

Давыденко Н.В., Бакатович А.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОСТРОСОЛОМЕННЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПЛИТ

Ежегодно образующиеся многотоннажные отходы растениеводства в виде соломы злаковых культур, костры льна и отсутствие технологий, позволяющих в полном объеме с наибольшим эффектом использовать получаемые сырьевые ресурсы, указывают на необходимость нахождения рационального решения по утилизации соломы и костры.

Анализ экспериментальных работ в странах Европы и России по исследованию теплоизоляционных материалов подтверждает перспективность и актуальность применения различных растительных отходов в качестве наполнителей для производства теплоизоляционных материалов с достижением максимального экономического эффекта при обеспечении экологической безопасности для окружающей среды и человека.

На начальном этапе исследований установлено, что композитный наполнитель, состоящий из смеси рубленой ржаной соломы и костры льна позволяет существенно улучшить физико-механические характеристики теплоизоляционного материала по отношению к утеплителям, содержащим в качестве наполнителя только солому или костру льна. Определено, что оптимальный размер крупного наполнителя соломы составляет 20-40 мм, а мелкого наполнителя – костры льна – равен 5 мм [1].

В качестве вяжущего использовали жидкое стекло. Применение жидкого стекла, например, в отличие от латекса или дисперсии ПВА, существенно повышает огнестойкость материалов [2], это положительное свойство вяжущего будет проявляться и для утеплителя из горючих наполнителей на основе дробленой соломы и костры льна.

По результатам предварительных исследований определено, что основными факторами оказывающими наибольшее влияние на физико-механические характеристики теплоизоляционных костросоломенных плит являются расход вяжущего, расход мелкого и крупного наполнителя, давление формования.

С целью установления степени влияния количества вводимого вяжущего, расходов соломы и костры льна, а также давления формования на физико-механические свойства теплоизоляционного костросоломенного материала реализован 3-факторный эксперимент по плану Бокса ($n_0=1$).

Обработка опытных данных выполнена методом регрессионного анализа с применением программы «Statistica». Произведенная проверка значимости найденных коэффициентов регрессии с учетом критерия Стьюдента [3] позволила получить полиномиальные модели средней плотности, прочности на сжатие при 10% деформации, прочности при изгибе и коэффициента теплопроводности костросоломенных плит в кодированных переменных.

Факторы и интервалы варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Единицы измерения	Обозначения в кодированных переменных	Уровни факторов			Интервалы варьирования факторов
			-1	0	+1	
Расход вяжущего	масс. доля	X_1	1	1,4	1,8	0,4
Количество соломы в общем расходе заполнителя	масс. доля	X_2	0,3	0,6	0,9	0,3
Давление формования	$\times 10^{-1}$ МПа	X_3	0,1	0,3	0,5	0,1

Ниже приведены полученные полиномиальные модели для выходных величин:

– средней плотности

$$Y_1 = 245,33 + 20,3 \cdot X_1 + 35,2 \cdot X_3; \quad (1)$$

– прочности на сжатие при 10 % деформации

$$Y_2 = 0,278 + 0,083 \cdot X_1 - 0,049 \cdot X_2 + 0,13 \cdot X_3 - 0,241 \cdot X_2^2; \quad (2)$$

– прочности при изгибе

$$Y_3 = 1,154 + 0,08 \cdot X_1 + 0,041 \cdot X_2 + 0,129 \cdot X_3 - 0,317 \cdot X_2^2; \quad (3)$$

– коэффициента теплопроводности

$$Y_4 = 0,0508 + 0,0033 \cdot X_1 + 0,0022 \cdot X_2 + 0,0091 \cdot X_1^2. \quad (4)$$

Для анализа полученных моделей построены однофакторные графики влияния изменения переменных на свойства материала при нулевых значениях остальных факторов и нулевом значении свободного члена уравнения (рисунки 1 – 4).

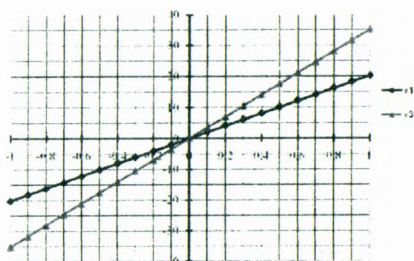


Рисунок 1 – Влияние изменения факторов на среднюю плотность

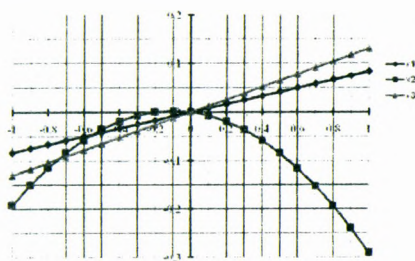


Рисунок 2 – Влияние изменения факторов на прочность на сжатие при 10% деформации

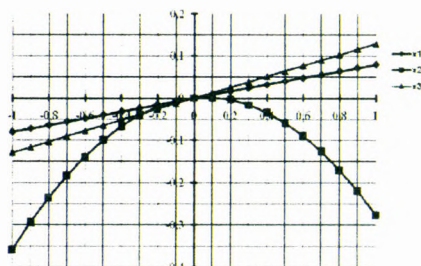


Рисунок 3 – Влияние изменения факторов на прочность при изгибе

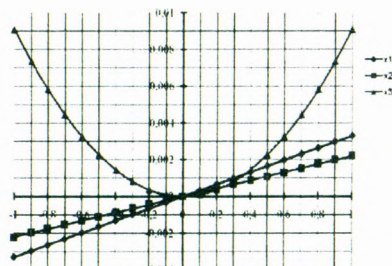


Рисунок 4 – Влияние изменения факторов на коэффициент теплопроводности

Из анализа графика влияния переменных на величину средней плотности (рисунок 1) следует, что с увеличением входных параметров X_1 и X_3 плотность образцов увеличивается по линейному закону. Наибольшее влияние факторов наблюдается при граничных условиях. При этом, расход вяжущего (фактор X_1) оказывает наименьшее влияние на показатель плотности, а давление формования (фактор X_3) – наибольшее.

Анализ графиков влияния изменения переменных на показатели прочности на сжатие при 10 % деформации и прочности при изгибе (рисунки 2, 3) показал, что увеличение доли вяжущего и давления формования приводит к увеличению прочности образцов. Фактор X_2 оказывает отрицательное влияние на изменение прочности. Однако, существует оптимальная область вблизи «нулевого» значения фактора, где отрицательное влияние наименьшее. При этом наибольшее отрицательное влияние на прочностные свойства материала фактор X_2 оказывает при своих граничных значениях.

Анализируя график влияния входных переменных на показатель теплопроводности материала (рисунок 4), можно сделать вывод, что увеличение расхода вяжущего, количества соломы в общем расходе заполнителя и давления формования приводит к увеличению коэффициента теплопроводности. Увеличение факторов X_1 и X_2 приводит к линейному увеличению коэффициента теплопроводности. Причем давление формования (фактор X_3) оказывает наибольшее влияние из всех трех факторов на увеличение выходного параметра. Коэффициент теплопроводности изменяется по параболическому закону в зависимости от величины давления формования. В диапазоне изменения фактора от -1 до 0 величина теплопроводности уменьшается, а в диапазоне от 0 до +1 значение теплопроводности увеличивается. С точки зрения снижения коэффициента теплопроводности материала, оптимальной величиной давления формования является диапазон от -0,2 до +0,2 изменения фактора.

Совместный анализ полученных графиков позволил выявить следующие зависимости. Увеличение расхода вяжущего приводит к увеличению прочностных характеристик, средней плотности и теплопроводности материала. С увеличением давления формования наблюдается увеличение прочностных показателей и плотности образцов. При влиянии давления формования коэффициент теплопроводности изменяется по параболической кривой с экстремумом в «нулевой» точке.

Увеличение фактора X_2 приводит к уменьшению прочностных характеристик материала по параболической зависимости с экстремумом в «нулевой» точке.

Влияние количества соломы в общем расходе заполнителя на коэффициент теплопроводности изменяется по линейной зависимости.

Введение большого количества крупного заполнителя – ржаной соломы является причиной формирования рыхлой структуры со значительным количеством незаполненных пустот и отсутствия связанного каркаса из мелкого заполнителя – костры льна, что приводит к снижению прочностных показателей теплоизоляционного материала.

В тоже время, малое количество ржаной соломы не позволяет получить связный и прочный каркас из крупного заполнителя. Трубки соломы, либо располагаются отдельно друг от друга находясь в структуре каркаса из мелкого заполнителя, либо имеют малое количество точек соприкосновения и, следовательно, небольшую площадь контакта друг с другом. При крайних значениях расходов соломы и костры льна не обеспечивается одновременное формирование жестких каркасов из крупного и мелкого заполнителей для получения оптимальной структуры «каркас в каркасе». Оптимальное соотношение расхода крупного и мелкого заполнителей позволяет получить структуру из двух полноценных сформированных взаимопроникающих каркасов – ржаной соломы и костры льна. Каркас из мелкого заполнителя занимает пространство существующих сообщающихся пустот в каркасе крупного заполнителя. Таким образом, происходит формирование жесткой структуры с более высокими прочностными характеристиками.

Соотношение ржаной соломы и костры льна в смеси заполнителя оказывает значительное влияние на теплоизолирующую способность материала. При высоком расходе крупного заполнителя имеется достаточно большое количество сообщающихся пустот между трубками соломы, не заполненных или частично заполненных мелким заполнителем – кострой льна. В результате происходит формирование и свободное перемещение воздушных потоков в структуре материала, что приводит к повышению коэффициента теплопроводности и снижению термического сопротивления.

Повышение коэффициента теплопроводности материала при малом расходе крупного заполнителя, несмотря на отсутствие сообщающихся пустот в структуре, обусловлено преобладанием мелкого заполнителя, имеющего более высокий коэффициент теплопроводности по сравнению с крупным заполнителем, что объясняется наличием менее эффективной структуры у костры льна по сравнению со ржаной соломой и подтверждается микроскопическими исследованиями. Оптимальное заполнение пространства между трубками соломы кострой льна позволяет формировать структуру «каркас в каркасе» с минимальным количеством мелких не сообщающихся пустот и предотвращает возможность свободного перемещения воздушных потоков в материале.

Формование теплоизоляционного материала при низком давлении является причиной формирования неплотной рыхлой структуры. В такой структуре трубки соломы и костра льна неплотно прилегают друг к другу, что способствует образованию сообщающихся пустот в структуре материала, обуславливающих повышение теплопроводности материала.

Высокое давление формования вызывает деформацию трубок крупного заполнителя. Избыточное давление приводит к смятию ячеистой структуры капилляров соломы и костры льна. В результате происходит уплотнение структуры трубок соломы, при этом часть замкнутых ячеек капилляров в заполнителе полностью разрушается, а в оставшихся поврежденных ячейках нарушается

герметичность и геометрия. Таким образом, увеличение давления формования позволяет получать структуру, обеспечивающую отсутствие пустот в материале, но в то же время разрушает структуру трубок соломы, что и объясняет повышение теплопроводности композита.

Следует отметить, что повышение давления формования вызывает деформации трубок каркаса из соломы вплоть до полного смятия и формирование пластин ломаного очертания. Каркас из соломы, состоящий из деформированных трубок, полностью или частично смятых, приводит к снижению жесткости и прочности структуры «каркас в каркасе» в целом.

Давление формования при низких значениях не позволяет формировать жесткую структуру с высокой прочностью при сжатии и изгибе по причине недостаточного плотного прилегания трубок крупного заполнителя к частицам мелкого заполнителя. Формирующаяся в таких условиях структурная система «каркас в каркасе» имеет достаточно низкую плотность и характеризуется рыхлой структурой с наличием значительного количества пустот. Правильно подобранное давление формования обеспечивает максимальное заполнение объема соломой и кострой при условии формирования структуры «каркас в каркасе» с минимальным количеством мелких пустот и отсутствием деформаций трубок соломы, что и позволяет достичь наилучших теплотехнических показателей.

С целью установления возможных факторов, также обуславливающих в значительной степени физико-механические характеристики теплоизоляционных костросоломенных плит, исследована микроструктура соломы ржи и льна с применением электронной микроскопии. В процессе изучения получены изображения поперечных срезов высушенных стеблей соломы ржи и льна (рисунки 5, 6).

По форме стебли ржи представляют собой пустотелый цилиндр с диаметром внутренней полости, значительно превышающим толщину стенки. Стенка стебля ржи представляет собой густую сеть продольных капилляров с круглой, овальной, гексагональной и неопределенной формой поперечного сечения (рисунок 5).

Площадь пустот на поперечном сечении стебля ржи можно оценить как значительно превышающую площадь межкапиллярного пространства.

Изучение поперечного среза образцов соломы позволило установить две четко различимые структурные области строения капилляров стебля. Внутренняя область с поперечным размером капилляров 40-90 мкм разделенных тонкими прозрачными перегородками толщиной менее 0,5 мкм составляет 50-60% от всего объема структуры стенки стебля и напоминает по строению пчелиные соты.

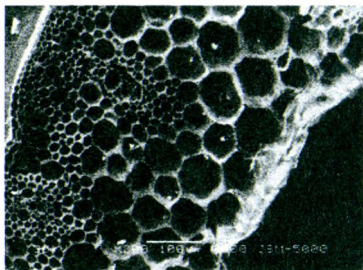


Рисунок 5 – Фрагмент поперечного среза стебля озимой ржи при увеличении 200 крат

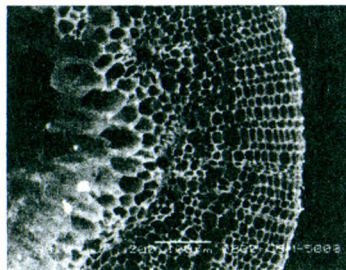


Рисунок 6 – Фрагмент поперечного среза стебля льна при увеличении 200 крат

В поперечном сечении внешняя область представлена капиллярами размером 5-40 мкм с перегородками толщиной около 1-3 мкм и занимает объем равный 40-50 %. Стебель соломы, как с внешней, так и с внутренней стороны, имеет оболочки, защищающие внешнюю и внутреннюю структурные области от повреждений и разрушения.

В случае формирования плит из одной соломы стенки стеблей ржи подвергаются значительным деформациям, приводящим к разрушению капиллярной структуры цилиндра стебля ржи. В результате деформации стебля образуются разрывы структуры во внешней области и происходит смятие капилляров внутренней области, о чем свидетельствуют результаты электронной микроскопии, приведенной на рисунке 7.

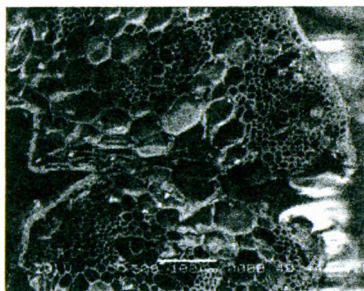


Рисунок 7 – Фрагмент поперечного среза деформированного стебля озимой ржи при увеличении 200 крат

Полученные повреждения стеблей соломы в процессе формовки соломенных плит оказывают существенное влияние на снижение физико-механических характеристик утеплителя.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на теплоизоляционные свойства ржаной соломы оказывает эффективное ячеистое строение капилляров внутренней области стебля близкое по строению со структурой пенополистирола, имеющего ячейки размером 80-150 мкм с толщиной перегородок 1-2 мкм [4].

Микроскопические исследования поперечного среза стебля льна (рисунок 6) позволили установить наличие капиллярной структуры аналогичной строению стебля ржи, однако при этом имеющей свои особенности.

Внутренняя капиллярная область составляет около 15-20 % от общего объема структуры стебля льна. При этом отсутствует внутренняя защитная оболочка в стебле льна. В поперечном сечении капилляры размером 30-70 мкм имеют такую же форму, как у ржаной соломы.

Следует отметить, что в процессе технологической операции по отделению волокна происходит разрушение стенки стебля льна на отдельные фрагменты, в результате чего получают костру льна. На данном технологическом этапе производства внутренняя область стенки стебля практически полностью разрушается, а перегородки сохранившейся части капилляров значительно повреждаются при деформациях. В результате структура костры льна состоит в основном из внешней области стенки льняного стебля, представляющей из себя параллельно расположенные капилляры размером 5-30 мкм с поперечными перегородками толщиной 1-2 мкм. Во внешней области стебля капилляры имеют

близкую к квадратной или прямоугольной форму поперечного сечения и наблюдается достаточно четко ориентированный структурный каркас из продольных перегородок, обусловленный последовательным расположением капилляров от внутренней области к внешней оболочке.

Технологический процесс образования костры льна не позволяет получать мелкий наполнитель для теплоизоляционного материала с сохраненной капиллярной структурой внутренней области стебля, что несколько снижает теплотехнические показатели костры льна по сравнению со стеблями тресты льна.

В процессе изучения изображений срезов отмечается, что перегородки капилляров внешней области стебля, как ржи, так и льна по толщине в 4-6 раз превышают толщину перегородок капилляров внутренней области. Анализируя строение капилляров поперечных сечений стеблей ржи и льна, правильным будет считать, что прочностные характеристики ржаной соломы и костры льна достигаются за счет формируемой в процессе роста капиллярной структуры внешних областей стеблей.

Выполненный комплекс экспериментальных исследований позволил установить границы варьирования факторов, обеспечивающие наилучшие физико-механические характеристики костросоломенных плит. В таблице 2 приведены показатели давления формования в зависимости от расхода жидкого стекла, соотношения соломы и костры льна в смеси наполнителя, позволяющие получить костросоломенные плиты со следующими характеристиками: плотность 220-250 кг/м³, прочность на сжатие при 10% деформации 0,65-0,8 МПа, прочность при изгибе 1-1,2 МПа, коэффициент теплопроводности 0,046-0,055 Вт/(м·°С).

Таблица 2 – Показатели давления формования при заданных расходах вяжущего и соотношениях соломы и костры льна в смеси наполнителя

Расход вяжущего (жидкого стекла), масс. доля	Давление формования, МПа, при соотношении соломы и костры льна в смеси наполнителя		
	7:3	6:4	1:1
1,0	0,04	0,04	0,04
1,1	0,04	0,04	0,04
1,2	0,03	0,03	0,03
1,3	0,03	0,03	0,03
1,4	0,03	0,03	0,03
1,5	0,03	0,03	0,03
1,6	0,02	0,02	0,02
1,7	0,02	0,02	0,02

По данным таблицы 2 можно сделать вывод о том, что для обеспечения оптимальных показателей теплоизоляционного материала при увеличении расхода вяжущего, независимо от соотношения соломы и костры льна в смеси наполнителя требуется уменьшать давление формования с 0,04 до 0,02 МПа. При низких расходах вяжущего соответствующего 1-1,1 масс. долям и соотношениям соломы и костры льна в смеси наполнителя равным 7:3, 6:4, 1:1 необходимо обеспечить более высокое давление формования равное 0,04 МПа. С увеличением расхода вяжущего в пределах до 1,7 масс. долей требуемое давление формования составляет 0,02-0,03 МПа и данный показатель смещается в сторону уменьшения для всех значений соотношений соломы и костры льна.

Установленные в результате комплексных исследований границы варьирования позволили определить, что необходимыми условиями для получения композиционного теплоизоляционного материала с высокими физико-механическими

характеристиками являются: соотношение соломы и костры льна в смеси заполнителя 7:3, 6:4, 1:1, расход вяжущего 1-1,7 масс. долей, давление формования 0,02-0,04 МПа. Варьирование факторов в указанных пределах позволяет сохранить капиллярную структуру соломы с минимальными повреждениями, особенно тонкостенных ячеек капилляров внутренней области стебля в процессе формовки изделий, что и делает возможным получение костросоломенных плит с высокими прочностными и теплотехническими характеристиками.

На сегодняшний день проведены натурные испытания теплоизоляционных соломенных и костросоломенных плит в ограждающих конструкциях жилых домов: колодезной кладке стен, чердачных перекрытиях, вентфасадах. В процессе натурных исследований определены теплофизические параметры теплоизоляционных плит подтверждающие возможность их применения в качестве эффективного экологически безопасного утеплителя при длительных условиях эксплуатации зданий [5].

По результатам исследований разработаны и зарегистрированы технические условия ТУ ВУ 300220696.060 – 2011 «Плиты костросоломенные строительные теплоизоляционные». На протяжении двух последних лет произведенные опытные партии теплоизоляционных плит проходят успешную апробацию в ограждающих конструкциях на двух эксплуатируемых жилых объектах.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Давыденко, Н.В. Отходы сельскохозяйственной переработки в производстве теплоизоляционных материалов / Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. – Сер. Ф: Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 6. – С. 55–60.
2. Бабушкина, М.И. Жидкое стекло в строительстве / М.И. Бабушкина. – Кишинев: Изд. Картя Молдовеняскэ. – 1971. – 215 с.
3. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
4. Коканин, С.В. Исследование долговечности теплоизоляционных материалов на основе пенополистирола: дис. ... канд. техн. наук. 05.23.05 / С.В. Коканин. – Иваново, 2011. – 170 с.
5. Давыденко, Н.В. Опытная эксплуатация теплоизоляционных костросоломенных плит в конструкциях индивидуального жилого дома / Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович // Методология и принципы ценообразования в строительстве. Инновационные технологии в строительной отрасли и их внедрение: материалы I междунар. научно-практич. конф., Минск, 23-24 мая 2013 г. / РУП Республ. научн.-техн. центр по ценообраз. в строит.; ред. кол. Г.А. Пурс [и др.]. – Минск, 2013. – С. 113–118.

УДК 691.327.333:666.9.015.7

Драгель А.А.

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ДИСПЕРСНО-АРМИРУЮЩЕЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА ПЕНОБЕТОНА

Развитие малоэтажного и индивидуального строительства как одного из основных направлений в работе по увеличению жилого фонда требует разработки и организации производства эффективных строительных материалов, сочетающих в себе высокие технические и экономические показатели.

При использовании многих традиционных материалов и однородных конструкций из них выполнить требования к приведенному сопровитвлению теплотеплопередаче ограждающих конструкций, увеличенные по сравнению с ранее действовавшими нормативами, сложно, поскольку толщина стен по теплотехниче-