

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВИЛЬНЮССКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА им. ГЕДЕМИНАСА
БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (УКРАИНА)
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ г. ЛЕЙРИИ (ПОРТУГАЛИЯ)
АРИЭЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ИЗРАИЛЬ)
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

Электронный сборник статей
международной научной конференции,
посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета

(Новополоцк, 5-6 апреля 2018 г.)

Под редакцией
канд. техн. наук, доцента А. А. Бакатовича;
канд. техн. наук, доцента Л. М. Парфеновой

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2018

Редакционная коллегия:

А. А. Бакатович (председатель), Л. М. Парфенова (зам. председателя),
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,
Т. И. Королева, В. Е. Овсейчик

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ [Электронный ресурс] : электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. А. А. Бакатовича, Л. М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Рассмотрены организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.

Компьютерный дизайн К. В. Чулковой, В. А. Крупенина.

Технический редактор О. П. Михайлова.

Компьютерная верстка Т. А. Дарьяновой.

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ОЧЕСОВ ВОЛОКНА ЛЬНА

С.А. Романовский, А.А. Бакатович

Полоцкий государственный университет, Беларусь

e-mail: s.romanovskiy@psu.by, a.bakatovich@psu.by

Приведены составы утеплителей на основе очёсов и волокон льна, позволяющие получить теплоизоляционные плиты с высокими теплофизическими характеристиками. Рассмотрены результаты исследований по получению нерастворимого жидкого стекла в качестве вяжущего с применением минеральных добавок. Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на физико-механические характеристики теплоизоляционных материалов из льняных волокон или очесов. По итогам испытаний получены полиномиальные модели основных характеристик теплоизоляционных плит из очесов льна в кодированных переменных.

Ключевые слова: очесы льна, льняные волокна, утеплитель, жидкое стекло, физико-механические характеристики.

INFLUENCE OF MAIN FACTORS ON PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF HEAT-INSULATING MATERIAL FROM NOILS FLAX FIBER

S. Romanovskiy, A. Bakatovich

Polotsk State University, Belarus

e-mail: s.romanovskiy@psu.by, a.bakatovich@psu.by

The compounds of heaters based on noils and fibers of flax allowing receiving heat-insulating plates with high heatphysical characteristics are given. Results of researches on receiving insoluble liquid glass as knitting with use of mineral additives are considered. The factors exerting the greatest impact on physic-mechanical characteristics of heat-insulating materials from linen fibers or noils are defined. Following the results of tests polynomial models of the main characteristics of heat-insulating plates from flax noils in encoded variables are received.

Keywords: flax noils, linen fibers, heater, liquid glass, physic-mechanical characteristics.

Введение. В условиях мирового энергетического кризиса развитие производства эффективных строительных материалов и экономия топливно-энергетических ресурсов, включая минимизацию тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий, сооружений и технологического оборудования относится к приоритетным задачам. Основным решением по снижению энергозатрат на отопление зданий является повышение термического сопротивления ограждающих конструкций с помощью эффективных теплоизоляционных материалов.

В странах Европы особое внимание в технологиях получения теплоизоляционных материалов уделяется использованию волокнистых отходов растительного происхождения, образующиеся после сбора или переработки урожая [1]. Увеличение объемов применения растительных отходов не только обеспечит строительство дополнительным сырьём и расширит номенклатуру местных строительных материалов, но и будет способствовать сохра-

нению и рациональному использованию природных ресурсов [2]. Таким образом, основываясь на указанных критериях, создание новых эффективных теплоизоляционных материалов на волокнистом сырье растительного происхождения, является весьма актуальным направлением в промышленности изоляционных материалов.

Материалы и методы. Основной комплекс исследований по определению физико-механических характеристик образцов выполняли отдельно на заполнителях из очесов или волокна льна, получаемых на Поставском льнозаводе (Беларусь) и отвечающие требованиям ГОСТ Р 53486 [3] и СТБ 1195-2008 [4]. При изготовлении теплоизоляционных плит в качестве вяжущего использовали натриевое жидкое стекло ОАО «Домановский производственно-торговый комбинат», соответствующее требованиям ГОСТ 13078 [5]. В исследованиях использовали волокна льна длиной до 25 см и очесы длиной 5–10 см.

При изготовлении исследуемых образцов соблюдали определенную последовательность выполнения технологических операций. Предварительно производили дозировку компонентов. Для образцов из очёсов льна добавляли жидкое стекло к заполнителю и перемешивали. Утеплитель на основе волокна льна изготавливали послойной пропиткой жидким стеклом полотен из волокон. Образцы выдерживали в форме 6 часов при температуре 20 ± 2 °С, а затем высушивали в течение 4 часов в сушильном шкафу при температуре 45–55 °С.

Среднюю плотность и теплопроводность определяли согласно ГОСТ 17177 [6] и СТБ 1618 [7] соответственно на образцах-плитах размером 250×250×50 мм. Прочность на сжатие при 10% деформации исследовали на образцах-кубах размером 100×100×100 мм по ГОСТ 17177 [6]. Водостойкость натриевого жидкого стекла определяли методом высушивания с использованием фланелевой ткани, приведенной в работе [7].

Обработку опытных данных при проведении трехфакторного эксперимента осуществляли методом регрессионного анализа с применением программы «Statistica 10». Математическую обработку результатов производили в соответствии с [8–10].

Экспериментальные исследования. Первоначально для определения условий структурообразования теплоизоляционных материалов варьировали среднюю плотность при постоянном расходе жидкого стекла – 10 кг. Результаты исследований физико-механических характеристик полученных образцов приведены на рисунках 1–3. Зависимость коэффициента теплопроводности от средней плотности теплоизоляционных плит показана на рисунке 1.

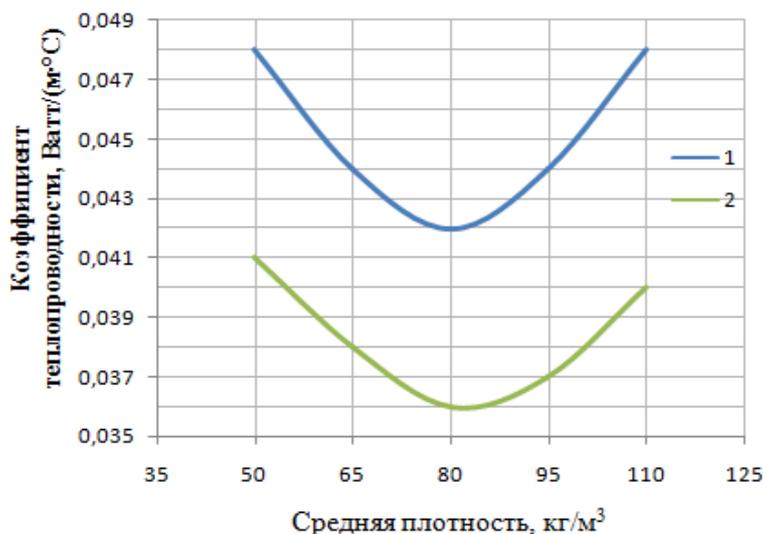


Рисунок 1. – Зависимость коэффициента теплопроводности от средней плотности: 1 – образцы из волокон льна; 2 – образцы из льняных очесов

Анализ полученных зависимостей (рис. 1) позволяет сделать вывод о том, что увеличение количества заполнителя с целью повышения плотности утеплителя до 80 кг/м^3 независимо от вида волокон приводит к уменьшению теплопроводности, а дальнейший рост плотности вызывает повышение исследуемого параметра. Достаточно высокая теплопроводность при плотности менее 50 кг/м^3 обусловлена тем, что в процессе изготовления образцов формируется рыхлая волокнистая структура, способствующая прохождению через материал теплых воздушных потоков. При малой плотности волокна льна недостаточно плотно прилегают друг к другу, что приводит к образованию сетчатой структуры со сквозными пустотами, обеспечивающих перенос потоков теплового воздуха. Постепенное увеличение количества заполнителя до плотности утеплителя 80 кг/м^3 способствует уменьшению объема и размеров пустот с одновременной локализацией на отдельные замкнутые микропространства, не сообщающиеся друг с другом. Стоит отметить, что численность соприкосновений волокон между собой значительно увеличивается и материал приобретает плотную, жесткую структуру, функционирование сквозных воздушных потоков прекращается. При последующем повышении количества заполнителя до плотности 110 кг/м^3 , численность замкнутых микропустот, с отсутствием циркуляции в них воздуха, резко сокращается, площадь и количество точечных контактов между волокнами значительно увеличивается, что в совокупности ведет к повышению теплопроводности. Например, при плотности утеплителя на основе очесов льна 50 кг/м^3 теплопроводность составляет $0,041 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Снижение коэффициента теплопроводности до $0,036 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ происходит при увеличении плотности в 1,6 раза до 80 кг/м^3 . Дальнейшее возрастание средней плотности до 110 кг/м^3 приводит к повышению теплопроводности до $0,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Для плит из волокон льна установлена аналогичная зависимость, так минимальное значение коэффициента теплопроводности $0,042 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ соответствует плотности 80 кг/м^3 . При уменьшении плотности до 50 кг/м^3 и увеличении до 110 кг/м^3 установлено повышение коэффициента теплопроводности на 14% до $0,048 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Таким образом установлено, что наилучшими показателями теплопроводности обладают теплоизоляционные плиты на основе очесов волокна льна. При плотности утеплителя на основе волокон льна 80 кг/м^3 коэффициент теплопроводности составляет $0,042 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. При замене льняных волокон очесами льна происходит снижение теплопроводности на 20% до значения, равного $0,036 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Влияние средней плотности на прочность материала при 10% деформации приведено на рисунке 2.

Из полученных результатов (см. рис. 2) следует, что увеличение плотности теплоизоляционных плит при постоянном расходе вяжущего приводит к повышению прочности на сжатие при 10% деформации. При плотности 50 кг/м^3 теплоизоляционных плит из очесов льна прочность на сжатие составляет $0,11 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$. Увеличение средней плотности в 2,2 раза приводит к повышению прочности в 3,2 раза до $0,35 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$. Образцы утеплителя на основе волокон льна при максимальной плотности 110 кг/м^3 достигают прочности равной $0,45 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$. Снижение плотности до 50 кг/м^3 вызывает понижение показателя прочности на сжатие при 10% деформации в 2,5 раза. Необходимо отметить, что в исследуемом диапазоне плотности, прочность на сжатие выше у теплоизоляционных материалов на основе волокон льна в среднем на 46% по сравнению с утеплителями из очёсов волокна льна.

При средней плотности 50 кг/м^3 рыхлая волокнистая структура утеплителя, обладающая значительным объемом пустотного пространства и относительно небольшим количеством соприкосновений между волокнами, не обеспечивает высоких прочностных характеристик материала. Повышение прочности при плотности 110 кг/м^3 обусловлено формиро-

ванием плотной волокнистой структуры с возросшим количеством и с увеличенной общей площадью контактных точек в процессе уплотнения волокнистого заполнителя утеплителя.

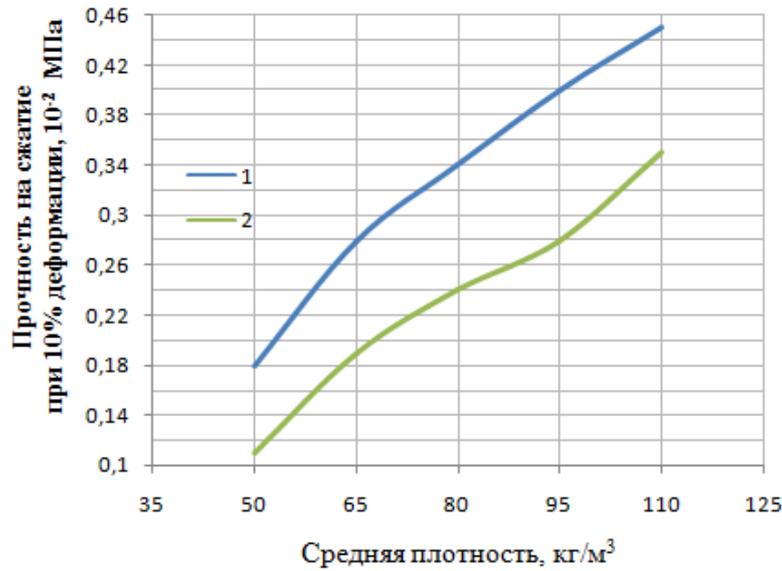


Рисунок 2. – Зависимость прочности на сжатие при 10% деформации от средней плотности: 1 – образцы из волокон льна; 2 – образцы из льняных очесов

На рисунке 3 приведена зависимость давления формования от средней плотности.

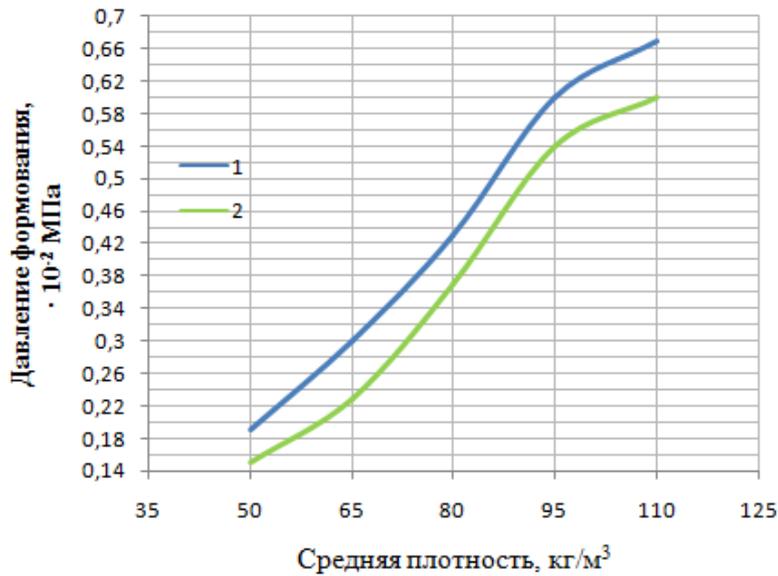


Рисунок 3. – Зависимость давления формования от средней плотности: 1 – образцы из волокон льна; 2 – образцы из очесов льна

Из анализа полученных данных следует, что давление формования напрямую связано с плотностью утеплителя. При повышении количества волокнистого заполнителя увеличивается средняя плотность, что обуславливает возрастание давления формования при уплотнении структуры утеплителя. В среднем, давление формования образцов из волокон льна превышает значение плит из очесов льна на 17 %. Необходимо обеспечивать большее давление формования образцов из волокон льна по причине большей упругости волокон, воз-

никающей в результате их большего диаметра и длины. Для образцов из очесов льна при плотности 110 кг/м^3 максимальное давление составляет $0,6 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$ и возрастает в 4 раза относительно показателя при плотности 50 кг/м^3 . С увеличением плотности плит из волокон льна от 50 до 110 кг/м^3 давление формования увеличивается в 3,5 раза и равно $0,67 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$. Следует отметить, что максимальное давление формования позволяет получать плотную структуру, обеспечивающую минимальную пустотность в материале, при наибольшем количестве точек контакта между волокнами.

На втором этапе исследований при постоянном расходе волокнистого заполнителя (70 кг) среднюю плотность утеплителя изменяли путем варьирования расхода вяжущего – жидкого стекла. За базовый принимали состав плотностью 80 кг/м^3 из первой части исследований. Физико-механические характеристики теплоизоляционных плит приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Физико-механические характеристики теплоизоляционных плит

№ состава	Вид заполнителя	Расход натриевого жидкого стекла, кг	Средняя плотность, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}^\circ\text{С)}$	Прочности на сжатие при 10% деформации, $\cdot 10^{-2} \text{ МПа}$	Давления формования, $\cdot 10^{-2} \text{ МПа}$
1	Волокна льна	5	75	0,04	0,3	0,48
2		10	80	0,042	0,33	0,42
3		15	85	0,044	0,38	0,38
4		20	90	0,049	0,45	0,35
5	Льняные очесы	5	75	0,035	0,22	0,41
6		10	80	0,036	0,24	0,36
7		15	85	0,039	0,28	0,32
8		20	90	0,043	0,36	0,3

Полученные данные (см. табл. 1) свидетельствуют о том, что наилучшими показателями теплопроводности характеризуются образцы с наименьшим расходом связующего. При этом, теплопроводность материала на основе льняных волокон (состав 1) при плотности 75 кг/м^3 превышает на 14 % показатель плит из очесов льна (состав 5). Увеличение средней плотности от 75 до 90 кг/м^3 при постоянной массе заполнителя приводит к повышению теплопроводности утеплителей из волокон и очесов льна на 22% и 23% соответственно. Данная зависимость обусловлена тем, что толщина пленки из натриевого жидкого стекла, покрывающей волокна постепенно увеличивается и количество проводимого тепла через слой жидкого стекла возрастает.

Наибольшей прочностью в исследуемом диапазоне плотностей характеризуются материалы на основе волокон льна. Так, при плотности утеплителя из льняных волокон 90 кг/м^3 (состав 4), прочность на сжатие на 20% больше, чем у плит на основе очесов льна (состав 8). Также установлено, что с увеличением расхода жидкого стекла происходит повышение прочности на сжатие при 10% деформации. Так, при возрастании плотности с 75 до 90 кг/м^3 прочность утеплителя из очесов льна возрастает на 64%, а из льняных волокон на 50%. Данная зависимость обусловлена тем, что при увеличении средней плотности образуется более плотная структура утеплителя в связи с увеличением толщины пленки, покрывающей и придающей дополнительную жесткость волокнам, параллельно заполняющей пустоты. Кроме того, благодаря увеличению расхода связующего, повышается площадь каждого контакта между волокнами или очесами. На увеличение прочности также оказывает влияние больший диаметр волокна по сравнению с размером поперечного сечения элементарного волокна очёса.

Увеличение плотности утеплителя за счет повышения расхода жидкого стекла не зависимо от вида волокон приводит к уменьшению давления формования. С увеличением плотности от 75 до 90 кг/м³ (составы 5-8) давление формования снижается на 27% и достигает 0,3 · 10⁻² МПа. Относительно начального давления 0,48 · 10⁻² МПа (состав 1) также и для составов из волокна происходит падение показателя на 27% (состав 4). Снижение давления формования при повышении плотности связано со смачиваемостью волокон. При повышении расхода жидкого стекла, вода, находящаяся в нем, впитывается волокнами или очесами льна, и способствует развитию временной пластичности и гибкости волокон, в результате снижается жесткость структурного каркаса из волокон.

С целью обеспечения долговечности теплоизоляционных плит в условиях повышенной влажности подбирали количество вводимой добавки из извести или гипса, а также двухкомпонентной добавки из извести и гипса с соотношении 1:1, обеспечивающей водостойкость натриевого жидкого стекла как вяжущего материала. Водостойкость жидкого стекла определяли по массе нерастворимого остатка вяжущего. На рисунке 4 представлена зависимость изменения водостойкости жидкого стекла от количества добавки.

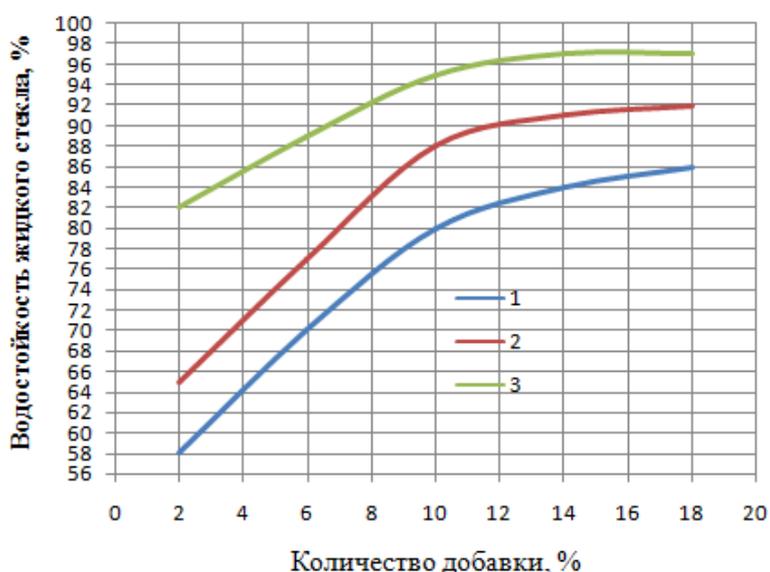


Рисунок 4. – Зависимость водостойкости жидкого стекла от количества добавки:
1 – известь; 2 – гипс; 3 – известь и гипс

Основываясь на полученных результатах (рис. 4) оптимальное количество вводимых добавок составляет 8–14%. Введение извести при таких дозировках позволяет получить водостойкий остаток, равный 76–84% по массе. Растворимость жидкого стекла с добавкой гипса составляет не более 17% с образованием водостойкого остатка в количестве 83–91%. Двухкомпонентная добавка извести и гипса повышает водостойкость жидкого стекла до 92–97%. Исходя из экономической целесообразности, наиболее оптимальным является количество добавки из извести и гипса в пределах 10% от массы связующего, позволяющая обеспечить водостойкость жидкого стекла на уровне 95%.

По результатам комплексных исследований установлено, что основными факторами, оказывающими наибольшее влияние на физико-механические характеристики разработанных теплоизоляционных плит, являются: плотность утеплителя, расход вяжущего и количество добавки. Установленные в результате исследований границы варьирования для плит из очёсов

льна позволили реализовать 3-х факторный эксперимент по плану Бокса ($n_0=1$). Факторы и интервалы варьирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Единицы измерения	Обозначения в кодированных переменных	Уровни факторов			Интервалы варьирования факторов
			-1	0	+1	
Плотность	кг/м ³	X ₁	40	80	120	40
Расход вяжущего	массовая доля	X ₂	0,08	0,14	0,2	0,06
Количество добавки в общем расходе вяжущего	массовая доля	X ₃	0,06	0,1	0,14	0,04

Произведенная проверка значимости найденных коэффициентов регрессии позволила получить полиномиальные модели давления формования, коэффициента теплопроводности, предела прочности на сжатие при 10% деформации, водостойкости теплоизоляционных плит из очесов волокна льна. Полиномиальные модели выходных величин в кодированных переменных имеют следующий вид:

– *давление формования:*

$$Y_1=0,354+0,2648 \cdot X_1 - 0,0279 \cdot X_2 - 0,017625 \cdot X_1 \cdot X_2;$$

– *коэффициент теплопроводности:*

$$Y_2=0,03725+0,0008 \cdot X_1 + 0,0017 \cdot X_2 + 0,00495 \cdot X_1^2 + 0,000875 \cdot X_1 \cdot X_2;$$

– *предел прочности на сжатие при 10% деформации:*

$$Y_3=0,2675+0,142 \cdot X_1 + 0,019 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_3 - 0,0175 \cdot X_1^2 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_2;$$

– *водостойкость:*

$$Y_4=94,02+0,54 \cdot X_1 + 0,31 \cdot X_2 + 4,67 \cdot X_3 - 0,42 \cdot X_1^2 - 2,17 \cdot X_3^2 + 0,29 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

Заключение. По результатам исследований получены эффективные теплоизоляционные плиты из очесов волокна льна плотностью 40–110 кг/м², характеризующиеся теплопроводностью 0,035–0,043 Вт/(м·°С) и прочностью на сжатие при 10% деформации 0,11–0,36 · 10⁻² МПа. Установлены факторы и определены их границы, оказывающие наибольшее влияние на физико-механические характеристики теплоизоляционных материалов из очесов льна. Получены полиномиальные модели выходных величин в кодированных переменных, позволяющих получить утеплитель на основе льняных очесов с заданными параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыденко, Н.В. Теплоизоляционные плиты на основе отходов растениеводства и неорганического вяжущего : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Н.В. Давыденко. – Новополоцк, 2016. – 28 с.
2. Якубов, С.Э. Теплопроводность и механические свойства строительных материалов на основе минерального и растительного сырья : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / С.Э. Якубов. – Душанбе, 2006. – 34 с.
3. Очёс льняной. Технические условия : ГОСТ Р 53486. – Введ. 01.01.2011. – М. : Стандартинформ, 2010. – 29 с.

4. Волокно льняное трепаное длинное. Технические условия : СТБ 1195 – 2008. – Введ. 30.04.2008. – Минск : Госстандарт, 2008. – 19 с.
5. Стекло натриевое жидкое. Технические условия : ГОСТ 13078-81. – Введ. 01.01.1982. – М. : Стандартиформ, 2005. – 14 с.
7. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний : ГОСТ 17177-94. – Введ. 22.08.1995. – Минск : Минстройархитектур, 1996. – 56 с.
8. Давыденко, Н.В. Повышение водостойкости жидкого стекла, применяемого в качестве вяжущего при производстве теплоизоляционных костросоломенных плит / Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. – 2015. – С. 71–75.
9. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М. : Высш. шк., 1988. – 238 с.
10. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
11. Вознесенский, В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К. : Выща шк., 1989. – 328 с.