующей композиции использовали измельченную или резанную пшеничную солому. Измельченную солому получали в виде плоских частиц, вытянутых в длину. Толщина соломенных частиц соответствует толщине стенки стебля и равна 250–400 мкм, ширина – 1–3 мм, длина – 5–12 мм. Резанная солома представляет собой фрагменты нарезанного стебля в виде трубок длиной 20–40 мм. В насыпном состоянии плотность измельченной соломы находится в пределах 60–63 кг/м³, а резанной соломы равна 39–42 кг/м³.

Для получения измельченной соломы использовали измельчитель типа «Эликор-1». Нарезка пшеничной соломы осуществлялась на барабанной соломорезке типа РСБ-0.1.

При формовке экспериментальных теплоизоляционных плит в качестве вяжущего использовали натриевое жидкое стекло, произведенное на ОАО «Домановский производственно-торговый комбинат» и отвечающее требованиям ГОСТ 13078. Плотность жидкого стекла составляет 1450–1470 кг/м³.

С целью повышения водостойкости жидкого стекла использовали минеральные добавки в виде извести и гипса. Использовали строительную гидратную известь II сорта без добавок производства ОАО «Забудова» и гипс, изготовленный на ОАО «Белгипс».

По методикам ГОСТ 17177 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний» определяли плотность и влажность теплоизоляционных плит.

Коэффициент теплопроводности экспериментальных образцов измеряли на приборе ИТП-МГ4 на образцах-плитах размером 250×250×30 мм согласно СТБ 1618 «Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме»

Для получения образцов-плит рисовую лузгу или композиции на основе лузги и соломы перемешивали с модифицированным жидким стеклом. Известь засыпали в жидкое стекло и тщательно перемешивали до однородной вязкой массы белого цвета, а затем вводили порошок гипса. Подготовленную композицию равномерно распределяли по форме и с помощью пресса формовали при давлении 4 МПа. Образцы выдерживали в форме 8 часов при температуре 20±2 °С, а затем высушивали в течение 10 часов в сушильном шкафу SNOL60/300 LFN при температуре 45–50 °С. Для полученных образцов-плит размером 250×250×30 мм определяли среднюю плотность и теплопроводность.

Сорбционную влажность утеплителей исследовали по ГОСТ 24816-2014 «Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности» с использованием стеклянных эксикаторов. Массы образцов и сырьевых материалов определяли на настольных электронных весах ВНЭ-35.

Электронный микроскоп марки «JSM-5610 LV» использовали для исследования микроструктуры рисовой лузги и пшеничной соломы.

Экспериментальные исследования. При изучении микроструктуры установлено, что толщина скорлупы лузги составляет около 50 мкм. При этом скорлупа состоит из двух слоев, внутреннего и внешнего, значительно отличающихся визуально и по своей структуре (рисунки 1, 2). Внешний слой скорлупы имеет ярко выраженную рельефную мелкобугристую фактуру (см. рисунок 1). При детальном рассмотрении установлено, что верхний слой бугристой фактуры условно разделен на микрообласти – бугорки прямоугольного очертания с примерными размерами 100×80 мкм. На каждом бугорке присутствует микрошип высотой 25–35 мкм. Несмотря на то, что внешний слой имеет толщину 20 мкм без учета высоты микрошипов, при этом он обеспечивает прочность и твердость скорлупы лузги за счет плотной структуры.

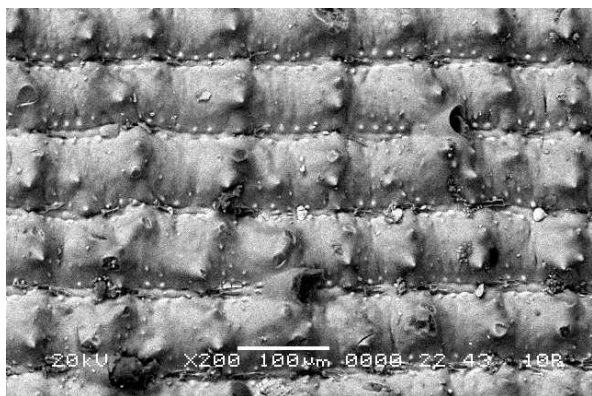


Рисунок 1. – Внешняя поверхность скорлупы рисовой лузги (200 крат)

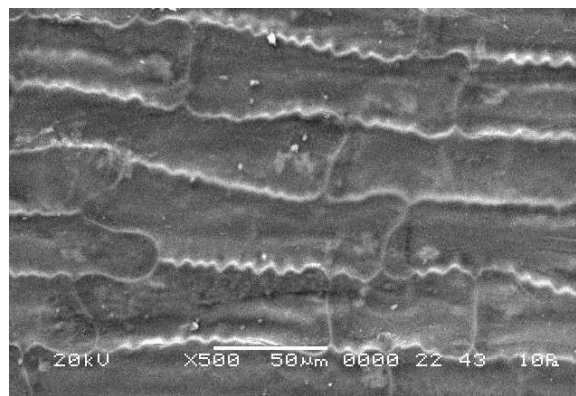


Рисунок 2. – Внутренняя поверхность скорлупы рисовой лузги (500 крат)

Внутренняя область скорлупы представляет собой ячеистую структуру в виде замкнутых плоских микрообластей длиной 70–100 мкм, шириной 40–50 мкм. Стенки ячеек внутренней структуры тонкие и прозрачные толщиной 1–2 мкм (см. рисунок 2).

При формировании структуры теплоизоляционного материала, из-за выпуклой формы скорлупы, области контакта между скорлупами лузги в основном будут проходить по поверхности внешних слоев. Можно предположить, что благодаря выраженному рельефу внешней поверхности скорлупы будет обеспечена высокая адгезия вяжущего с лузгой при формировании структуры тепловой изоляции.

Проведенная электронная микроскопия структуры стебля пшеничной соломы выявила определенные особенности строения. При изучении торцевого среза стебля установлено, что в структуре присутствуют две четко различимые области. Внутренняя область представлена ячеистой структурой, сформированной из продольных трубок с поперечными перегородками. В поперечном сечении ячейки имеют округлую форму диаметром 20–60 мкм и визуально напоминают пчелиные соты. Поперечные перегородки располагаются с шагом 70–90 мкм. Стенки между ячейками прозрачные толщиной не более 1 мкм и формируются из двух оболочек соседних ячеек. Внешняя область также сформирована из продольно располагаемых капилляров с поперечными перегородками. Однако диаметр ячеек существенно меньше и составляет 7–20 мкм при толщине стенок 3–4 мкм.

После изучения внешней поверхности стебля пшеничной соломы установлено, что с внешней стороны пшеничная солома защищена тонкой плотной оболочкой с мелким бороздчатым рельефом. Также по данным⁵, поверхность соломы покрыта тончайшим слоем воска, что может снижать адгезию соломы с отдельными видами вяжущих материалов.

Изучение микроструктуры плит из смеси лузги и соломы выявило, что в процессе формовки трубки из стебля пшеницы подвергаются деформациям. В зависимости от расположения в структурной системе круглые в поперечном сечении трубки могут деформироваться, частично изменяя форму на близкую к овальному очертанию в поперечном сечении (рисунок 3) или полностью сплющиваются до формы пластинок (рисунок 4).

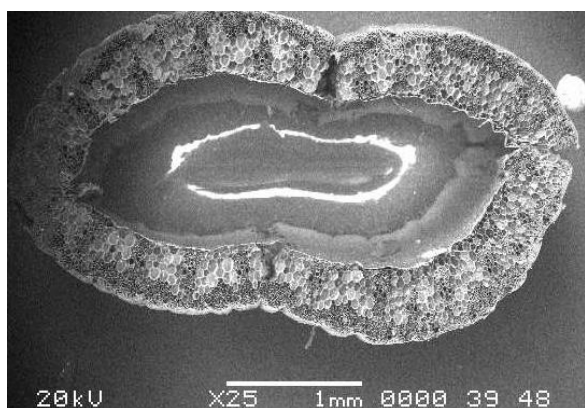


Рисунок 3. – Деформированная трубка соломы (торцевое сечение близкое к овалу, 50 крат)

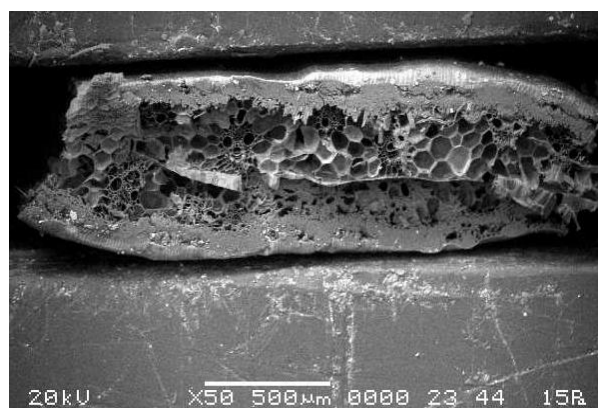


Рисунок 4. – Фрагмент сплющенной трубки соломы в виде пластинки (торцевое сечение, 50 крат)

Деформированные трубки соломы с овальным очертанием в поперечном сечении сохраняют микроструктуру без значительных разрушений за исключением зон разрыва и смятия, что не влияет на теплоизоляционные свойства материала. В трубках, деформированных до формы пластинок, частично сминается внутренняя область, что может оказывать незначительное негативное влияние на коэффициент теплопроводности теплоизоляционной плиты.

Из полученных изображений фрагментов измельченной соломы следует, что по поперечному контуру (продольным и поперечным граням) происходят значительные разрушения микроструктуры в виде разрывов и смятия ячеек. При этом получаемая рваная и сильно деформированная поверхность должна способствовать повышению адгезии с вяжущим компонентом.

Основываясь на значительном объеме исследований микроструктуры растительных материалов [8–11], полученные данные по результатам электронной микроскопии позволяют предположить, что рисовая лузга обладает достаточно высокими теплоизоляционными свойствами и может применяться не только для производства конструктивно-теплоизоляционных материалов⁶ [4], но и для получения тепловой изоляции. Использование пшеничной соломы в структурообразующей композиции позволит улучшить теплотехнические характеристики теплоизоляционного материала на основе рисовой лузги.

Первоначально определяли коэффициент теплопроводности рисовой лузги как сыпучего материала без использования вяжущего. Лузга засыпалась в измерительное устройство прибора ИТП-МГ4 и подпрессовывалась за счет поджатия смеси крышкой прибора. В итоге плотность рисовой лузги при измерении теплопроводности составила 133,3 кг/м³, что на 27% превысило показатель плотности в насыпном состоянии равный 105 кг/м³. Прибор показал значение коэффициента теплопроводности равное 0,053 Вт/(м·К). Полученный результат указывает на то, что рисовая лузга имеет низкий показатель теплопроводности в насыпном состоянии и при необходимости может использоваться в качестве простой засыпной изоляции. Однако следует учитывать при утеплении зданий засыпной изоляцией, что необходимо предусмотреть защиту от горения при пожаре и загнивания в случае переувлажнения лузги.

⁵ См. сноску 2.

⁶ См. сноску 2.

Далее изучили возможность использования модифицированного жидкого стекла в качестве вяжущего компонента. В жидком виде стекло вводили в количестве 150 и 200 г на экспериментальную плиту. Концентрация жидкого стекла по сухому веществу составляла 45%. Для равномерного распределения тонким слоем жидкого стекла по поверхности структурообразующего материала рисовую лузгу предварительно обрызгивали водой с распылителя в количестве 50 г. Затем вводили вяжущее и тщательно перемешивали. После сушки масса плит составила 320 и 340 г соответственно (составы 2, 3, таблица 1).

Показатели коэффициента теплопроводности плит на рисовой лузге составили 0,06 и 0,062 Вт/(м·К). Таким образом, установлено, что присутствие жидкого стекла в теплоизоляционных плитах на рисовой лузге повышает коэффициент теплопроводности на 13–17%. При этом прослеживается зависимость, чем больше жидкого стекла в структуре плит, тем выше коэффициент теплопроводности. Такая зависимость объясняется относительно большим значением коэффициента теплопроводности самого жидкого стекла в сухом твердом состоянии. По данным исследований [8], коэффициент теплопроводности плиты из жидкого стекла равен 0,305 Вт/(м·К).

Несмотря на прирост теплопроводности, жидкое стекло обеспечивает высокую адгезию с частицами рисовой лузги. Высокой прочности сцепления рисовой лузги с органическими и неорганическими вяжущими не всегда удается достичь по причине присутствия на поверхности скорлупы тонкого воскового слоя.

Необходимо отметить, что по причине малого давления формования или малого расхода жидкого стекла плиты на рисовой лузге держали форму, но имели слабосвязанную структуру. Однако увеличение давления или расхода жидкого стекла приводит к увеличению и без того достаточно высокой плотности равной 170,7–181,3 кг/м³ и при этом повышает коэффициент теплопроводности утеплителя.

В научных исследованиях существует практика использования двухкомпонентных структурообразующих композиционных материалов, обеспечивающих существенное снижение теплопроводности утеплителей⁷ [8; 9; 12]. Для снижения коэффициента теплопроводности плит часть рисовой лузги заменяли пшеничной соломой как эффективным теплоизоляционным материалом, также являющимся отходом растениеводства.

Предварительно рисовую лузгу обрызгивали водой в количестве 50 г, затем вводили модифицированное жидкое стекло и перемешивали. Далее, чередуя с перемешиванием, частями добавляли резанную или измельченную солому. Такой способ перемешивания смеси обеспечивает получение равномерного распределения по объему соломы и достижения однородной структуры при формовании. Результаты исследований по определению плотности, коэффициента теплопроводности и прочности на сжатие при 10% деформации экспериментальных плит приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Составы и свойства плит из смеси лузги и соломы на модифицированном жидком стекле

Составы	Масса плиты, г	Соотношение лузги и соломы	Состав плиты				Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Прочность на сжатие, МПа	Состояние плит
			лузга, г	резанная солома, г	измельченная солома, г	жидкое стекло, г				
1	250	-	250	-	-	-	133,3	0,053	-	-
2	320	-	250	-	-	150	170,7	0,06	-	Слабосвязанная структура
3	340	-	250	-	-	200	181,3	0,062	-	Слабосвязанная структура
4	340	50:50	125	125	-	200	181,3	0,054	0,48	Жесткая, прочная
5	340	50:50	125	-	125	200	181,3	0,059	0,42	Жесткая, прочная
6	320	50:50	125	125	-	150	170,7	0,052	0,39	Поверхностное шелушение
7	320	50:50	125	-	125	150	170,7	0,058	0,35	Поверхностное шелушение
8	340	70:30	175	75	-	200	181,3	0,058	0,44	Жесткая, прочная
9	340	70:30	175	-	75	200	181,3	0,06	0,42	Жесткая, прочная
10	320	70:30	175	75	-	150	170,7	0,055	-	Слабосвязанная структура
11	320	70:30	175	-	75	150	170,7	0,056	-	Слабосвязанная структура
12	305	55:45	125	90	-	200	162,7	0,055	0,44	Жесткая, прочная
13	285	55:45	125	90	-	150	152	0,057	0,38	Поверхностное шелушение

В исследованиях 30 и 50% рисовой лузги по массе заменяли соломой. Плотность плит в сухом состоянии изменялась от 152 до 181,3 кг/м³. Также визуально оценивалось состояние плит после сушки. На рисунке 5 приведена теплоизоляционная плита (состав 4).

Из полученных результатов следует, что наименьший коэффициент теплопроводности 0,052 Вт/(м·К) имеет состав 6 при равном соотношении лузги и соломы при расходе жидкого стекла 150 г на плиту. При этом состояние плиты оценивается как неудовлетворительное, т.к. отмечается поверхностное шелушение лузги и измельченной соломы. Также состав 6 обеспечивает не самый высокий показатель прочности на сжатие. Плиты состава 6 не отвечают потребительским требованиям по качеству.

⁷ Авраменко, В.В. Легкие бетоны на основе растительного сырья и минеральных вяжущих для стеновых ограждений : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / В.В. Авраменко. – Новосибирск, 2010. – 168 с.



Рисунок 5. – Внешний вид плиты на основе смеси рисовой лузги и резанной соломы (состав 4) в приборе ИТП-МГ4

Жесткие и прочные плиты получены на составах 4 и 12. Коэффициенты теплопроводности плит превышают показатели состава 6 незначительно и равны 0,054 и 0,055 Вт/(м·К) соответственно. Теплоизоляционные плиты (составы 4 и 12) обеспечивают максимальные показатели прочности на сжатие и на 13 и 23% соответственно превышают показатели состава 6. Состояние плит составов 4 и 12 оценивается как удовлетворительное.

При анализе показателя теплопроводности отмечается, что показатели плит на резанной соломе (составы 4, 6, 8, 10) в среднем на 10% ниже, чем для составов на измельченной соломе (составы 5, 7, 9, 11). Также установлено, что увеличение процентного содержания соломы обеспечивает снижение коэффициента теплопроводности.

Прочность на сжатие повышается при увеличении расхода жидкого стекла до 23%. Введение резанной соломы по сравнению с применением измельченной соломы повышает прочность на 11–14%.

Снижение коэффициента теплопроводности в составах на основе смеси лузги и соломы объясняется спецификой строения микроструктуры пшеничной соломы, рассмотренной выше.

Повышение прочности плит при введении резанной соломы в сравнении с композициями на измельченной соломе объясняется формированием более прочной пространственной структуры из сплюснутых до пластинок или деформированных до овальной формы трубок соломы.

В ряде работ по исследованию новых теплоизоляционных материалов особое внимание уделяется исследованиям сорбционной влажности при значениях относительной влажности воздуха 40–97% с построением изотерм сорбции [8; 9; 13]. Сорбция водяного пара является главной причиной увлажнения изоляции в конструкциях зданий и относится к основным показателям, влияющим на теплопроводность утеплителей [14; 15]. Имеющийся опыт исследований свидетельствует о том, что только определения показателей плотности, теплопроводности недостаточно для подтверждения эффективной работы тепловой изоляции и долговечности утеплителей. Определение сорбционной влажности изоляционных материалов и структурообразующего растительного сырья является одним из этапов по определению данных показателей.

Исследования сорбции водяных паров проводились на рисовой лузге без вяжущего компонента и на композиционных составах из смеси лузги и соломы с применением модифицированного жидкого стекла. При соответствующей относительной влажности воздуха в эксикаторы помещали по две партии образцов рисовой лузги. Под рисунком 6 партии образцов обозначены М1–М10.

По полученным данным построены зависимости изменения сорбции водяных паров рисовой лузгой во времени (см. рисунок 6). Максимальная сорбционная влажность рисовой лузги соответствует 19,25–19,5% при относительной влажности воздуха 97%. Исходя из опыта таких исследований можно говорить о низком значении сорбции водяных паров лузгой, что является достаточно редкой особенностью, свойственной растительному материалу, произрастающему во влажных климатических условиях с постоянной относительной влажностью воздуха более 80%.

Продолжительность процесса сорбции при относительной влажности воздуха 40–97% составляет 28 суток и находится в средних временных рамках по отношению к другим растительным материалам. При относительной влажности воздуха 60–80% показатели сорбции рисовой лузги находятся в пределах 7,75–12%, что является достаточно низким показателем. Также отмечается, что сорбционная влажность рисовой лузги при относительной влажности воздуха 97% превышает показатель при влажности воздуха 60% только в 2 раза, что также подтверждает низкие значения сорбции и должно положительно влиять на показатель теплопроводности теплоизоляционных плит в условиях эксплуатации.

Однако при относительной влажности воздуха 90% на 41 сутки зафиксировано появление серой плесени на поверхности образцов. Через 32 дня после начала испытаний серая плесень появилась и на образцах, находившихся в эксикаторе с относительной влажностью воздуха 97%. Необходимо отметить, что период между моментом наступления максимальной сорбции и появлением плесени достаточно короткий и составляет от 4 до 13 суток.

Кроме сорбции рисовой лузги исследовали показатель и для двухкомпонентных композиций из смеси лузги и соломы на модифицированном жидком стекле. Исследования сорбции проводили на образцах составов 4, 5, 9, 10 из таблицы 1. При каждой относительной влажности воздуха в эксикаторах испытывали по две партии образцов составов 4, 5, 9, 10. Партия включает пять образцов. Таким образом, сорбцию для каждого состава испытывали на 10 партиях образцов. В условных обозначениях графиков (рисунок 7) партии образцов обозначены N1–N10.

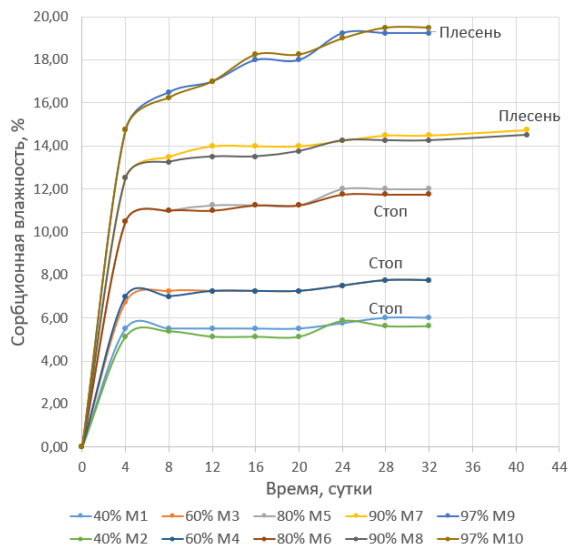


Рисунок 6. – Кинетика сорбции водяных паров рисовой лузгой

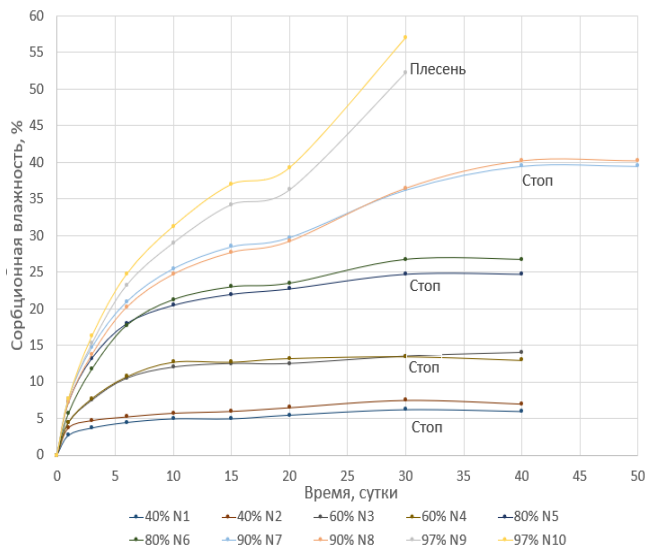


Рисунок 7. – Кинетика сорбции водяных паров (состав 4)

Данные кинетики сорбции водяных паров смесью рисовой лузги и соломы, содержащей жидкое стекло (состав 10), существенно не отличаются от показателей при относительной влажности воздуха 40% и 60%. Превышение на 3% наблюдается при относительной влажности воздуха 60%. Однако существенные отличия появляются при нахождении образцов при относительной влажности 80–97%. Так, уже при влажности воздуха 80% показатель сорбции достигает 20%, что в 1,7 раза выше, чем у показателя рисовой лузги, и период до максимальной сорбции увеличивается на 2 суток.

При относительной влажности воздуха 90% показатель сорбционной влажности состава 10 увеличивается в 2 раза по сравнению со значением сорбции лузги и достигает 30,7%, а период сорбции более продолжительный и составил 40 суток без появления плесени.

Максимальные показатели сорбции, которые удалось зафиксировать, составляют 48,2–49,5% и достигнуты при относительной влажности воздуха 97%. При этом, если рассмотреть кривые изменения сорбции, то можно предположить, что плесень появилась раньше, чем наступил период насыщения сорбционной влажностью образцов. Траектории кривых сорбции идут вверх в момент, когда на 30 суток зафиксировано появление плесени.

Сопоставление данных состава 9 и состава 10 не выявило значительных отличий. Показатели сорбционной влажности находятся в близком диапазоне. Идентичность результатов позволяет говорить о том, что при одинаковом соотношении растительного сырья формы и геометрические размеры частиц соломы, а также дозировка модифицированного жидкого стекла в пределах 150–200 г на плиту не оказывают существенного влияния на сорбцию водяных паров композиционными составами 9 и 10.

Изменение соотношения лузги к соломе с 70:30 на 50:50 позволило выявить фактор, влияющий на сорбцию водяных паров композициями. При анализе данных по кинетике сорбции состава 5 установлено увеличение показателей сорбционной влажности по сравнению с составом 10. Отличие в показателях сорбции при относительной влажности воздуха 40 и 60% составляют 1,5–2%. Максимально отличия в значениях сорбции проявляются при относительной влажности 80–97%. При влажности воздуха 80% прирост сорбции относительно значений состава 10 равен 3,6%. Разница при относительной влажности воздуха 90% достигает практически 6%. Показатели сорбции при влажности воздуха 97% отличаются на 3,5% и после 30 суток испытаний на поверхности образцов появилась плесень.

Анализ показателей состава 4 (см. рисунок 7) указывает на аналогичные показатели, что и у состава 5. Таким образом, основным фактором, влияющим на показатель сорбции в сторону увеличения, является количество пшеничной соломы в композиции.

Модифицированное жидкое стекло обеспечивает сильную щелочную среду, что сдерживает образование и развитие плесени в композициях. Так, даже при высоких показателях сорбционной влажности 40,3% (состав 4, при влажности воздуха 90%) плесень в композициях отсутствует. Но уже при сорбции 42,5% (состав 9, относительная влажность воздуха 97%) плесень появляется на образцах.

Как показали наблюдения в процессе определения сорбции композиций, плесень появляется в первую очередь на частицах соломы. В отличие от лузги пшеничная солома менее стойка к образованию плесени на поверхности частиц, т.к. сорбирует больше влаги из воздуха.

Повышение стойкости к образованию плесени за счет введения жидкого стекла подтверждает и тот факт, что, несмотря на высокую сорбцию образцов из смеси лузги и соломы, композиции показывают стойкость к образованию плесени при относительной влажности воздуха 90% на протяжении 50 суток и более. В отличие от рисовой лузги, на образцах которой плесень появилась на 41 сутки при относительной влажности воздуха 90%. Отсутствие плесени на образцах косвенно подтверждает долговечность композиций и эффективную работу тепловой изоляции на их основе.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что пшеничная солома может использоваться как дополнительный компонент структурообразующей композиции с рисовой лузгой для снижения коэффициента теплопроводности. Замена от 30 до 50% рисовой лузги измельченной или резанной пшеничной соломой в теплоизоляционных составах на жидком стекле позволяет снизить коэффициент теплопроводности до 0,054–0,055 Вт/(м·К) при плотности 162,7–181,3 кг/м³. Кроме того, формируемая соломой и лузгой связанная структура обеспечивает для теплоизоляционных плит прочность на сжатие при 10% деформации в пределах 0,044–0,048 МПа.

2. Присутствие пшеничной соломы снижает теплопроводность композиций на основе рисовой лузги, но при этом существенно повышает сорбционную влажность при относительной влажности воздуха 80–97%. Наибольший показатель сорбции водяных паров равный 57% достигает композиция из смеси лузги и соломы в соотношении 50:50 при относительной влажности 97%. Однако присутствие модифицированного жидкого стекла обеспечивает отсутствие плесени даже при сорбционной влажности материала равной 40% в условиях относительной влажности 90%.

Следует отметить, что при естественной относительной влажности воздуха 60% сорбция утеплителей на основе смеси лузги и соломы в зависимости от содержания соломы в композиции изменяется в пределах 9,75–13,5%, что не может вызвать значительного повышения коэффициента теплопроводности и появление плесени, влекущее за собой биоразрушение тепловой изоляции.

3. По результатам исследования получены образцы теплоизоляционных плит на основе рисовой лузги и пшеничной соломы с вяжущим компонентом в виде жидкого стекла, имеющие абсолютную экологическую чистоту и являющиеся безопасными для здоровья человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sivakumar, K. Performance analysis of downdraft gasifier for agriwaste biomass materials / K. Sivakumar, N.K. Mohan // *Indian J. of Science and Technology*. – 2010. – Vol. 3, iss. 1. – P. 58–60. DOI: 10.17485/ijst/2010/v3i1.14.
2. Ebaid, R.A. Utilization of rice husk as an organic fertilizer to improve productivity and water use efficiency in rice fields / R.A. Ebaid, I.S. El-Refaee // *African Crop Science Conference Proceeding*. – 2007. – Vol. 8. – P. 1923–1928.
3. Evaluation of Industrial By-Products as Sustainable Pozzolan Materials in Recycled Aggregate Concrete / M.F. Alnahhal [et al.] // *Sustainability*. – 2017. – Vol. 9, iss. 5. – P. 767. DOI: 10.3390/su9050767.
4. Баринаова, Т.А. Монолитный арболит на рисовой лузге / Т.А. Баринаова, П.В. Сирота, С.А. Удодов // *Научные труды КубГТУ*. – 2020. – № 8. – С. 185–189.
5. Шорсткий, И.А. Исследование основных теплофизических и прочностных свойств теплоизоляционных плит на основе гранул рисовой лузги / И.А. Шорсткий, М.Д. Соснин // *Научные труды КубГТУ*. – 2015. – № 13. – С. 198–207.
6. Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells / D.W. Yarbrough [et al.] // *Therm. Cond.* – 2005. – № 27. – P. 222–230.
7. A review on utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy / JS. Lim [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2012. – Vol. 16, iss. 5. – P. 3084–3094. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.051.
8. Bakatovich, A. Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin / A. Bakatovich, F. Gaspar, N. Boltrushevich // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 352. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055.
9. Bakatovich, A. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste / A. Bakatovich, N. Davydenko, F. Gaspar // *Energy and Buildings*. – 2018. – Vol. 180. – P. 72–82. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.032.
10. Building insulation materials based on agricultural wastes / F. Gaspar [et al.] // *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction* / ed. F. Pacheco-Torgal, V. Ivanov, D. Tsang. – Sawston, 2020. – Vol. 8. – P. 149–170. DOI: 10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8.
11. Бакатович, А.А. Основные свойства теплоизоляционных плит с применением мха сфагнума, тростника и соломы / А.А. Бакатович // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Прикладные науки*. – 2018. – № 8. – С. 35–42.
12. Colleta, F. Hemp-Straw Composites: Thermal and Hygric Performances / F. Colleta, S. Prétota, C. Lanosa // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 139. – P. 294–300. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.211.
13. Romanovskiy, S. Effect of Modified Liquid Glass on Absorption Humidity and Thermal Conductivity of Flax Fiber Slabs / S. Romanovskiy, A. Bakatovich // *IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 660. DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012072.
14. Пастушков, П.П. О проблемах определения теплопроводности строительных материалов / П.П. Пастушков // *Строительные материалы*. – 2019. – № 4. – С. 57–63. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63.
15. Киселев, И.Я. Влияние равновесной сорбционной влажности строительных материалов на сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий / И.Я. Киселев // *Жилищное строительство*. – 2013. – № 6. – С. 40–44.

REFERENCES

1. Sivakumar, K. & Mohan, N.K. (2010). Performance analysis of downdraft gasifier for agriwaste biomass materials. *Indian J. of Science and Technology*, 3 (1), 58–60. DOI: 10.17485/ijst/2010/v3i1.14.
2. Ebaid, R.A. & El-Refae, I.S. (2007). Utilization of rice husk as an organic fertilizer to improve productivity and water use efficiency in rice fields. *African Crop Science Conference Proceeding*, 8, 1923–1928.
3. Alnahhal, M.F., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Alqedra, M.A., Mo, K.H. & Sumesh, M. (2017). Evaluation of Industrial By-Products as Sustainable Pozzolanic Materials in Recycled Aggregate Concrete. *Sustainability*, 9 (5), 767. DOI: 10.3390/su9050767.
4. Barinova, T.A., Sirota, P.V. & Udodov, S.A. (2020). Monolitnyi arbolit na risovoi luzge [Monolithic arbolyte on rice lug]. *Nauchnye trudy KubGTU [Scientific Works of the Kuban State Technological University]*, (8), 185–189. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Shorstkii, I.A. & Sosnin, M.D. (2015). Issledovanie osnovnykh teplofizicheskikh i prochnostnykh svoystv teploizolyatsionnykh plit na osnove granul risovoi luzgi [Thermal and strength properties studying of based on rice husk granules insulation boards]. *Nauchnye trudy KubGTU [Scientific Works of the Kuban State Technological University]*, (13), 198–207. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Yarbrough, D.W., Wikes, K.E., Olivier, P.A., Graves, R.S. & Vohra, A. (2005). Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells. *Therm. Cond.*, (27), 222–230.
7. Lim, J.S., Manan, Z.A., Alwi, S.R.W. & Hashim, H. (2012). A review on utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (5), 3084–3094. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.051.
8. Bakatovich, A., Gaspar, F. & Boltrushovich, N. (2022). Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin. *Construction and Building Materials*, 352. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055.
9. Bakatovich, A., Davydenko, N. & Gaspar, F. (2018). Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. *Energy and Buildings*, 180, 72–82. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.09.032.
10. Gaspar, F., Bakatovich, A., Davydenko, N. & Joshi, A. (2020). Building insulation materials based on agricultural wastes. In F. Pacheco-Torgal (Eds.), V. Ivanov (Eds.) & D. Tsang (Eds.) *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Vol 8. Bio-Based Materials and Biotechnologies for Eco-Efficient Construction* (149–170). Sawston: Woodhead Publishing. DOI: 10.1016/B978-0-12-819481-2.00008-8.
11. Bakatovich, A.A. (2018). Osnovnye svoystva teploizolyatsionnykh plit s primeneniem mkha sfagnuma, trostnika i solomy [The main properties of thermal insulation plates with the use of sphagnum moss, reeds and straw]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences]*, (8), 35–42. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Colleta, F., Prétota, S. & Lanosa, C. (2017). Hemp-Straw Composites: Thermal and Hygric Performances. *Energy Procedia*, 139, 294–300. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.211.
13. Romanovskiy, S. & Bakatovich, A. (2019). Effect of Modified Liquid Glass on Absorption Humidity and Thermal Conductivity of Flax Fiber Slabs. *IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering*, 660. DOI: 10.1088/1757-899X/660/1/012072.
14. Pastushkov, P.P. (2019). O problemakh opredeleniya teploprovodnosti stroitel'nykh materialov [On the Problems of Determining the Thermal Conductivity of Building Materials]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (4), 57–63. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63.
15. Kiselev, I.Y. (2013). Vliyanie ravnovesnoi sorbtionnoi vlazhnosti stroitel'nykh materialov na soprotivlenie teploperedache ograzhdayushchikh konstruktivnykh zdaniy. *Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing Construction]*, (6), 39–40. (In Russ.).

Поступила 12.10.2022

INSULATING COMPOSITES BASED ON A MIXTURE OF RICE HUSK AND STRAW

A. BAKATOVICH, YI ZHANG
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)
F. GASPAR
(Leiria Polytechnical Institute, Portugal)

The present study is aimed at obtaining environmentally friendly thermal insulation slabs containing rice husk as the main structure-forming material. The second component of the structure-forming composition is wheat straw. The experimental data on the physical properties of thermal insulation slabs, included the measurement of density, thermal conductivity, sorption moisture and compressive strength. The use of straw in an amount of up to 50% of the total mass of the composition allows to reduce the coefficient of thermal conductivity of insulation slabs to 0,054 – 0,055 W/(m·K). The indicators of the thermal conductivity coefficient of insulation slabs are due to the microstructure of husk and wheat straw, which is confirmed by the results of electron microscopy obtained in the course of research. Liquid glass ensures the formation of a rigid and durable structure of environmentally friendly thermal insulation boards and prevents damage to the insulation by rodents.

Keywords: rice husk, wheat straw, thermal insulation slabs, thermal conductivity, sorption moisture.