

УДК 691:035.267

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ****А.В. ДОЛЖОНОК; канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)**

Приведены сведения по применению соломы зерновых культур и костры льна в производстве стеновых строительных материалов. Рассмотрены результаты выполненных исследований по определению теплофизических характеристик стеновых материалов на основе заполнителей из соломы и костры льна при натурных испытаниях. Проанализированы полученные зависимости распределения температур в наиболее холодный период зимнего сезона. Определена зависимость распределения влажности по толщине стеновых материалов после окончания зимнего периода испытаний. Исследована удельная теплоемкость разработанных стеновых блоков и установлена зависимость данной характеристики от температуры в диапазоне от -25 до $+60$ °С.

Ключевые слова: стеновые материалы, солома, костра льна, блоки, влажность, растительное сырье, удельная теплоемкость, влажность, натурные испытания, тепловой поток.

Введение. Важной задачей в строительстве является не только наращивание темпов производства строительных материалов, но и повышение эффективности использования при возведении зданий. По причине сокращения отдельных природных ресурсов необходим поиск новых экологически чистых источников сырья, в частности отходов растениеводства. На сегодняшний день растениеводство, включая выращивание зерновых культур и льна, занимает существенный сегмент в производстве агропромышленного комплекса Республики Беларусь. По данным статистического ежегодника [1] в Республике Беларусь в 2017 году посевные площади зерновых культур составили около 2,43 млн гектаров, льна-долгунца – 47 тыс. гектаров.

Один из способов утилизации соломы – измельчение и разбрасывание по полю с последующей запашкой для восстановления плодородия земель, что приводит к засорению почвы сорняками [2]. Основная часть соломы используется для корма скоту, а также в качестве подстилочного слоя на животноводческих фермах. Использование соломы в виде корма требует предварительной обработки для улучшения питательных качеств, что влечет за собой дополнительные затраты и становится нецелесообразным. Также солома сжигается на полях, что увеличивает выброс парниковых газов в атмосферу и ухудшает экологическую обстановку. Однако использование растительных сельскохозяйственных отходов в качестве заполнителей для стеновых материалов выступает как перспективное и рациональное направление.

Так, известна технология изготовления арболита на основе костры льна и цементного вяжущего [3]. Прочность материала при 10%-ной линейной деформации составляет 0,78...0,95 МПа, теплопроводность – 0,125...0,154 Вт/(м·°С) при плотности 450...510 кг/м³.

В Российской Федерации (Нижний Новгород) разработана технология производства костробретона для малоэтажного монолитного домостроения. Основными компонентами в экспериментальных составах являлись гипсоцементное вяжущее и костра льна [4]. Предложенное технологическое решение позволяет получить костробретон с плотностью 630...980 кг/м³ и пределом прочности на сжатие 0,8...4,4 МПа.

Французскими учеными проводятся исследования биокомпозитных материалов на основе растительного заполнителя из соломы рапса и дробленого ствола подсолнуха [5]. Вяжущим компонентом в разработанном составе выступает глина. При плотности биокомпозита из соломы рапса 250...420 кг/м³ коэффициент теплопроводности составляет 0,07...0,08 Вт/(м·°С). Применение дробленого ствола подсолнуха приводит к увеличению плотности до 400...580 кг/м³ и коэффициента теплопроводности до 0,1...0,14 Вт/(м·°С).

Рисовую солому используют как заполнитель при производстве дешевых строительных блоков для возведения жилья в Египте [6]. Вяжущим компонентом для изготовления стенового материала служит цемент. Тепловые испытания показали, что блоки возможно использовать не только как стеновой материал, но и как изоляционный в условиях жаркого климата.

В Таджикистане применяется технология получения стеновых блоков на основе дробленых стеблей хлопчатника [7]. При изготовлении стенового материала в качестве вяжущего используется портландцемент. Блоки имеют прочность на сжатие 2,9 МПа, коэффициент теплопроводности равен 0,116 Вт/(м·°С) при плотности 600 кг/м³. Жидкое стекло и хлористый кальций используются для предотвращения воздействия на цемент легкорастворимых веществ, содержащихся в стеблях хлопчатника.

В Беларуси на кафедре строительного производства Полоцкого государственного университета разработан стеновой материал в виде блоков на основе соломы и соломы с кострой льна. Стеновые блоки при плотности 530 кг/м³ обеспечивают прочность на сжатие 2...2,2 МПа и имеют коэффициент теплопроводности, равный 0,075...0,085 Вт/(м·°С) [8]. По результатам исследований получен патент № 21884 на состав костросоломенных стеновых блоков [9].

В процессе эксплуатации зданий количественное содержание влаги в материалах ограждающих конструкций изменяется в зависимости от конструктивных особенностей, свойств материалов, температурно-влажностных условий в помещениях, климатических условий района строительства. Влажностный режим определяет эксплуатационно-технические характеристики ограждающих конструкций здания, в том числе долговечность, а также непосредственно влияет на теплозащитные свойства ограждающих конструкций и энергоэффективность применяемых материалов. Данному вопросу в последнее время уделяется все большее внимание, так как результаты исследований влияния влаги на эксплуатационные характеристики становятся определяющим фактором при выборе и применении того или иного теплоизоляционного материала при строительстве зданий.

Методика испытаний. При проведении испытаний стеновых блоков на основе соломы и соломы с кострой льна в условиях эксплуатации измерение температуры окружающего воздуха и поверхности испытываемых образцов осуществлялось с помощью термопар, показателей теплового потока – с применением преобразователей теплового потока, подключенных к прибору РТП-1-16Т. Измерения проводили через каждые 90 секунд. Температуру воздуха в помещении поддерживали на постоянном уровне 20 ± 2 °С, а относительную влажность воздуха – в пределах 55...65%.

За испытуемый образец принимали стеновой блок с размерами $400 \times 300 \times 200$ мм. Для определения температур в толще материала каждый образец условно разделяли на 4 участка толщиной по 75 мм, на границе участков устанавливали термопары (рисунок 1).

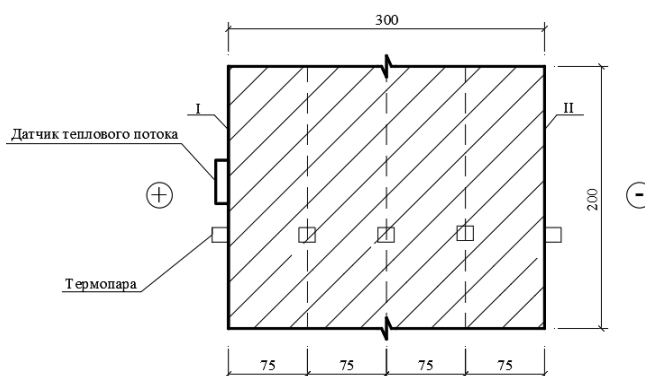


Рисунок 1. – Схема расположения датчиков внутри и на поверхности блока

Влажность стенового материала после испытаний в условиях эксплуатации определяли прямым методом – путем взвешивания вырезанных из блоков образцов размером $100 \times 100 \times 300$ мм (рисунок 2). Длина образца в 300 мм является шириной стенового блока. Полученный образец по длине распиливали поперек волокон на 5 фрагментов толщиной 60 мм. Каждый фрагмент взвешивали, затем высушивали до постоянной массы и определяли влажность по ГОСТ 12730.2 [10].

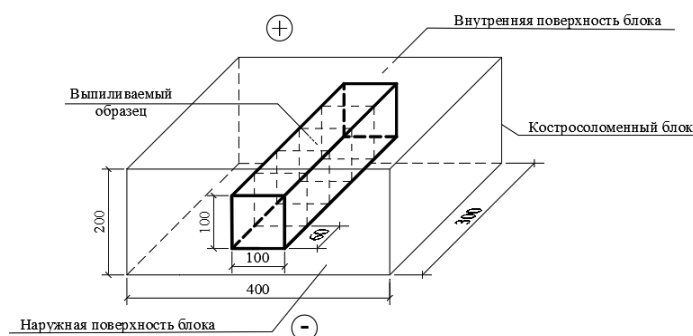
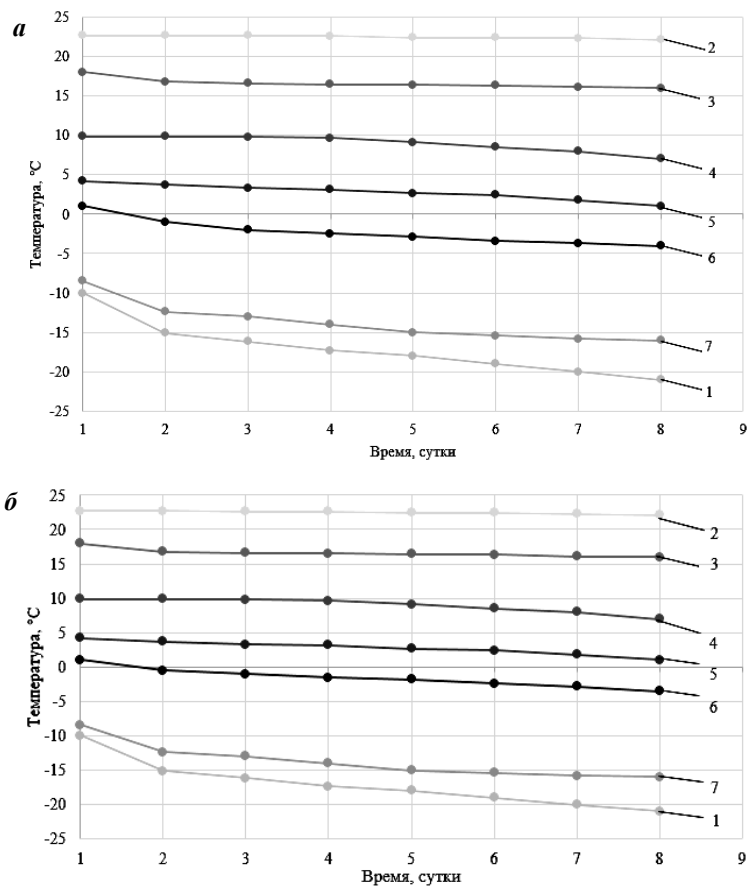


Рисунок 2. – Образец, выпиленный из стенового блока

Определение удельной теплоемкости стеновых материалов производилось с помощью измерителя теплоемкости ИТ-с-400. При проведении измерений испытуемый образец, имеющий форму цилиндра, диаметром 15 и высотой 10 мм, помещали внутрь металлической ампулы, накрывали колпачком и разогревали с помощью нагревателя, размещенного в измерителе теплоемкости. Тепловой поток поступал к ампуле через тепломер. Открытые участки поверхности ампулы изолировали от внешней среды адиабатической оболочкой, чтобы тепловая связь ампулы и образца осуществлялась только через тепломер. Исследования проводились в температурном диапазоне от -40 до $+50$ °С со скоростью нагрева 6 К/мин.

Экспериментальные исследования. Определение температур, показателей тепловых потоков, влажности материала выполняли на костросоломенных и соломенных блоках, находящихся в кладке наружных стен толщиной 300 мм одноэтажного жилого здания.

По результатам проведенных испытаний в зимний период на рисунке 3 представлено распределение температур по толщине стеновых ограждающих конструкций с соломенными и костросоломенными блоками. Значения температур приняты как средние величины показаний температур с 19 часов вечера до 9 часов утра в период с 20 по 27 февраля 2018 года.



- 1 – температура наружного воздуха, °С; 2 – температура внутреннего воздуха, °С;
 3 – температура на поверхности I стенового блока, °С;
 4 – температура блока на расстоянии 75 мм от поверхности I, °С;
 5 – температура блока на расстоянии 150 мм от поверхности I, °С;
 6 – температура блока на расстоянии 225 мм от поверхности I, °С;
 7 – температура блока на поверхности II, °С

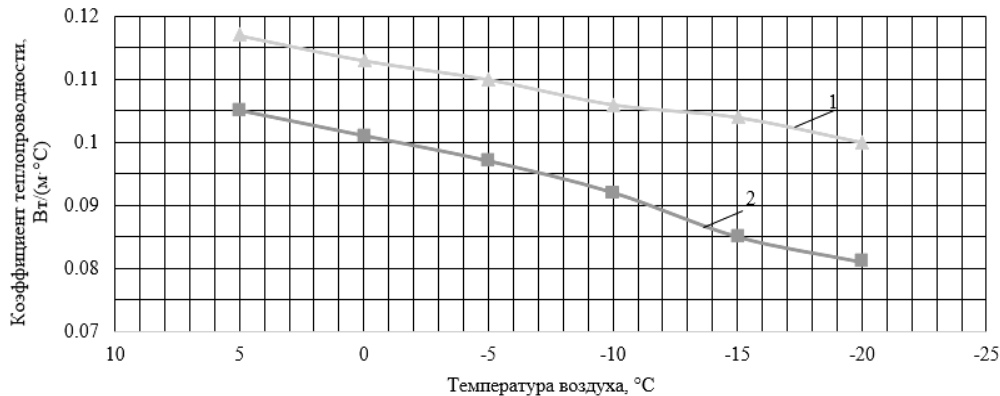
Рисунок 3. – Распределение температуры по толщине наружного стенового материала с соломенным блоком (а), с костросоломенным блоком (б)

При минимальной температуре воздуха $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура на поверхности I со стороны помещения образцов на основе соломы составила $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ меньше в сравнении с образцами на основе соломы с кострой льна. На расстоянии 75 мм от поверхности I температура соломенных образцов составляет $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и меньше показателя костросоломенных образцов, равного $9\text{ }^{\circ}\text{C}$, на 29%. Также разница температур в $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ сохраняется и на расстоянии 150 мм от поверхности I. При этом для соломенных образцов температура достигает только $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для образцов на основе смеси соломы с кострой составляет $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура образцов на основе соломы на расстоянии 225 мм от поверхности I опускается до $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ больше в сравнении с костросоломенными образцами. Температура соломенных образцов на поверхности II со стороны улицы равна $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, на основе смеси соломы с кострой составляет $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разница температур – $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Величина амплитуды температур при $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ образцов на основе соломы составляет $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, а блоков на основе смеси соломы с кострой равняется $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, разница амплитуд температур достигает $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ амплитуда температур блоков на основе соломы составляет $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на 10% меньше, чем показатель блоков на основе соломы с кострой льна, соответствующий $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Амплитуда температур соломенных блоков при температуре -21°C увеличилась на 19% в сравнении со значениями при -10°C . Увеличение амплитуды костросоломенных блоков составило 20%.

На основании полученных показателей плотностей тепловых потоков определены коэффициенты теплопроводности стеновых материалов на основе соломы и смеси соломы с кострой льна. На рисунке 4 приведены зависимости коэффициента теплопроводности от температуры наружного воздуха.



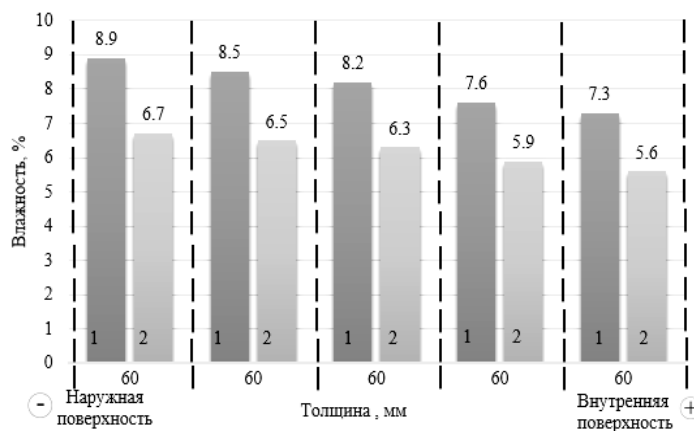
1 – соломенный блок; 2 – костросоломенный блок

Рисунок 4. – Зависимость коэффициента теплопроводности наружного стенового ограждения от температуры наружного воздуха

Так, при температуре -21°C значение коэффициента теплопроводности соломенных блоков составляет 0,1 Вт/(м·°C), что на 24% выше показателя костросоломенных блоков, равного 0,081 Вт/(м·°C). Коэффициент теплопроводности костросоломенных блоков при температуре -10°C равен 0,092 Вт/(м·°C) и меньше значения теплопроводности соломенных блоков на 13%, равного 0,106 Вт/(м·°C). Значение теплопроводности соломенных блоков при температуре $+5^{\circ}\text{C}$ составляет 0,117 Вт/(м·°C), что на 11% больше показателя костросоломенных блоков, равного 0,105 Вт/(м·°C). Коэффициент теплопроводности соломенных блоков при температуре -21°C ниже показателя теплопроводности стеновых блоков при температуре $+5^{\circ}\text{C}$ на 17%. Значение коэффициента теплопроводности костросоломенных блоков снизилось на 30%.

Таким образом, с понижением температуры у экспериментальных стеновых блоков происходит уменьшение значений коэффициента теплопроводности и повышение сопротивления теплопередаче. Такая закономерность проявляется у эффективных теплоизоляционных материалов, что подтверждается исследованиями утеплителей на растительном сырье в работе [11]. Установленные изменения теплофизических показателей при натурных исследованиях подтверждают, что костросоломенные и соломенные стеновые блоки способны обеспечивать эффективную работу по тепловой изоляции наружных стен эксплуатируемых зданий.

В начале весеннего периода, по окончании проведения мониторинга распределения температур, определены значения влажностей соломенных и костросоломенных блоков. По экспериментальным данным получен график распределения влажности по толщине блоков (рисунок 5).



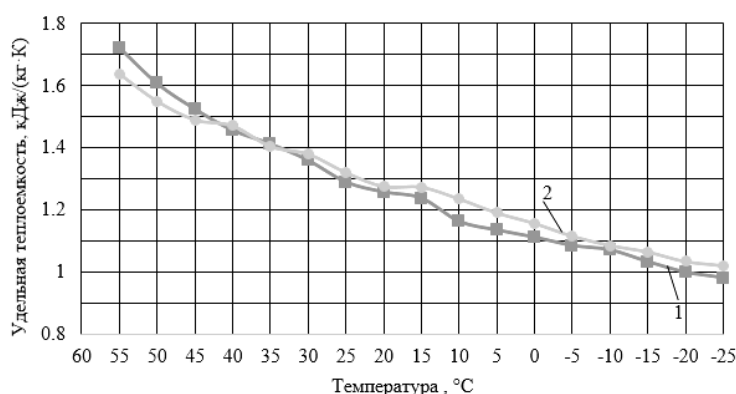
1 – блоки на основе соломы;
2 – блоки на основе смеси соломы с кострой льна

Рисунок 5. – Распределение влажности по толщине стенового материала

Среднее значение влажности блоков на основе соломы составляет 8,1%, что превышает на 31% показатель влажности блоков из смеси соломы и костры, равный 6,2%. Необходимо отметить, что влажность соломенных блоков со стороны помещения составляла 7,3%, что на 30% больше в сравнении с показателем костросоломенных блоков, равным 5,6%. Показатель влажности блоков на основе костросоломенной смеси с наружной стороны меньше на 33% в сравнении со значением соломенных блоков, равным 6,7%.

Повышение влажности блоков из соломы на 31% относительно показателей блоков на основе композиции из смеси соломы и костры льна объясняется большей величиной сорбционной влажности дробленой соломы по сравнению с кострой льна. По этой же причине соломенные блоки насыщаются влагой с большей скоростью, что подтверждается результатами исследования сорбционной влажности дробленой соломы и костры льна приведенными ранее в работе [12]. Необходимо отметить, что за летний период времени в процессе прогревания конструкций стен, костросоломенные и соломенные блоки высыхали, и средняя влажность стеновых материалов составляла не более 4...5%.

Теплоемкость стеновых материалов – один из основных теплофизических показателей. Величина теплоемкости позволяет оценить поведение стенового материала в реальных условиях эксплуатации, когда колебания температуры наружного воздуха носят циклический характер. С этой целью определена теплоемкость разработанных стеновых материалов на основе соломы и смеси соломы с кострой льна при температуре от -25 до $+60$ °С. Определены зависимости изменения удельной теплоемкости образцов от температуры воздуха (рисунок 6). Так, при температуре 20 °С удельная теплоемкость образцов на основе ржаной соломы равна 1,257 кДж/(кг·К), а образцов на основе соломы с кострой льна составляет 1,275 кДж/(кг·К). Таким образом, удельная теплоемкость костросоломенных блоков на 0,018 кДж/(кг·К) превышает показатель соломенных блоков. При уменьшении температуры до -25 °С удельная теплоемкость образцов изменяется в сторону понижения. Так, для образцов на основе соломы с кострой показатель удельной теплоемкости равен 1,018 кДж/(кг·К), что на 25% меньше в сравнении с теплоемкостью при 20 °С. Теплоемкость образцов на основе соломы снизилась на 28% и составила 0,979 кДж/(кг·К).



1 – стеновой материал на основе соломы;
2 – стеновой материал на основе смеси соломы с кострой льна

Рисунок 6. – Зависимость удельной теплоемкости стеновых материалов от температуры воздуха

Результаты исследований свидетельствуют о том, что при одинаковой температуре испытаний показатели удельной теплоемкости образцов с соломой и со смесью соломы с кострой имеют близкие значения. При сравнении с показателями существующих аналогов, таких как кирпич керамический и газосиликатный блок [13], разработанные стеновые материалы обладают более высокой удельной теплоемкостью. Так, для кирпича керамического удельная теплоемкость равна 0,88 кДж/(кг·К), а показатель теплоемкости газосиликатного блока составляет 0,84 кДж/(кг·К), что в 1,4...1,6 раза ниже показателей образцов стеновых блоков на основе соломы и смеси соломы с кострой льна.

Заключение

1. По результатам натурных испытаний при температуре -21 °С амплитуда температур костросоломенных образцов достигла 36 °С, что на 13% больше показателя соломенных образцов, равного 32 °С.

2. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что при температуре -21 °С коэффициент теплопроводности блоков на заполнителе из смеси соломы и костры льна составляет 0,081 Вт/(м·°С), что на 24% ниже показателя стеновых материалов на основе соломы, равного 0,1 Вт/(м·°С).

3. По результатам проведенных исследований установлено, что средняя влажность костросоломенных блоков составляет 6,2%, что на 23% ниже показателя соломенных блоков. Низкие показатели влажности стеновых блоков способствуют обеспечению длительной эксплуатации в стеновых конструкциях с сохранением высоких теплоизоляционных свойств.

4. Проведенные исследования по определению удельной теплоемкости показали, что при понижении температуры теплоемкость стеновых блоков также уменьшается. Теплоемкость образцов на основе соломы при температуре 20 °С составляет 1,257 кДж/(кг·К), а на основе смеси соломы с кострой – 1,275 кДж/(кг·К). Высокие показатели удельной теплоемкости разработанных стеновых блоков по сравнению с традиционными материалами увеличивают теплоизолирующую способность наружных стен и обеспечивают снижение теплопотерь зданий.

5. Полученные результаты испытаний по определению тепло- и гидрофизических характеристик материалов в условиях эксплуатации подтверждают, что стеновые блоки на основе смеси соломы и костры льна выполняют не только функцию стенового ограждения, воспринимающего нагрузку, но и одновременно обеспечивают высокие теплоизолирующие свойства наружных стен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистический ежегодник 2018. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2018. – 490 с.
2. Исследование теплофизических свойств вторичных продуктов сельскохозяйственного производства органического происхождения / Н.В. Савицкий [и др.] // Сборник научных трудов строительства, материаловедения, машиностроения. – 2015. – № 81. – С. 217–223.
3. Бобров, Ю.Л. Новые теплоизоляционные материалы в сельском хозяйстве / Ю.Л. Бобров. – М. : Стройиздат, 1974. – 260 с.
4. Гаврикова, Т.А. Совершенствование технологии малоэтажного монолитного домостроения из кустобетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08 / Т.А. Гаврикова. – Н. Новгород, 2006. – С. 10–12.
5. Hygrothermal Behavior of Clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and Rape Straw (*Brassica napus*) Plaster Bio-Composites for Building Insulation / Y. Brouard [et al.] // Advanced Engineering Forum. – 2017. – Vol. 21. – P. 242–248.
6. Mansour, A. Development of straw-cement composite sustainable building material for low-cost housing in Egypt / A. Mansour, J. Srebric, B. Burley // Journal of Applied Sciences Research. – 2007. – Vol. 3, Iss. 11. – P. 1571–1580.
7. Джумаев, Д.С. Арболит на основе стеблей хлопчатника и технологические особенности его изготовления / Д.С. Джумаев // Вестник КГУСТ. – Бишкек, 2012. – № 3. – С. 10–15.
8. Должонок, А.В. Композиционный стеновой материал на основе отходов растениеводства / А.В. Должонок, Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович // Методология и принципы ценообразования в строительстве. Инновационные технологии в строительной отрасли и их внедрение : материалы IV междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 мая 2017 г. / РУП Республ. научн.-техн. центр по ценообразованию в строительстве ; ред. кол.: Г.А. Пурс [и др.]. – Минск, 2013. – С. 64–68.
9. Сырьевая смесь для изготовления арболита : пат. 21884 ВУ / А.А. Бакатович, Н.В. Давыденко, А.В. Должонок, С.А. Романовский. – Опубл. 30.04.2018.
10. Бетоны. Методы определения влажности : ГОСТ 12730.2-78. – Введ. 01.01.80. – М. : Изд-во стандартов СССР, 1980. – 3 с.
11. 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.
12. Должонок, А.В. Сорбционная влажность стеновых материалов на основе отходов сельскохозяйственного производства / А.В. Должонок, А.А. Бакатович, Н.В. Давыденко // Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных регионов : материалы междунар. науч.-практ. конф., Полоцк, 18–19 окт. 2018 г. ; Полоц. гос. ун-т, 2018. – С. 233–237.
13. Строительная теплотехника с изм. : ТКП 45-2.04-43-2006 (02250). – Взамен СНБ 2.04.01-97 ; Введ. 29.12.2006. – Минск : Минстройархитектуры, 2007. – 35 с.

Поступила 21.12.2018

THE RESEARCH OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF WALL MATERIALS IN THE CONDITIONS OF USE OF A BUILDING

A. DALZHONAK, A. BAKATOVICH

Information on the use of straw crops and flax fires in the production of wall building materials is provided. The results of studies of thermophysical properties of wall materials based on straw aggregates and flax fires during field tests are considered. Obtained diagrams of temperature and humidity distribution inside the wall materials are analyzed. The specific heat capacity of wall materials is investigated. A plot of the specific heat capacity of wall blocks versus the temperature is constructed.

Keywords: wall materials, straw, flax campfire, blocks, humidity, plant raw materials, specific heat capacity, humidity, field tests, heat flux.