

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

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА РАСТИТЕЛЬНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЯХ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ**

А.В. Должнонок, Н.В. Давыденко, А.А. Бакатович

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.dalzhonak@psu.by, n.davydenko@psu.by, a.bakatovich@psu.by

Приведены сведения по применению соломы зерновых культур и костры льна в производстве стеновых строительных материалов. Рассмотрены результаты исследований теплофизических характеристик стеновых материалов на основе заполнителей из соломы и костры льна в климатической камере с анализом полученных графиков распределения температур и влажности по толще материалов.

Ключевые слова: стеновые материалы, солома, костра льна, климатическая камера, влажность, растительное сырье.

**DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF WALL MATERIALS BASED
ON PLANT FILLERS IN THE CLIMATE CELL**

A. Dolzhonok, N. Davydenko, A. Bakatovich

Polotsk State University, Belarus

email: a.dalzhonak@psu.by, n.davydenko@psu.by, a.bakatovich@psu.by

Information about the use of straw cereals and shove in the production of build-ing wall materials is provided. The results of investigations of thermophysical characteristics of wall materials based on fillers from straw and shove in a climatic cell are examined. The analysis of the obtained temperature and humidity distribution graphs in the thickness of materials is held.

Keywords: wall materials, straw, flax, climatic cell, humidity, plant raw material.

На сегодняшний день одной из основных задач строительства является энергосбережение и обеспечение требуемого сопротивления теплопередаче стеновых конструкций при условии минимизации вредного воздействия на окружающую среду и человека. Истощение природных ресурсов приводит к необходимости использования отходов и вторичных продуктов производства при разработке новой строительной продукции. Отходы растительного происхождения используются для производства строительных материалов на протяжении многих столетий, что обусловлено доступностью данного сырья и его низкой стоимостью. Также материалы на основе растительного сырья характеризуются малой теплопроводностью, низкой плотностью и относительно высокой прочностью. Данные свойства позволяют обеспечить широкий спектр применения растительных отходов в строительной сфере. Наиболее широко из сельскохозяйственных растительных отходов в строительстве применяют солому злаковых культур и костру льна.

В Великобритании спрессованную солому используют для получения экопанелей «Stramit» выдерживающих нагрузку в 1100 кг без деформаций и обладающих теплопроводностью 0,099 Вт/(м·°C) [1]. На основе соломенных тюков производят стеновые панели «Есо-

сосоп» (Литва) и «Экобуд» (Россия) толщиной 400 мм с коэффициентом теплопроводности 0,05–0,065 Вт/(м·°C) [2, 3].

Из дробленой соломы ржи, гречихи с применением цемента изготавливают стеновые блоки прочностью 2–2,5 МПа [4]. Разработана технология производства на основе костры льна гипсосодержащего костробетона плотностью 630–980 кг/м³ с пределом прочности на сжатие 0,8–4,4 МПа [5]. При использовании костры льна в цементных смесях для нейтрализации сахаров используют специальные химические добавки, что обеспечивает прочность стеновых блоков в пределах 0,98–5,4 МПа при плотности 480–735 кг/м³ [6].

Проведены исследования легкого конструкционного материала, представляющего собой смесь соломы с известью или гипсом в Université d'Orléans (Франция) [7, 8]. Определены прочностные и теплофизические характеристики. Результаты испытаний показали, что композит, усиленный волокнами из соломы пшеницы, обладает повышенной прочностью на сжатие.

Солому используют в качестве заполнителя при производстве дешевых строительных материалов для возведения жилья в Египте [9]. Вяжущим компонентом является цемент. Утилизация соломы, путем сжигания, приводит к ухудшению экологической обстановки в регионе, загрязняя окружающую среду. Тепловые испытания показали, что блоки возможно использовать в качестве стеновых и теплоизоляционных материалов.

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.

Рассматриваемые в работе результаты исследований связаны с изучением теплофизических характеристик стеновых композиционных материалов на основе соломы, костры льна, цемента и извести. Образцы в виде блоков толщиной 300 мм плотностью 530 кг/м³ помещали между теплым и холодным отделением климатической камеры. Предварительно стеновые материалы выдерживали в климатической камере при заданных температурно-влажностных режимах (табл. 1) в течение 2 недель.

Образцы 3, 4 к началу основной части испытаний имели большую влажность в сравнении с образцами 1, 2.

Таблица 1. – Температурно-влажностные условия в климатической камере

| № образца | Заполнитель | Режим испытаний | Температура воздуха в теплом отделении камеры, t _r °C | Относительная влажность воздуха в камере, W % | |
|-----------|-----------------------|-----------------|--|---|--------------------|
| | | | | теплое отделение | холодное отделение |
| 1 | Солома | 1 | +18 | 55–65 | 55–65 |
| 2 | Солома с кострой льна | | +18 | 55–65 | 55–65 |
| 3 | Солома | 2 | +18 | 55–65 | 90–97 |
| 4 | Солома с кострой льна | | +18 | 55–65 | 90–97 |

Во время проведения испытаний, температуру воздуха в теплом отделении камеры поддерживали на постоянном уровне +18°C и относительную влажность воздуха в пределах 55–65%. В холодном отделении камеры температуру изменяли от +20°C до -20°C с шагом 5°C.

Образцы выдерживали на каждом этапе при заданной температуре на протяжении 5 суток. Распределение температур начинали фиксировать при +5°C в холодном отделении климатической камеры. Измерения проводили информационно-измерительным комплексом РТП-16, через каждые 90 секунд. Для определения температур в толще материала (рис.1) каждый образец условно разделяли на 5 участков толщиной по 60 мм. После окончания испытаний получены распределения температур при температурно-влажностных режимах 1 и 2. По полученным данным определены термические сопротивления теплопередаче и коэффициенты теплопроводности образцов (табл. 2).

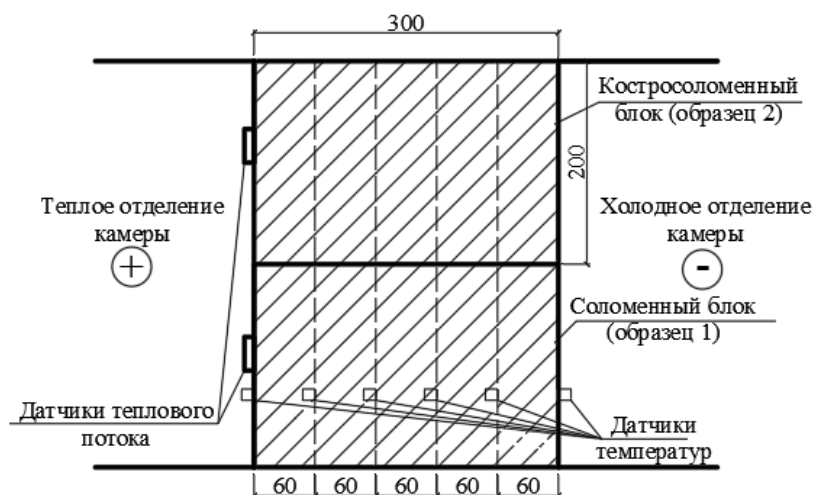


Рисунок 1. – Схема расположения датчиков внутри и на поверхности блоков

Таблица 2. – Теплотехнические характеристики стеновых материалов по результатам эксперимента

| Температура воздуха в холодном отделении камеры, °C | Плотность теплового потока Q, Вт/м ² | | | | Термическое сопротивление теплопередаче R, (м ² ·°C)/Вт | | | | Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·°C) | | | |
|---|---|-----------|-----------|-----------|--|-----------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| | образец 1 | образец 2 | образец 3 | образец 4 | образец 1 | образец 2 | образец 3 | образец 4 | образец 1 | образец 2 | образец 3 | образец 4 |
| +5 | 4,65 | 4,63 | 5,0 | 4,8 | 2,54 | 2,85 | 2,16 | 2,59 | 0,118 | 0,105 | 0,139 | 0,116 |
| 0 | 6,23 | 6,2 | 6,7 | 6,4 | 2,68 | 3,0 | 2,22 | 2,68 | 0,112 | 0,1 | 0,135 | 0,112 |
| -5 | 7,3 | 7,03 | 7,5 | 7,1 | 2,75 | 3,13 | 2,27 | 2,75 | 0,109 | 0,096 | 0,132 | 0,109 |
| -10 | 8,76 | 7,96 | 9,44 | 8,04 | 2,83 | 3,33 | 2,31 | 2,86 | 0,106 | 0,09 | 0,13 | 0,105 |
| -15 | 9,76 | 8,78 | 10,68 | 9,01 | 2,91 | 3,53 | 2,34 | 2,94 | 0,103 | 0,085 | 0,128 | 0,102 |
| -20 | 11,5 | 9,47 | 12,4 | 10,4 | 3,06 | 3,8 | 2,4 | 3,0 | 0,098 | 0,079 | 0,125 | 0,1 |

При температуре t_x= -20°C в холодном отделении камеры, плотность теплового потока соломенного блока (образец 1) превышает показатель образца 2 на 21%, а образца 3 на 19% в сравнении с характеристикой образца 4. Сравнительный анализ соломенных блоков показал, что плотность теплового потока образца 3 выше на 0,9 Вт/м², чем у образца 1. Значение костросоломенного блока (образец 4) превышает на 10% плотность теплового потока образца 2.

После достижения максимальной отрицательной температуры воздуха -20°C плотность теплового потока для образцов 1 и 3 возросла в 2,5 раза, а для костросоломенных блоков 2 и 4 значение возросло в 2,1 раза в сравнении с показателями при температуре $+5^{\circ}\text{C}$ в холодном отделении камеры.

При температуре $t_x=-20^{\circ}\text{C}$ (режим 1) сопротивление теплопередаче состава 2 превышает нормативный показатель $3,2 \text{ (м}^2\cdot^{\circ}\text{C)/Вт}$ на 19%, а на основе соломы (образец 1) не достигает требуемой величины сопротивления теплопередаче. На 25% и 6% более низкие значения сопротивления теплопередаче относительно нормативного показателя зафиксированы у образцов 3 и 4.

Величина термического сопротивления при режиме 1 образца 2 на основе смеси соломы с кострой выше, чем у образца 1 из соломы на 24%, а для режима 2 образец 4 превышает на 25% показатель образца 3 при температуре $t_x=-20^{\circ}\text{C}$. Также анализ одинаковых по составу стеновых блоков показал, что термическое сопротивление образца 1 ниже на 19% в сравнении с показателем образца 2, а значение образца 3 меньше характеристики образца 4 на 20%.

При температуре $+5^{\circ}\text{C}$ в климатической камере значения коэффициентов теплопроводности образцов 2 и 4 ниже на 11% и 17% в сравнении с показателями образцов 1 и 3 соответственно. Коэффициент теплопроводности образца 3 превышает показатель образца 1 на 18%, а образца 4 на 11% в сравнении с показателем образца 2.

При снижении температуры до -20°C коэффициент теплопроводности образца 1 равен $0,098 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, что на 24% больше значения образца 2. Коэффициент теплопроводности соломенного образца 3 при режиме 2 равен $0,125 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$, что превышает показатель костросоломенного образца 4 на 25%.

Коэффициент теплопроводности образца 1 при температуре -20°C в холодном отделении камеры уменьшился на 17% и образца 2 на 25%, а для образцов 3 и 4 снижение составило 10% и 14% соответственно относительно показателей при $+5^{\circ}\text{C}$.

С понижением температуры в холодном отделении камеры у экспериментальных стеновых блоков наблюдается характерное для эффективных теплоизоляционных материалов постепенное включение в работу проявляющееся в понижении значений коэффициента теплопроводности и повышения сопротивления теплопередаче. Таким образом установленные изменения теплофизических показателей подтверждают, что костросоломенные и соломенные стеновые блоки способны обеспечивать эффективную работу по тепловой изоляции наружных стен.

Основываясь на зафиксированных показателях температур по толще и на поверхности блоков построены графики распределения температур (рис. 2 – 7). При температуре $+5^{\circ}\text{C}$ амплитуды температур находились в пределах $9 - 14^{\circ}\text{C}$ (рис. 2). После снижения температуры в холодном отделении камеры до -5°C (рис. 4) амплитуда температур образца 2 составляет 22°C и превышает показатель образца 1 на 2°C , а значение образца 4 равно 18°C и на 2°C выше величины образца 3.

При достижении минимальной температуры $t_x=-20^{\circ}\text{C}$ (рис. 7) амплитуда образца 1 достигла 32°C , а для образца 2 составила 35°C и возросла в 2,3 и 2,5 раза соответственно. Показатели образцов 3 (27°C) и 4 (31°C) увеличились в 3 и 3,1 раза соответственно относительно амплитуд температур при $+5^{\circ}\text{C}$. Амплитуды температур образцов 1 и 2 возросли на 19% и 13% в сравнении со значениями образцов 3 и 4.

Амплитуды температур образцов 1 и 3 при температуре -20°C увеличились на 60% и 69% в сравнении с значениями при -5°C . Увеличение амплитуды образцов 2 и 4 составило 59% и 72% соответственно.

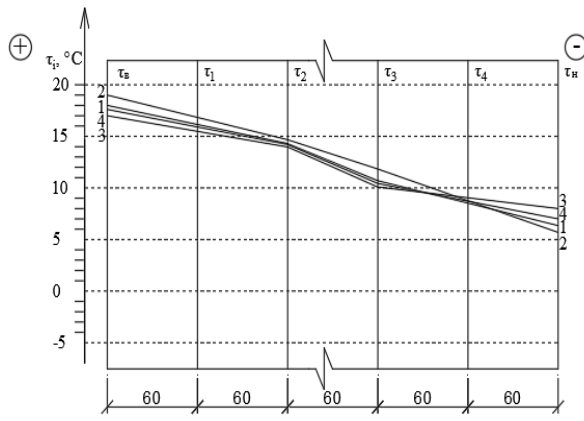


Рисунок 2. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре +5 °С

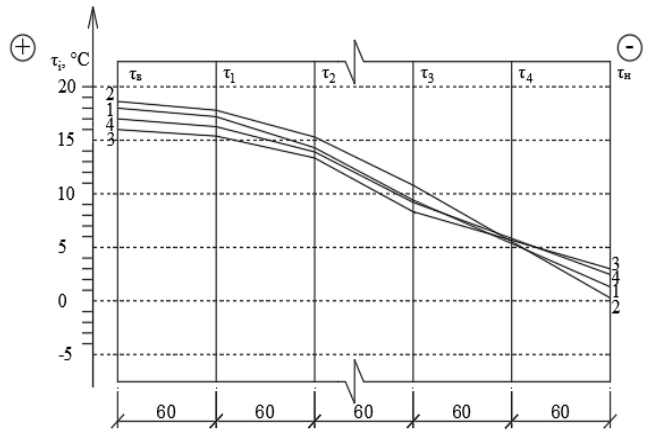


Рисунок 3. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре 0 °С

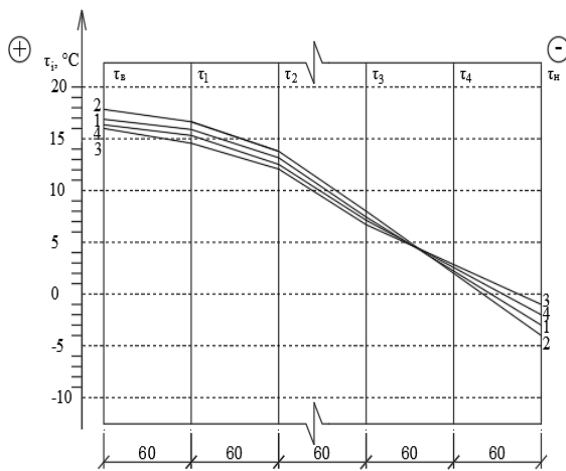


Рисунок 4. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре -5 °С

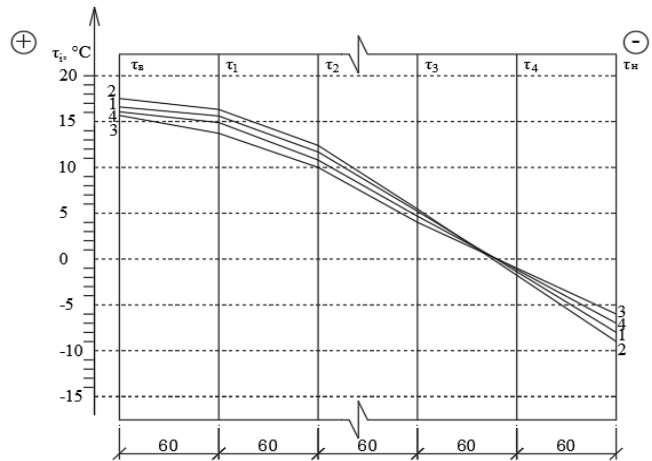


Рисунок 5. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре -10 °С

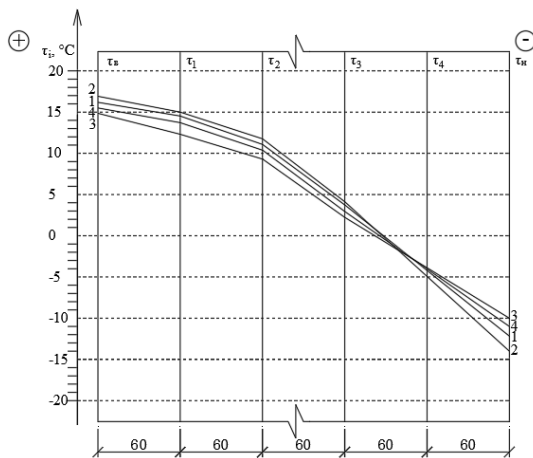


Рисунок 6. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре -15 °С

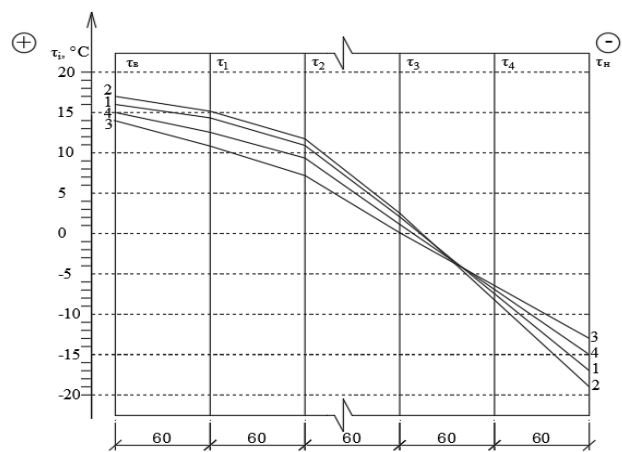


Рисунок 7. – Распределение температур по толщине стеновых материалов при температуре -20 °С

По окончании исследования в климатической камере определены значения влажности блоков. Сотрудники University of Bath [7] изучали влажность внутри соломенного тюка путем имплантации датчиков внутрь конструкции. При данном методе показатель влажности имеет невысокую точность, так как датчики фиксируют влажность не только материала соломенных тюков, но и воздуха, содержащегося внутри структуры материала, а также внутри просверленных отверстий, куда производилась имплантация датчиков.

Поэтому в исследованиях использован прямой метод определения влажности стенового материала. Из блоков выпиливали образцы размером 100×100×300 мм (рис. 8).

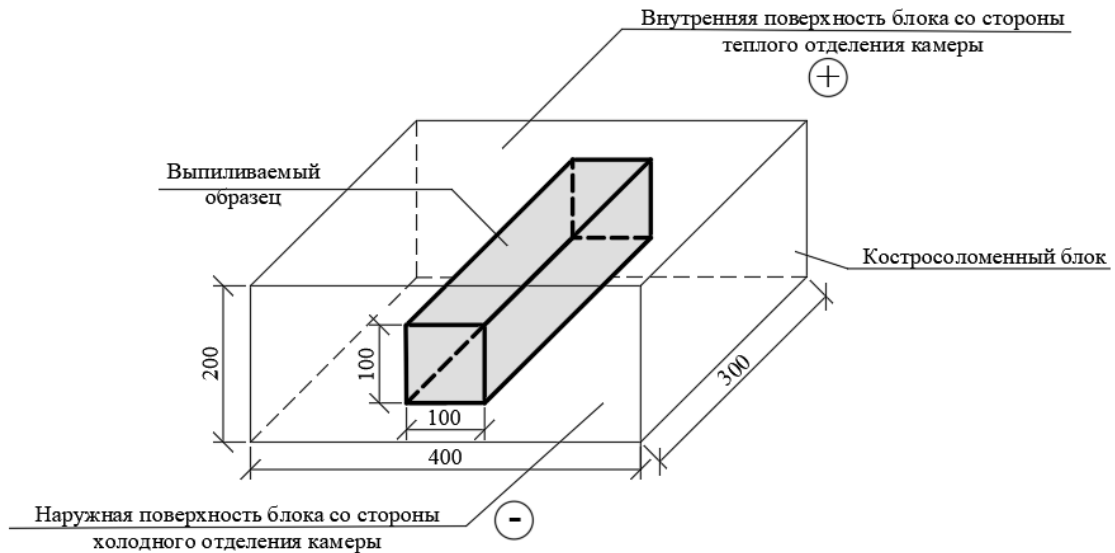


Рисунок 8. – Выпиливаемый образец из стенового блока

Длина выпиленного образца в 300 мм является шириной стенового блока. Полученный образец по длине распиливали поперек на 5 фрагментов. Толщина фрагмента составляла 60 мм. Каждый фрагмент взвешивали, а затем высушивали до постоянной массы и определяли влажность. По полученным данным строили распределения влажности по ширине блоков (рис. 9).

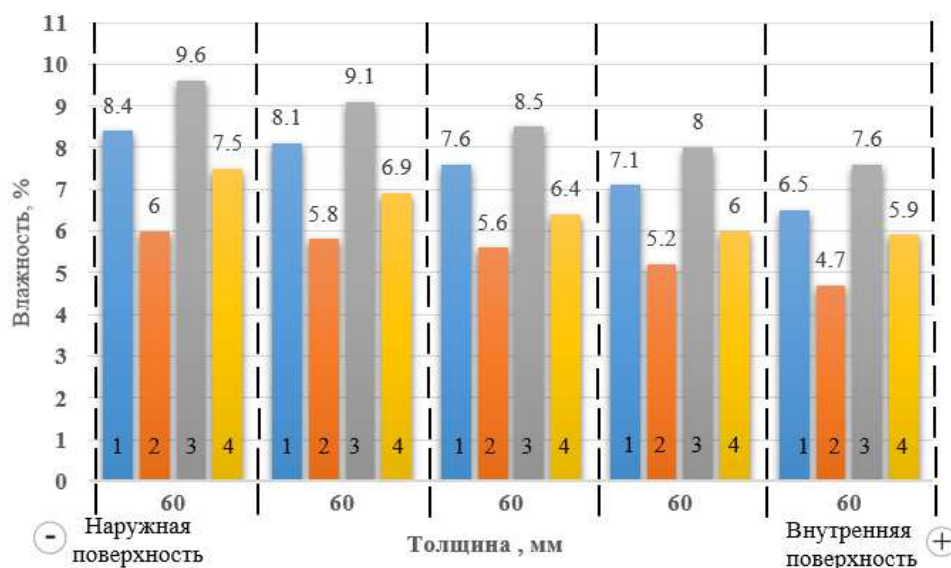


Рисунок 9. – Распределение влажности по толщине стенового материала после испытаний в климатической камере:

1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3; 4 – образец 4

Среднее значение влажности образца 1 равное 7,5% превышает на 36% показатель влажности образца 2 из смеси соломы и костры равное 5,5%. Для предварительно увлажненных блоков средняя влажность образца 4 составляет 6,5%, что на 24% меньше показателя образца 3.

При сравнении блоков на заполнителе из соломы установлено, что средняя влажность образца 3 достигает 8,6%, что больше на 15% значения состава 1, а показатель образца 4 на основе костросоломенной смеси увеличился на 18% относительно влажности образца 2.

Выводы. Изменение относительной влажности воздуха в результате сорбции влаги материалом оказывает значительное влияние на теплофизические показатели исследуемых стеновых блоков. Так при повышении относительной влажности воздуха до 97% и температуре -20°C коэффициент теплопроводности повышается на 28% для блоков из соломы и на 26% для образцов из смеси костры и соломы.

Анализ полученных данных показывает, что при температуре -20°C и влажности воздуха 55 - 65% образцы на заполнителе из смеси соломы и костры льна обладают более высокими теплотехническими характеристиками $\lambda = 0,079$ Вт/(м·°C), $Q = 9,47$ Вт/м², что на 19% и 18% ниже показателей стеновых блоков на основе соломы $\lambda = 0,098$ Вт/(м·°C), $Q = 11,5$ Вт/м².

При температуре 1 сопротивление теплопередаче блоков из смеси соломы и костры превышает нормативный показатель на 19%, а на основе соломы показывают результат ниже нормативного сопротивления теплопередаче. В условиях 97% влажности воздуха сопротивление теплопередаче блоков на заполнителе из соломы на 20% ниже показателя образца из смеси соломы и костры равного 3 (м²·°C)/Вт.

По результатам испытаний в климатической камере при режиме 1 $t_x = -20^\circ\text{C}$ амплитуда температур образца 2 достигла 35°C, что на 9% больше показателя образца 1. Для образца 4 при амплитуде 31°C превышение над образцом 3 составило 15%. Повышение относительной влажности в холодном отделении климатической камеры (режим 2) отрицательно влияет на амплитуду температур стеновых блоков и вызывает снижение показателей для образцов на заполнителе из соломы на 19%, а для составов из смеси костры и соломы на 13%.

Повышение влажности блоков из соломы на 32 – 36% (при режимах 1 и 2) 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.

Полученные результаты испытаний в климатической камере подтверждают, что стеновые блоки на основе соломы и костры льна выполняют не только функцию стенового ограждения, воспринимающего нагрузку, но и одновременно обеспечивают высокие теплоизолирующие свойства наружных стен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергоэффективное строительство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://straw.z42.ru/node/449>. – Дата доступа: 25.09.2017.
2. Производство и строительство каркасных домов из соломенных панелей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eco-bud.com/>. – Дата доступа: 25.07.2016.

3. Соломенные щиты «Ecosocoon» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecosocoon.it/russian/>. – Дата доступа: 26.09.2017.
4. Стеновые облегченные блоки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spinel73.ru/bloki.php>. – Дата доступа: 02.10.2017.
5. Гаврикова, Т.А. Совершенствование технологии малоэтажного монолитного домостроения из костробетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.08 / Т.А. Гаврикова. – Н. Новгород, 2006. – 12 с.
6. Лобанова, А.В. Стеновые изделия из арболита на основе костры льна / А.В. Лобанова, И.Э. Казимагомедов // Комунальне господарство міст. – 2015. – № 124. – С. 18–20.
7. Physical characterization of natural straw fibers as aggregates for construction materials applications / M. Bouasker [et al.] // Materials. – 2014. – № 7. – P. 3034–3048.
8. Thermo-mechanical behaviour of an innovative straw lime composite for thermal insulation applications / N. Belayachi [et al.] // Applied. Mechan. and Mat. – 2013. – № 390. – P. 542–546.
9. Mansour, A. Development of straw-cement composite sustainable building material for low-cost housing in Egypt / A. Mansour, J. Srebric, J. Burley // J Appl Sci Res. – 2007. – № 3. – P. 1571–1580.