

Давыденко Надежда Владимировна, магистр техн. наук,
ст. преподаватель, УО «Полоцкий государственный
университет», г. Новополоцк (Беларусь)

Бакатович Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент,
УО «Полоцкий государственный университет»,
г. Новополоцк (Беларусь)

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ПЛИТЫ ДЛЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ HIGH-PERFORMANCE INSULATING PANELS FOR FENCING CONSTRUCTIONS OF BUILDINGS

АННОТАЦИЯ

Приведены объемы по урожайности соломы злаковых культур и костры льна. Выполнен сравнительный анализ основных физико-механических характеристик теплоизоляционных материалов на основе соломы и костры льна. Рассмотрены результаты электронной микроскопии ржаной соломы и льна, позволяющие объяснить полученные показатели физико-механических характеристик костросоломенных плит. Эффективность применения костросоломенных теплоизоляционных плит показана на примере натурных испытаний наружного стенового ограждения с вентилируемой системой утепления. Представлен расчет влажностного режима наружного стенового ограждения с вентилируемой системой утепления в стационарных условиях.

ABSTRACT

The paper presents the volume of the yield of grain crops straw and flax shive and comparative analysis of the main physical and mechanical properties of thermal insulation materials based on straw and flax shive. The results of electron microscopy of rye straw and flax allowing to explain the obtained indices of physical and mechanical characteristics of straw-boon slabs are examined. The effectiveness of thermal insulation straw-boon slabs was demonstrated through full-scale testing of the outer wall fence with a ventilated insulation system. The article provides a calculation of outer wall fence humidity conditions with a ventilated insulation system under stationary conditions.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в странах Европы и в России уделяется повышенное внимание теплоизоляционным материалам на основе растительных отходов сельского хозяйства, что обусловлено экологической чистотой получаемых утеплителей и возобновляемостью сырьевых ресурсов.

В Беларуси солома злаковых культур ржи, пшеницы, овса и ячменя является многотоннажным отходом производственной деятельности сельскохозяйственного комплекса. Солома представляет собой сухие стебли злаковых зерновых культур, остающиеся после обмолота, а также стебли льна и других растений, освобожденные от листьев, соцветий, семян.

Большая часть соломы в рулонах или тюках с полей доставляется на животноводческие фермы, где складывается в скирдах и используется в дальнейшем для скармливания или подстилки скоту. Как показывает практика, из-за больших объемов производства, до 40–50 % соломы просто не используется и сгнивает в скирдах под открытым небом на полях или на территориях животноводческих комплексов.

Основываясь на данных по урожайности зерновых культур (пункт 15.1.17) [1, с. 333] и методики расчета урожайности соломы [2, с. 215], в таблице 1 приведены показатели урожайности соломы злаковых культур на территории Республики Беларусь.

Таблица 1

Урожайность соломы злаковых культур

Злаковая культура	Урожайность соломы злаковых культур по годам, тысяч тонн								
	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Рожь	1648,4	1404,8	1298,9	1590,8	1798,6	1492,7	903,9	987,8	1321,5
Пшеница	976,3	1184,1	1085,7	1407,1	2053,7	1989,5	1765,8	2214,4	2577,6
Ячмень	1118,7	1510,5	1465,3	1550,4	1779	1720,6	1597,5	1654,3	1552,1
Овес	504,5	617,1	563,3	594,9	609,7	559,5	454,5	473,1	431,5

Ежегодно на льнозаводах Витебской области образуется около 45 тыс. тонн отходов льнопереработки. Так, только по данным объединения ОАО «Витебскобллен» костра льна составляет 25 тыс. тонн, из них 4 тыс. тонн идет на изготовление топливных брикетов, 17 тыс. тонн потребляют на собственные нужды котельные льнозаводов, из оставшихся 4 тыс. тонн около 1 тыс. тонн используется в качестве органических удобрений в почву. Как показывает проведенный по льнозаводам мониторинг, не утилизированная костра гниет в отвалах на территориях предприятий.

Образующиеся объемы соломы злаковых культур, а также костры льна, отсутствие технологий, позволяющих полностью и рационально применять получаемые сырьевые отходы, указывают на необходимость поиска оптимального решения по утилизации.

Анализ экспериментальных работ по исследованию теплоизоляционных материалов подтверждает перспективность и актуальность применения отходов растениеводства в качестве заполнителя в производстве теплоизоляционных плит с достижением максимального экономического эффекта при обеспечении экологической безопасности для окружающей среды и человека.

Анализ основных физико-механических характеристик теплоизоляционных материалов на основе соломы и костры льна

В проводимых исследованиях использовали солому злаковых культур, выращенных на посевных площадях ОАО «Жижова», СПК «Кушлики» Полоцкого района, ОАО «Прудинки», КУСХП «Кохановичи» Верхнедвинского района и костру льна, получаемую на Поставском и Верхнедвинском льнозаводах Витебской области.

Основные физико-механические характеристики теплоизоляционных материалов на основе соломы злаковых культур и костры льна приведены в таблице 2. В качестве вяжущего использовали натриевое жидкое стекло, латекс и эмульсию ПВА в количестве 1,4 масс.д. по сухому веществу. Давление формования образцов составляло 0,03 МПа.

Полученные физико-механические показатели составов 3, 5 на основе пшеничной соломы и костры льна подтверждаются результатами, приведенными в работах [3, с. 77; 4, с. 48].

Среди исследуемых материалов из соломы злаковых культур (составы 1–4) образцы на основе дробленной ржаной соломы (состав 1) обладают одними из лучших физико-механических характеристик. При практически равных значениях плотности и коэффициента теплопроводности, показатель прочности на сжатие при 10 % деформации состава 1 превышает значения составов 2–4 на 17–30 %, а по прочности на изгиб – на 26–41 %, что объясняется большей «жесткостью» стеблей ржаной соломы.

Теплоизоляционный материал на основе костры льна (состав 5) характеризуется наилучшими показателями прочности на сжатие при 10 % деформации и коэффициентом теплопроводности по отношению к составам 1–4. Величина прочности на сжатие при 10 % деформации материала состава 5 больше на 37–78 %, а коэффициент теплопроводности меньше значений составов 1–4 на 4–14 %. При этом показатель прочности на изгиб материала на основе костры льна уступает на 5–24 %

аналогичному показателю материалов на основе соломы злаковых культур (составы 1, 3) и превышает значения составов 2 и 4 на 3–7%.

Таблица 2

**Физико-механические характеристики
теплоизоляционных материалов на основе отходов
растениеводства**

N н/п	Состав		Физико-механические характеристики			
	заполнитель	вяжущее	плотность, кг/м ³	прочность на сжатие при 10 % деформации, МПа	предел прочности при изгибе, МПа	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
1	Ржаная солома	жидкое стекло	215	0,35	0,82	0,059
2	Ячменная солома	жидкое стекло	205	0,27	0,58	0,063
3	Пшеничная солома	жидкое стекло	220	0,3	0,65	0,056
4	Овсяная солома	жидкое стекло	200	0,27	0,6	0,058
5	Костра льна	жидкое стекло	230	0,48	0,62	0,054
6	Ржаная солома и костра льна	жидкое стекло	225	0,6	0,95	0,049
7	Ржаная солома и костра льна	латекс	230	0,64	1,03	0,057
8	Ржаная солома и костра льна	эмульсия ПВА	225	0,65	1,0	0,058

В составах 6–8 ржаную солому вводили как крупный заполнитель, а костра льна являлась мелким заполнителем. Соотношение крупного и мелкого заполнителей в смеси по массе принимали равным 7:3. Использовали ржаную солому с длиной трубок не более 80 мм, фракция костры льна составляла не более 15 мм.

Применение композитного заполнителя позволяет улучшить физико-механические характеристики теплоизоляционных материалов (составы 6–8) по отношению к составам 1–5 с однокомпонентными заполнителями. В качестве вяжущего наибольший интерес вызывает применение жидкого стекла. Как известно, в отличие от латекса и дисперсии ПВА использование жидкого стекла существенно повышает огнестойкость материалов [5, с. 72]; это свойство будет проявляться и для горючих заполнителей из дробленой соломы и костры льна. При

этом, из данных таблицы 2 следует, что показатели состава 6 из смеси ржаной соломы с кострой льна на жидком стекле превышают значения составов 1,5 по прочности на сжатие при 10 % деформации на 25 и 71 %, по пределу прочности при изгибе – на 53 и 16 % и имеют более низкий на 9 и 17 % коэффициент теплопроводности соответственно. Таким образом, утеплители на основе смеси ржаной соломы с кострой льна (составы 6–8) следует считать более эффективными по сравнению с теплоизоляционными материалами на основе соломы злаковых культур или костры льна (составы 1–5).

Полученные результаты исследований позволяют прогнозировать возможность получения высокоэффективных теплоизоляционных плит на основе ржаной соломы, костры льна и жидкого стекла.

Результаты электронной микроскопии

С целью установления возможных факторов, обуславливающих физико-механические характеристики теплоизоляционных костросоломенных плит, изучена микроструктура соломы ржи и льна с применением электронной микроскопии. В процессе исследования получены изображения поперечных срезов высушенных стеблей соломы ржи и льна (рисунки 1, 2).

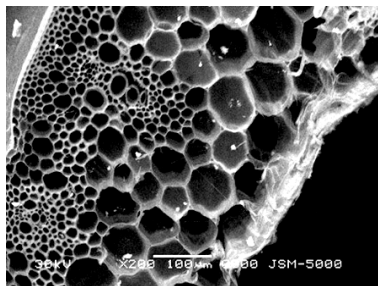


Рисунок 1. Фрагмент поперечного среза стебля озимой ржи при увеличении 200 крат

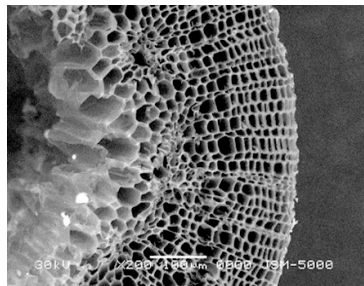


Рисунок 2. Фрагмент поперечного среза стебля льна при увеличении 200 крат

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 1).

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.

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 формования 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 3.

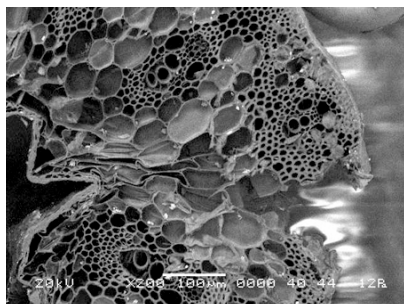


Рисунок 3. Фрагмент поперечного среза деформированного стебля озимой ржи при увеличении 200 крат

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 [6, с. 17].

Микроскопические исследования поперечного среза стебля льна (рисунок 2) 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.

Таким образом, 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.

Применение крупного наполнителя, полученного путем нарезки стеблей соломы длиной 20–40 мм, оптимально подобранное соотношение соломы и костры льна, а также давление формования 0,02–0,03 МПа 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.

Применение теплоизоляционных плит в наружном стеновом ограждении с вентилируемой системой утепления

Необходимо учитывать, что окончательная эффективность костросоломенных плит может быть подтверждена только прямыми натурными испытаниями утеплителя в конструкциях эксплуатируемых зданий с постоянной фиксацией основных теплофизических характеристик и мониторингом общего состояния конструкций.

Результаты исследований по применению теплоизоляционных плит в колодцевой кладке стен приведены в работе [7, с. 117]. Ниже рассмотрены результаты применения соломенных и костросоломенных плит для наружного стенового ограждения с вентилируемой системой утепления. Плиты утеплителя фиксировали на кирпичной стене индивидуального жилого дома при помощи дюбелей с оцинкованным металлическим сердечником.

Наружное стеновое ограждение с вентилируемой системой утепления представляет собой трехслойную конструкцию с эффективной теплоизоляцией из соломенных (стена 1) и костросоломенных плит (стена 2). В стеновой конструкции для каждой исследуемой теплоизоляционной плиты устанавливались термопары и датчики теплового потока согласно схеме, приведенной на рисунке 4.

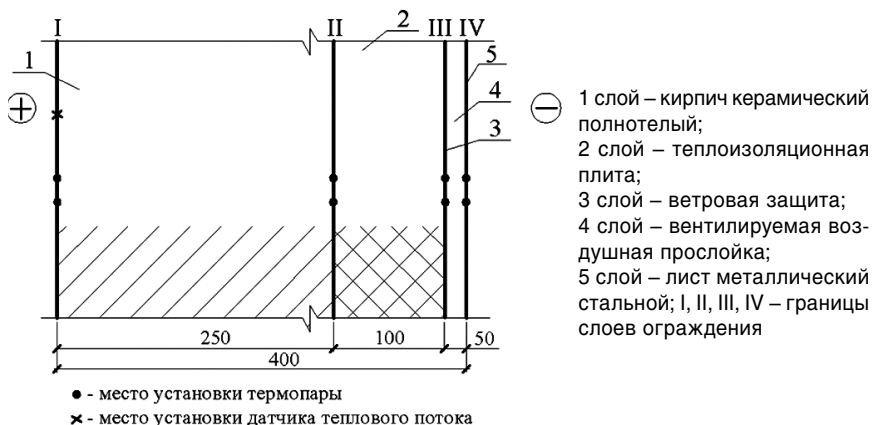


Рисунок 4. Схема расположения термопар и датчиков тепловых потоков по сечению наружной стены с вентилируемой системой утепления

Показатели температур и плотностей тепловых потоков фиксировались информационно-измерительным комплексом РТП-1-16Т в течение

осенне-зимне-весеннего периода. В качестве примера рассмотрен временной промежуток с 15 января по 3 февраля 2014 года, являющийся наиболее холодным за зимний период.

На рисунке 5 представлены распределения температур по толщине стены 1 и стены 2 за период 20 суток. Значения температур приняты как средние величины показаний температур с 22 часов вечера до 6 часов утра.

Из графиков распределения температур следует, что для наружного ограждения стены 1 средняя температура внутренней поверхности на границе I меньше на $1,6^{\circ}\text{C}$, чем для стены 2. При минимальной температуре наружного воздуха $t_n = -22,6^{\circ}\text{C}$ показатели температур внутренней поверхности ограждения на границе I отличаются на 2°C .

Среднее значение температуры теплоизоляционной плиты на границе II стены 1 на $2,4^{\circ}\text{C}$ меньше величины температуры стены 2. На границе III средний показатель температуры утеплителя на основе соломы становится больше значения температуры утеплителя из смеси соломы и костры льна на $1,9^{\circ}\text{C}$.

Амплитуда средней температуры для стены 1 с соломенными плитами составляет $26,5^{\circ}\text{C}$, а стены 2 соответствует 30°C . При минимальном значении температуры наружного воздуха показатели амплитуды температур увеличиваются и равны $29,2^{\circ}\text{C}$ и $33,8^{\circ}\text{C}$ соответственно.

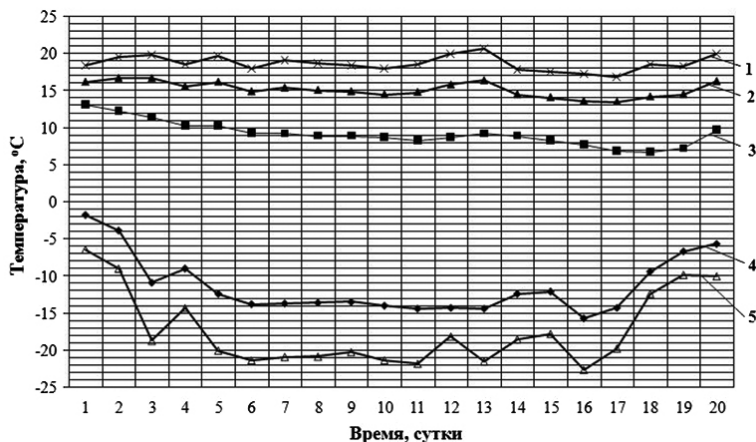
На данный момент вентилируемая система утепления функционирует 2 года; повреждений, разрушений и смещений теплоизоляционных плит не наблюдается. Таким образом, натурные испытания теплоизоляционного материала подтверждают возможность применения костросоломенных плит как эффективного утеплителя для стен при устройстве вентилируемой системы утепления.

Рассмотрим влажностный режим наружного стенового ограждения с вентилируемой системой утепления в стационарных условиях для индивидуального жилого дома.

Расчетные параметры для климатических условий г. Полоцк: температура внутреннего воздуха $t_g = 18^{\circ}\text{C}$, относительная влажность внутреннего воздуха $\varphi_g = 55\%$, средняя месячная температура наиболее холодного месяца $t_n = -6,4^{\circ}\text{C}$, средняя месячная относительная влажность наружного воздуха наиболее холодного месяца $\varphi_n = 82\%$.

В соответствии с изменением № 5 ТКП 45-2.04-43-2006 допускается снижение нормативного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции на 20%. Следовательно, толщина теплоизоляционного слоя составит 0,16 м, и сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции по «глади» равно $3,79 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$.

а)



б)

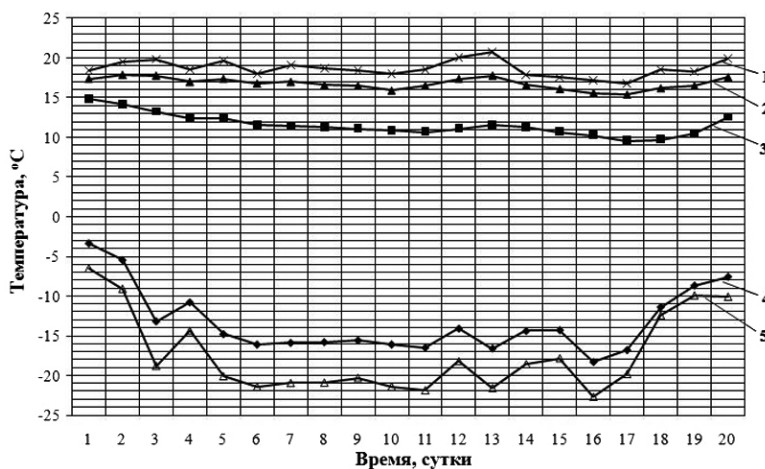


Рисунок 5. Распределение температуры по толщине наружного стенового ограждения с вентилируемой системой утепления:

- а) с соломенной плитой;
- б) с костросоломенной плитой;

- 1 – температура внутреннего воздуха, °С;
- 2 – температура материала 1-го слоя на границе I, °С;
- 3 – температура теплоизоляционного материала 2-го слоя на границе II, °С;
- 4 – температура теплоизоляционного материала 2-го слоя на границе III, °С;
- 5 – температура наружного воздуха, °С

Температуры на поверхностях ограждения, в сечениях материалов стены и парциальные давления водяного пара определены в соответствии с ТКП 45-2.04-43-2006. На основании полученных данных представлены распределения температуры, максимального парциального давления и парциального давления водяного пара по толще стены (рисунок 6).

Так как линии парциального давления (e) и максимального парциального давления (E) не пересекаются, конденсации водяного пара в стене не будет.

В толще стены изменяется также относительная влажность воздуха в порах материалов ограждения. Массовые влажности материалов стены, соответствующие относительной влажности воздуха в их порах, приняты по данным [8, с. 280; 9, с. 89] и приведены в таблице 3.

Таблица 3

№ слоя	Наименование материала конструкции стены	Относительная влажность воздуха в порах материалов φ , %	Массовая влажность W , %
1	известково-песчаная штукатурка	56,55	0,931
2	керамический пустотный кирпич	41,12	0,058
3	костросоломенная плита	46,1	6,62

Полученные значения массовых влажностей материалов ограждения значительно меньше показателей расчетных массовых отношений влаги для известково-песчаной штукатурки ($W=4\%$), для керамического пустотного кирпича ($W=2\%$), приведенных в таблице А1 ТКП 45-2.04-43-2006 и экспериментально определенного [9, с. 89] для костросоломенных плит ($W=31\%$).

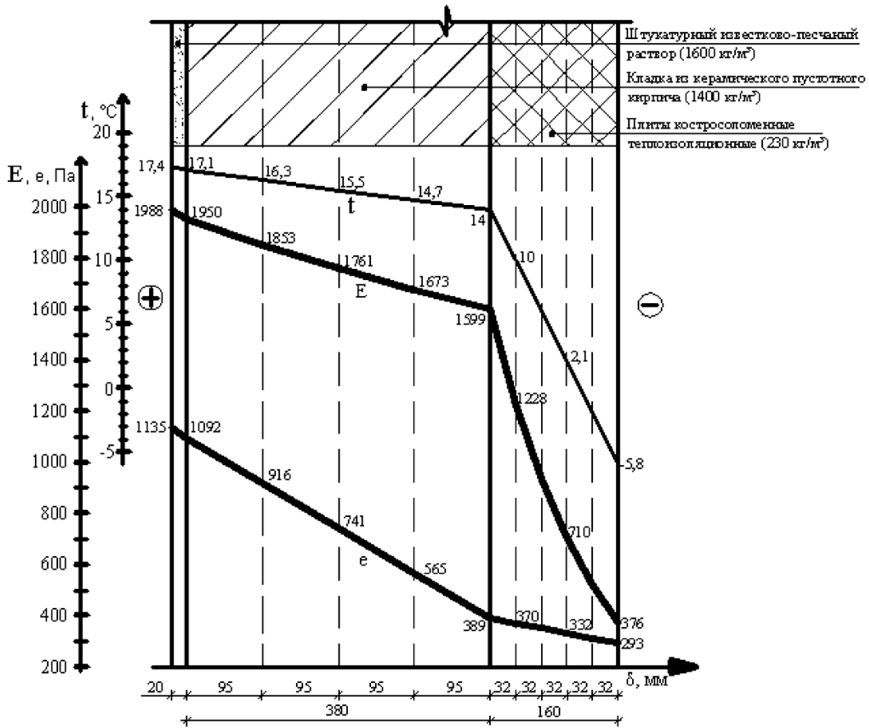


Рисунок 6. Распределение температуры (t), максимального парциального давления (E) и парциального давления (e) по толще стены

Таким образом, результаты выполненного расчета влажностного режима наружной стены подтверждают возможность эксплуатации костросоломенных плит в качестве теплоизоляционного слоя для наружного стенового ограждения с вентилируемой системой утепления при обеспечении и сохранении требуемых физико-механических характеристик материалов ограждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Учитывая сложившуюся современную конъюнктуру на рынке теплоизоляционных материалов, получение экологически безопасного утеплителя с высокими теплотехническими характеристиками на основе соломы и костры льна с применением жидкого стекла в виде вяжущего является перспективным техническим

и экономическим решением по успешной переработке сельскохозяйственных растительных отходов.

2. Внутренние области соломы ржи и льна по структуре схожи со структурой пенополистирола, при размере ячеек, меньшем в 1,5–2 раза, что объясняет высокие теплоизоляционные свойства полученного композита. Во внешней области стеблей размеры капилляров в поперечном сечении в 2–8 раз меньше размеров капилляров внутренней области, а толщина перегородок в 2–6 раз превышает размер перегородок внутренней области. Такая структура внешней области по сравнению со строением внутренней области позволяет обеспечить жесткость и прочность стеблей соломы ржи и костры льна и в значительной степени обуславливает прочностные характеристики полученного теплоизоляционного материала.
3. Повышение амплитуды температур на 4–5°C в исследуемых конструкциях с применением костросоломенных плит по сравнению с соломенными плитами достигается за счет микроструктуры компонентов заполнителя, оптимально подобранного соотношения компонентов костросоломенного утеплителя, позволяющего минимизировать пустотность в плитах, а также более низкой эксплуатационной влажности композита. Достигнутое увеличение амплитуды температур в зимний период позволит сократить расход энергоносителей, а следовательно, снизить финансовые затраты на отопление зданий.
4. Результаты расчета влажностного режима подтверждают эффективность применения костросоломенных плит для ограждающих конструкций с обеспечением высоких физико-механических характеристик при длительной эксплуатации, что способствует повышению долговечности стенового ограждения с вентилируемой системой утепления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Статистический ежегодник 2013. – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2013. – 578 с.
2. Справочник нормативов трудовых и материальных затрат для ведения сельскохозяйственного производства: 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. В.Г. Гусакова. Сост. Я.Н. Бречко, М.Е. Суманов. – Мн.: Учреждение «БелНИИ аграрной экономики», 2002. – 440 с.

3. Петров, А.Н. Теплоизоляционные материалы на основе соломы и неорганических связующих : дис. ...канд. техн. наук : 05.23.05 / А.Н. Петров. – Казань, 1998. – 178 с.
4. Смирнова, О. Е. Теплоизоляционные материалы на основе костры льна : дис. ...канд. техн. наук : 05.23.05 / О.Е. Смирнова. – Новосибирск, 2007. – 134 с.
5. Бабушкина, М.И. Жидкое стекло в строительстве / М.И. Бабушкина. – Кишинев. Изд. Картя Молдовеняскэ. – 1971. – 215 с.
6. Коканин, С.В. Исследование долговечности теплоизоляционных материалов на основе пенополистирола : дис. ...канд. техн. наук. 05.23.05 / С.В. Коканин. – Иваново, 2011. – 170 с.
7. 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.
8. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания / К.Ф. Фокин. – 4-е изд. перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
9. Давыденко, Н.В. Исследование показателей влажностного режима эксплуатации костросоломенных плит / Н.В. Давыденко, А.Н. Левкович, А.А. Бакатович // Инженерные проблемы строительства и эксплуатации сооружений. Вып. 3: сб. научн. тр. / Полоцк. гос. ун-т. ; под ред. О.В. Коробова. – Новополоцк, 2011. – С. 89–92.

Статья поступила в редколлегию 21.09.2014