

УДК 691.12

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-6-200-209

© А. В. Должонок, аспирант

© A. V. Dolzhonok, post-graduate student

© А. А. Бакатович, канд. техн. наук, доцент
(Полоцкий государственный университет)

© A. A. Bakatovich, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Polotsk State University)

E-mail: a.dalzhonak@pdu.by

E-mail: a.dalzhonak@pdu.by

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ И РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ СТЕНОВЫХ БЛОКОВ

DISTINCTIVE FEATURES OF MICROSTRUCTURE AND SURFACE RELIEF OF PLANT AGGREGATES, WHICH DETERMINE THE THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT AND COMPRESSIVE STRENGTH OF WALL BLOCKS

Приведены результаты исследований основных характеристик экспериментальных стеновых блоков на основе растительных отходов сельскохозяйственного происхождения. В качестве заполнителей использовали гречишную и ржаную солому, а также костру льна. Установлено, что структура внешней области обеспечивает прочностные характеристики, а внутренней — теплотехнические свойства. Введение костры льна и измельченной гречишной соломы позволяет сохранить структуру крупного заполнителя и тем самым повысить коэффициент теплопроводности стеновых блоков. Применение атомно-силового микроскопа подтвердило существенные различия в рельефе поверхности соломы и костры. Также внешняя поверхность костры льна и гречишной соломы характеризуется большей частотой перепадов рельефа по высоте относительно поверхности ржаной соломы. Выявленные факторы оказывают существенное влияние на адгезию цементного камня с заполнителем.

Ключевые слова: ржаная солома, гречишная солома, костра льна, прочность, теплопроводность, микроструктура.

The article presents the results of the investigating the main properties of experimental wall blocks manufactured on the base of agricultural wastes. As an aggregate, there was used buckwheat and rye straw, as well as flax boon. It was established that the structure of the external part provides strength characteristics, and internal one provides with thermal properties. The use of flax boon and shredded buckwheat straw as an aggregate allows saving the structure of coarse aggregate, thereby increasing the coefficient of thermal conductivity. The use of a scanning-force microscope proved great differences in the surface of straw and flax boon. The average altitude difference in relief of flax boon and buckwheat straw is significantly higher than that of rye straw. The revealed factors influence on adhesion of cement rock with the aggregate.

Keywords: rye straw, buckwheat straw, flax boon, strength, thermal conductivity, microstructure.

Производственная деятельность промышленных предприятий, в том числе по выпуску строительных материалов, приводит к преобладанию углекислого газа в структуре выбросов во многих регионах. Загрязнение атмосферы обуславливает парниковый эффект, изменение озонового слоя, образование кислотных дождей и смогов. Приоритетным направлением в экологи-

ческой политике стран, подписавших Киотское соглашение, является сокращение поступления в атмосферу углекислого газа, относящегося к парниковым газам [1].

Полный цикл производства строительных материалов на основе растительного сырья нейтрализует больше углекислого газа, чем выделяет в атмосферу, так как в процессе выращивания сель-

скохозяйственные культуры поглощают большие объемы углекислого газа [2]. Растительное сырье относится к постоянно возобновляемым ресурсам и дает возможность получить экологически безопасные строительные материалы. По этим причинам в ряде стран проводятся исследования теплоизоляционных и конструкционных материалов на основе растительного сырья.

Испытания композиционных материалов на основе отходов сельскохозяйственного производства проводились в Люблинском техническом университете [3]. В качестве заполнителя использовали костру льна. Связующим компонентом выступала смесь из извести, цемента и глины. Показатели прочности на сжатие находились в пределах 0,66–0,84 МПа при коэффициенте теплопроводности, равном 0,09–0,111 Вт/(м·°С).

В Пензенском университете для изготовления стеновых материалов использовали гречишную солому с размером частиц 30–40 мм [4]. Овсяная лузга вводилась как мелкий пористый заполнитель, а связующим компонентом в разработанных составах являлся цемент. При плотности образцов 544–617 кг/м³ и коэффициенте теплопроводности, равном 0,06–0,084 Вт/(м·°С), для обеспечения прочности на сжатие 0,39–1,32 МПа гречишную солому обрабатывали комплексным минерализатором.

Исследования по разработке легкого бетона с использованием в виде заполнителя гранулированного кукурузного початка, очищенного от зерен, проведены в Португалии [5]. Данное решение может стать альтернативой наиболее применяемым в настоящее время заполнителям, таким как керамзит, пробка, пенополистирол. При соотношении заполнителя к цементу 6:1 плотность достигает 430 кг/м³, а прочность составляет 0,3 МПа.

Рисовую солому использовали в качестве заполнителя при производстве дешевых строительных материалов на цементе для возведения жилья в Египте [6]. Теплотехнические испытания показали, что блоки возможно использовать в качестве стеновых и изоляционных материалов в условиях жаркого климата.

Французскими учеными проведены исследования биокomпозитных материалов на основе растительного заполнителя из соломы рапса и дробленого ствола подсолнуха [7]. Вяжущим

компонентом в разработанных материалах является глина. Коэффициенты теплопроводности составов биокomпозита находятся в пределах 0,1–0,14 Вт/(м·°С) при плотности 400–580 кг/м³.

В поисковой работе [8] изучена возможность использования рисовой лузги в стеновых материалах на основе дробленого бамбука с шероховатой поверхностью. Модифицированное жидкое стекло выполняло функцию вяжущего компонента. При плотности стенового материала 440–510 кг/м³ прочность на сжатие составила 2–2,4 МПа, а коэффициент теплопроводности равен 0,08–0,09 Вт/(м·°С).

Проблемы рациональной утилизации местных отходов растительного происхождения и возведения общественных, жилых зданий из стеновых материалов с высокими теплотехническими характеристиками являются актуальными и для Беларуси. В этой связи ставилась задача по разработке стеновых блоков с повышенными теплоизоляционными свойствами на растительных отходах сельскохозяйственного производства.

Методология. Основные физико-механические показатели стеновых материалов — плотность и прочность на сжатие — определяли в соответствии с ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» и ГОСТ 12730.1–78 «Бетоны. Методы определения плотности». Теплопроводность исследуемых материалов измеряли по СТБ 1618–2006 «Материалы и изделия строительные. Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме». Структуру образцов анализировали с помощью сканирующих электронных микроскопов JEOL JSM-5610 LV и JEOL JSM-7600F. Микроскопический анализ поверхности заполнителей выполняли с использованием атомно-силового микроскопа NT-206.

Основная часть. При изготовлении стеновых блоков крупным заполнителем являлась дробленая солома ржи и гречихи в виде трубок длиной 20–40 мм. Костру льна и измельченную гречишную солому размером 3–10 мм использовали как мелкий заполнитель. В качестве вяжущего применяли портландцемент марки ПЦ 500-Д0 цементного завода ОАО «Кричевцементношифер». Негативное воздействие сахаров, содержащихся в заполнителе, нейтрализовали

добавлением в композицию строительной кальциевой гидратной извести II сорта производства ОАО «Красносельскстройматериалы». Расход компонентов в экспериментальных составах на 1 м^3 равен: цемент — 289 кг, известь — 71 кг, заполнитель — 170 кг. Плотность всех образцов составляла 530 кг/м^3 . После предварительных исследований установлено, что наилучшие показатели по прочности и коэффициенту теплопроводности достигаются при количестве ржаной соломы 0,55 массовой доли и дробленой гречихи 0,6 массовой доли в общем расходе заполнителя. В таблице представлены физико-механические характеристики полученных стеновых блоков.

По результатам исследований установлено, что при одинаковой плотности с заменой части соломы кострой происходит повышение прочности на 0,3 МПа и уменьшение коэффициента теплопроводности (состав 2) на 13 % в сравнении со стеновым блоком на основе соломы ржи (состав 1). Относительно показателя образцов на заполнителе из дробленой соломы коэффициент теплопроводности состава 3 возрос на 18 %. Для состава 4 прочность увеличилась на 0,2 МПа относительно образцов на основе костросоломенной смеси (состав 2), а коэффициент теплопроводности повысился на 19 %.

При сравнении с показателями существующих аналогов, такими как керамзитобетонные, газосиликатные и арболитовые блоки¹, полученные стеновые материалы обладают более низким коэффициентом теплопроводности. Так, для керамзитобетонного блока коэффициент теплопроводности в сухом состоянии равен $0,14 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, а показатель газосиликатного и арболитового блока составляет $0,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$, что в 1,2–1,9 раза выше показателей образцов стеновых блоков из отходов растениеводства (см. таблицу).

Электронная микроскопия. Для установления факторов, влияющих на прочностные и теплотехнические характеристики стеновых материалов, изучена структура и поверхность крупного заполнителя — ржаной, гречишной соломы, а также мелкого — измельченной гречишной соломы и костры льна с применением электронной микроскопии. В процессе исследования получены изображения структуры в поперечных,

продольных срезах и при смятии стеблей, а также внешних и внутренних поверхностей.

На рис. 1 представлено полученное изображение поперечного сечения ржаного соломенного стебля. Структура стебля состоит из наружного эпидермиса, склеренхимы, сосудистых пучков (спирали ксилемы и флоэмы), паренхимы и центральной пустоты [9–11]. Клетки эпидермиса представляют собой полые ячейки, образующие внешнюю поверхность соломы. Функция данных ячеек состоит в контроле водного баланса и газообмена. Эпидермис покрыт восковым слоем, предотвращающим испарение воды [12]. Клетки склеренхимы находятся под клетками эпидермиса и в значительной степени отвечают за механическую прочность соломенного стебля. Сосудистые пучки представляют собой группу кольцеобразно структурированных клеток, состоящих из спиралей ксилемы и флоэмы, распределенных по поперечному сечению с неравномерными интервалами. Ксилема и флоэма укрепляют структуру и выполняют функцию транспортировки воды и питательных веществ к растущим тканям стебля.

На поперечном срезе стебля ржаной соломы прослеживаются две четко различимые структурные области строения клеток [13]. Во внешней области (склеренхима) находятся клетки, представляющие собой полые трубчатые структуры с поперечным размером 5–20 мкм и стенками толщиной 1–5 мкм. Установлено, что внешняя область занимает 20–30 % от общего объема

Физико-механические характеристики стеновых блоков

Состав	Вид заполнителя	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C)	Прочность на сжатие, МПа
1	Солома ржи	0,085	1,9
2	Солома ржи с кострой льна	0,075	2,2
3	Гречишная солома	0,1	2,1
4	Гречишная соломенная смесь (дробленая и измельченная солома)	0,089	2,4

¹ ТКП 45-2.04-43-2006 (02250). Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования. Минск: Минстройархитектуры РБ, 2015. 50 с.

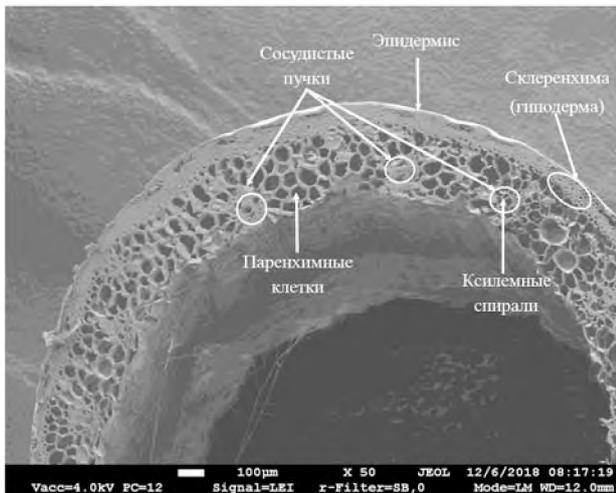


Рис. 1. Торцевой срез нижней части стебля ржаной соломы (50-кратное увеличение)

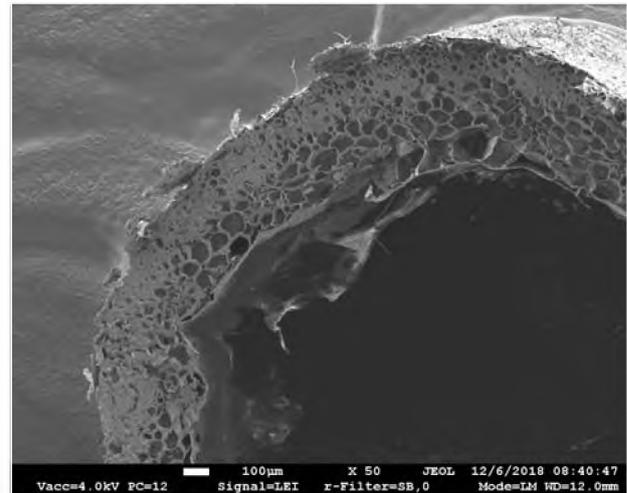


Рис. 2. Торцевой срез нижней части стебля гречишной соломы (50-кратное увеличение)

структуры. Внутренняя область (паренхима) представлена тонкостенными клетками полигональной формы с поперечным размером 35–90 мкм. Тонкие стенки между клетками имеют размер 1–2 мкм и составляют 70–80 % от общего объема структуры поперечного среза стебля ржаной соломы.

Исследование продольного среза ржаной соломы показало, что во внутренней области клетки разделены по длине перегородками, образующими ячейки размером 100–150 мкм. Расстояние между перегородками во внешней области составляет 200–400 мкм.

В поперечном сечении стебель гречишной соломы (рис. 2) имеет схожую структуру с ржаной соломой. При этом поперечные размеры клеток как во внешней, так и во внутренней области практически совпадают с размерами клеток ржаной соломы. Однако в структуре стебля гречишной соломы внешняя и внутренние области занимают примерно одинаковые объемы (по 50 %). Увеличение объема внутренней области на 20–30 % при одновременном уменьшении на эту же величину внутренней области в структуре стебля гречихи в сравнении со строением ржаной соломы приводит к возрастанию клеток с толщиной стенок 1–5 мкм, что объясняет повышение теплопроводности гречишной соломы и соответственно получаемых стеновых блоков по сравнению с образцами, содержащими ржаную солому.

В поперечном сечении стебель льна по структуре также возможно разделить на внешнюю и внутреннюю области (рис. 3). При 200-кратном увеличении отмечается радиальное расположение клеток по структуре стебля льна. Поперечный размер клеток во внутренней области составляет 30–50 мкм, тогда как размер клеток во внешней области изменяется в пределах 5–15 мкм. Толщина стенок между клетками во внешней области равна 2–3 мкм, а во внутренней — не более 1 мкм. Клетки имеют пятиугольную форму в поперечном сечении и образуют сотовую структуру. По длине клетки через 60–110 мкм разделены перегородками во внутренней области и 120–300 мкм — во внешней области.

В процессе изучения поперечных сечений отмечается, что поперечный размер клеток ржаной и гречишной соломы во внутренней области больше в 4,5–7 раз в сравнении с показателями во внешней области. Для костры льна размеры увеличиваются в 3,3–6 раз. Стенки клеток во внешней области как у соломы, так и костры превышают в 2–3 раза толщину стенок во внутренней области.

Полученные результаты по определению размеров клеток, толщин стенок указывают, что внешняя область с более массивными стенками и перегородками в большей степени обеспечивает прочность стебля соломы и костры, а внутренняя область обуславливает теплоизоляционные свойства заполнителей.

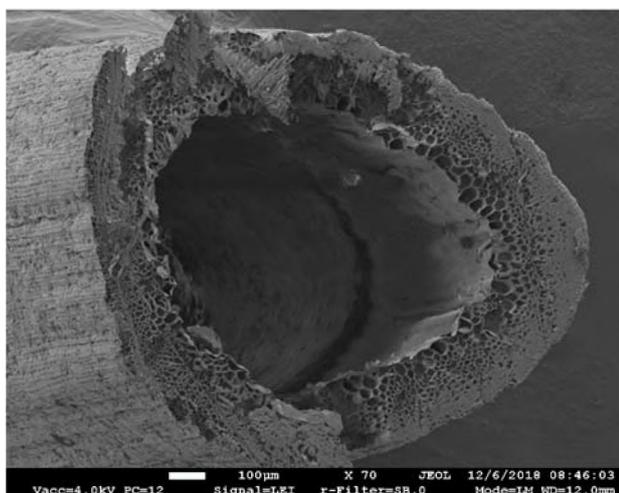


Рис. 3. Торцевой срез костры льна (70-кратное увеличение)

Следует отметить, что технологический процесс образования костры льна не позволяет получать мелкий наполнитель для стеновых блоков с сохранением целостной структуры по всему объему. В процессе отделения волокна происходит разрушение стебля на отдельные частицы — костру льна (рис. 4). На микроснимке наблюдаются деформации и нарушения герметичности ячеек клеток по границам разрыва стебля на отдельные частицы костры. В ходе перемешивания смеси и формовки блоков происходит дополнительное повреждение структуры мелкого наполнителя, вследствие чего до 30 % объема внутренней области частиц костры имеет повреждения в виде смятия.

Электронная микроскопия структуры подтвердила, что при измельчении и формовке блоков гречишная солома получает аналогичные повреждения строения, как и костра льна, в виде деформаций и нарушения целостности клеток, что ухудшает теплотехнические показатели мелкого наполнителя по сравнению с дробленой соломой ржи и гречихи в виде цельных трубок.

Дальнейшие исследования показали, что при формовке стеновых блоков на основе дробленой соломы ржи или гречихи (составы 1, 3) происходят деформации соломенных трубок по всему объему наполнителя, приводящие к нарушению целостности внешних и внутренних областей, а также к локальным разрушениям микроструктуры трубок соломы. Так, после прессования

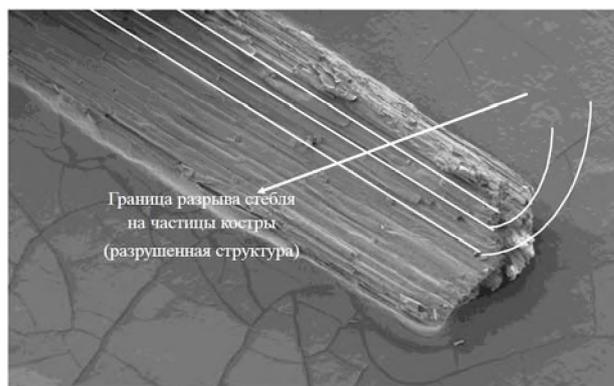


Рис. 4. Фрагмент частицы костры льна (50-кратное увеличение)

в результате смятия трубок соломы, находящихся в оболочке из вяжущего, происходит появление продольных разрывов в структуре внешней области (рис. 5, а) и смятие с разрушением паренхимных клеток внутренней области (рис. 5, б). Возникающие при формовании блоков повреждения трубок соломы оказывают существенное влияние на снижение теплотехнических характеристик стеновых материалов.

Таким образом, полученные данные микроскопии свидетельствуют о том, что происходит нарушение целостности защитного слоя (эпидермиса), появление продольных разрывов во внешней области соломенных трубок, а также смятие паренхимных клеток внутренней области. Разорванные капилляры микроструктуры внешней области остаются незащищенными от проникновения влаги, что способствует увеличению сорбции водяных паров дробленой соломой ржи и гречихи и в дальнейшем при эксплуатации зданий ведет к дополнительному повышению теплопроводности стеновых блоков на основе дробленой соломы, что подтверждается полученными нами результатами в работе [14].

Введение костры льна и измельченной соломы гречихи в качестве мелких наполнителей взамен части соломы влечет за собой уменьшение объема костросоломенной и гречишной смеси в сравнении с объемом соломенного наполнителя в сыпном состоянии. В результате уменьшения объема смеси при формовании блоков происходит смятие только трубок соломы ржи и гречихи диаметром 3–5 мм, а трубки диаметром менее 3 мм не подвергаются деформациям и не имеют по-

вреждений своей микроструктуры. Присутствие в каркасе заполнителя неповрежденных трубок соломы в количестве 40–50 % от массы крупного заполнителя способствует улучшению теплотехнических характеристик стеновых композиционных материалов на основе костросоломенной и гречишной смеси в сравнении с блоками, содержащими только солому ржи или гречихи.

С целью изучения возможного влияния фактуры поверхности стеблей соломы и льна на прочностные характеристики стеновых блоков исследовали строение рельефа на электронном микроскопе. Снимок структуры наружной поверхности стебля соломы представлен на рис. 6. Внешний вид поверхности свидетельствует о том, что стебель соломы имеет рельефную, волнистую поверхность с шагом волны 400 мкм с от-

сутствием ярко выраженного перепада рельефа по высоте, что затрудняет обеспечение высокой степени адгезии с вяжущим. Также присутствие восковой пленки на поверхности стебля отрицательно влияет на прочность сцепления цементного камня с ржаной соломой, что подтверждается исследованиями сотрудников Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры [15].

По результатам электронной микроскопии наружной поверхности костры льна установлено наличие рельефной, бороздчатой, шероховатой фактуры (рис. 7), получаемой в результате отделения льняного волокна от стебля. Наблюдается высокая частота перепада рельефа на внешней поверхности костры льна. Такая фактура наружной поверхности костры льна повышает адгезию

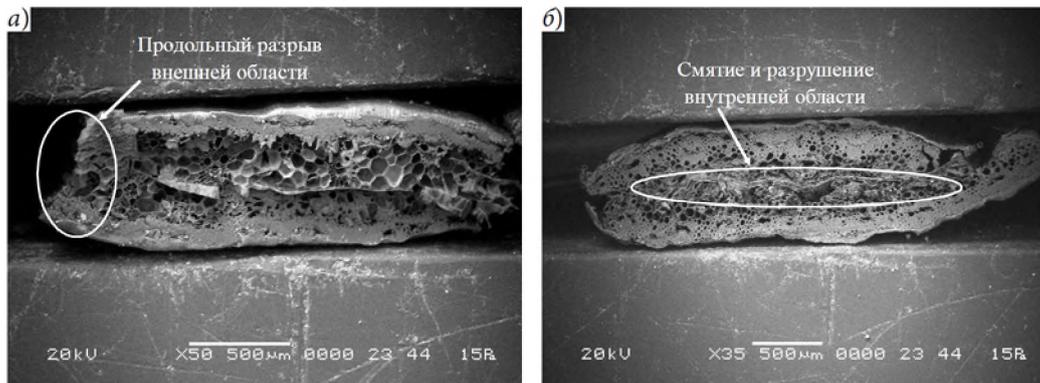


Рис. 5. Структура стебля после смятия: а — ржаная солома (торцевое сечение, 50-кратное увеличение); б — гречишная солома (торцевое сечение, 35-кратное увеличение)

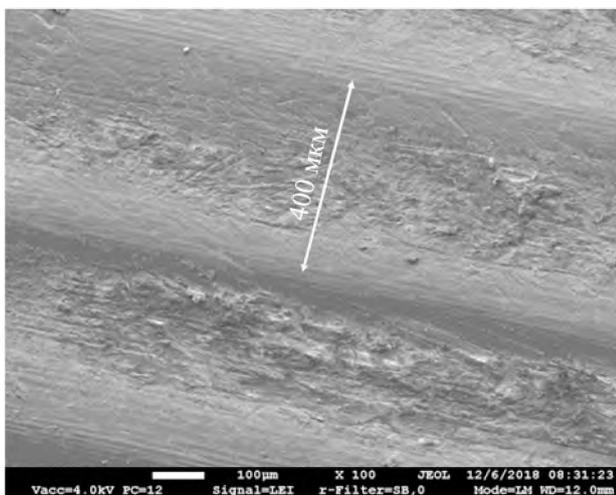


Рис. 6. Внешняя поверхность ржаной соломы (100-кратное увеличение)

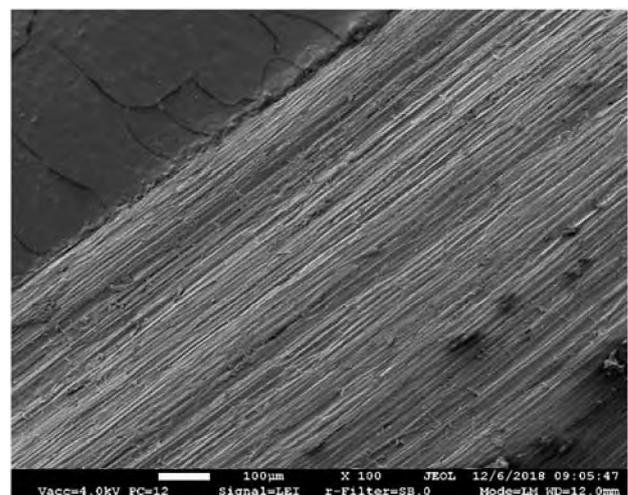


Рис. 7. Внешняя поверхность костры льна (100-кратное увеличение)

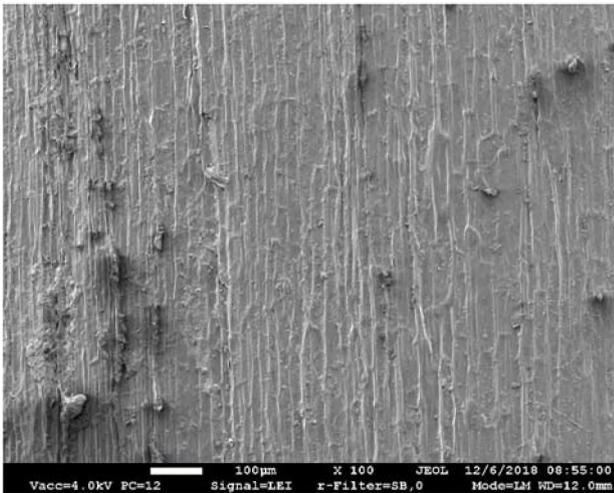


Рис. 8. Внешняя поверхность гречишной соломы (100-кратное увеличение)

цементного камня к мелкому заполнителю по сравнению с заполнителем из ржаной соломы.

Наружная поверхность стебля гречишной соломы приведена на рис. 8. На поверхности гречишной соломы также присутствует рельефная, бороздчатая структура, однако частота перепадов по высоте меньше в сравнении с поверхностью костры льна.

Атомно-силовая микроскопия. Для подтверждения визуальных результатов исследований поверхностей стеблей соломы и костры льна, выполненных с помощью электронного микроскопа, проводили детальное изучение рельефа с использованием атомно-силового микроскопа. Полученный профиль поверхности

указывает на наличие низкорельефной фактуры на наружной поверхности стебля ржаной соломы (рис. 9). Из результатов исследования поверхности по горизонтальному вектору 1–2 следует, что максимальная амплитуда рельефа не превышает 35,6 нм, что подтверждает присутствие на поверхности стебля ржаной соломы рельефа с малым перепадом высот и низкой шероховатостью. Средняя амплитуда рельефа составляет 22,8 нм.

На профиле поверхности костры льна по горизонтальному вектору 1–2 (рис. 10) отчетливо выражена рельефная бороздчатая структура со значительно возросшей амплитудой пиков и впадин. Максимальная амплитуда рельефа достигает 155,3 нм, а средняя — 100,2 нм, что обеспечивает повышение адгезии костры льна с цементным камнем относительно трубок ржаной соломы и положительно влияет на прочностные характеристики стенового материала.

На рис. 11 построен профиль поверхности гречишной соломы по горизонтальному вектору 1–2. Поверхность имеет шероховатую фактуру с продольной ориентацией возвышенностей и впадин, т. е. является ребристой. При средней амплитуде, равной 102,9 нм, максимальная амплитуда рельефа достигает 182,4 нм, что способствует улучшению сцепления гречишной соломы с вяжущим. Однако следует отметить, что частота перепадов по высоте в 1,5–2 раза ниже, чем на поверхности костры льна.

Заключение

1. В микроструктуре исследуемых растительных заполнителей выявлено наличие двух четко

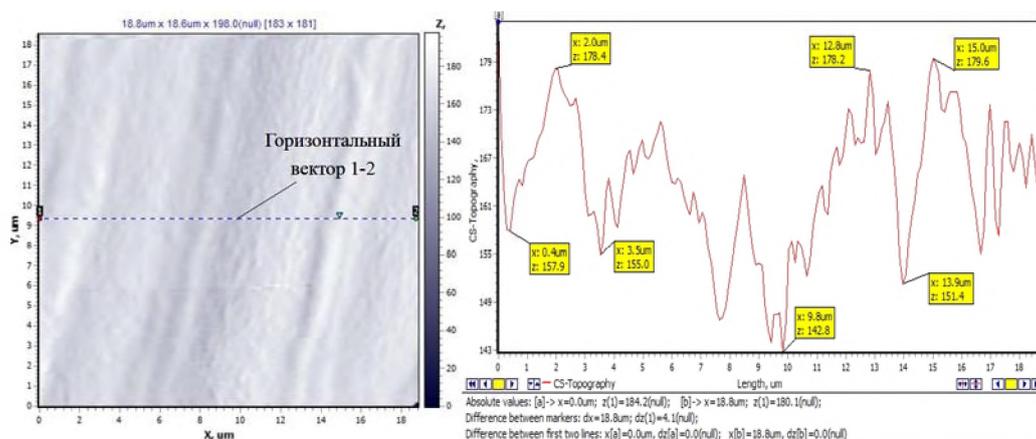


Рис. 9. Профиль поверхности ржаной соломы по горизонтальному вектору 1–2 скана внешней поверхности стебля

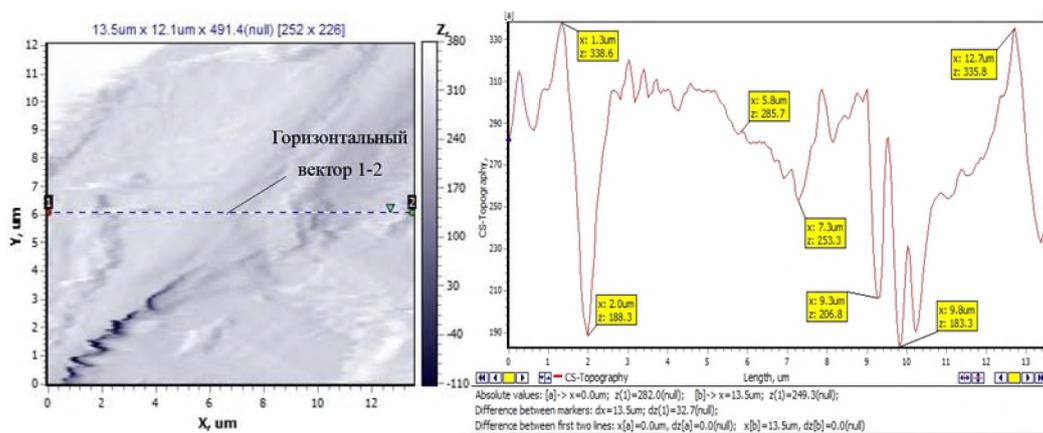


Рис. 10. Профиль поверхности костры льна по горизонтальному вектору 1–2 скана внешней поверхности стебля

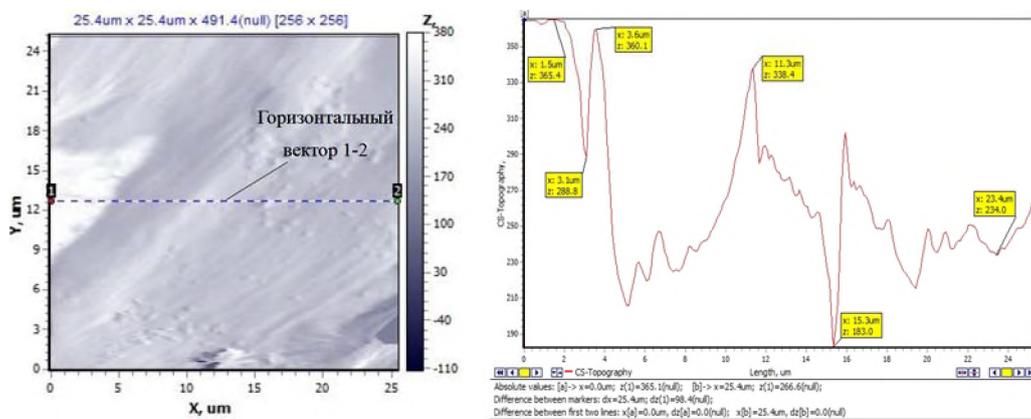


Рис. 11. Профиль поверхности гречишной соломы по горизонтальному вектору 1–2 скана внешней поверхности стебля

различаемых структурных областей — внутренней и внешней. Размер клеток внутренней области в поперечном сечении равен 30–90 мкм и превышает показатель внешней области в 3,3–7 раз. Также установлено, что через 60–150 мкм клетки разделены поперечными перегородками на ячейки, в 2–2,7 раза более короткие по длине в сравнении с размерами ячеек внешней области. Толщина стенок между клетками равна 1–2 мкм и в 2–3 раза тоньше стенок в структуре внешней области. Таким образом, строение клеток внешней области соломы и костры льна обеспечивает прочность на сжатие и изгиб стеблей соломы и льна. Ячеистая структура с тончайшими прозрачными стенками внутренней области придает соломе и костре льна высокие изоляционные свойства.

2. В процессе производства блоков только на основе дробленой соломы происходит смятие

трубок заполнителя по всему объему композита. При перемешивании и формовке стеновых блоков образуются продольные разрывы во внешней области и смятие ячеистой структуры внутренней области, что негативно влияет на теплоизолирующие свойства заполнителя из соломы. Замена части дробленой соломы измельченной фракцией или кострой льна обеспечивает целостность 40–50 % трубок соломы в стеновых блоках, что понижает теплопроводность композитов на 12–13 % относительно образцов на соломе ржи и гречихи.

3. Проведенные исследования рельефа поверхности стеблей ржаной, гречишной соломы и костры льна с помощью атомно-силовой микроскопии выявили существенные отличия в фактуре поверхности. Средняя амплитуда перепадов рельефа внешней поверхности для костры льна

и гречишной соломы в 4,4–4,5 раза превышает показатель ржаной соломы, а максимальные амплитуды — в 4,4–5,1 раза. Также отмечаются значительно более частые перепады рельефа по высоте на поверхности гречишной соломы и костры льна в сравнении с фактурой ржаной соломы. Выявленные отличия в рельефе оказывают положительное влияние на повышение адгезии цементного камня с заполнителем и возрастание прочности на сжатие стеновых композитов, содержащих солому гречихи и костру льна, относительно блоков на основе заполнителя только из дробленой ржаной соломы. В результате введения костры льна прочность блоков возрастает на 16 %, а использование гречишной дробленой и измельченной соломы повышает показатель прочности образцов на 11 % и 26 % относительно композита на ржаной соломе.

Библиографический список

1. Галай Е. И. Промышленное загрязнение атмосферного воздуха Минской области выбросами углекислого газа // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: материалы междунар. науч. конф., Минск, 5–8 мая 2015 г. / Белорус. гос. ун-т; ред. кол. П. С. Лопух [и др.]. Минск, 2015. 337 с.
2. White C., Wall K., Gross K., Walker P., Mander T. Development and testing of a prototype straw bale house // Proceedings of the ICE – Construction Materials. 2012. Vol. 165, Issue 6. Pp. 377–384.
3. Barnat-Hunek D., Smarzewski P., Brzyski P. Properties of Hemp-Flax Composites for Use in the Building Industry // J. Nat. Fibers. 2017. Vol. 14, Issue 3. Pp. 410–425. URL: <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1212764>
4. Солдатов С. Н. Создание и исследование свойств утеплителей на основе местного сырья: дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2001. 139 с.
5. Pinto J., Vieira B., Pereira H., Jacinto C., Vilela P., Paiva A., Pereira S., Cunha V. M. C. F., Varum H. Corn cob lightweight concrete for non-structural applications // Constr. Build. Mater. 2012. Vol. 34. Pp. 346–351. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.043>
6. Mansour A. M. H., Srebric J., Burley B. J. Development of straw-cement composite sustainable building material for low-cost housing in Egypt // Journal of Applied Sciences Research. 2007. Vol. 3, Issue 11. Pp. 1571–1580.
7. Brouard Y., Belayachi N., Hoxha D., Méo S., Abdallah W. Hygrothermal Behavior of Clay-Sunflower (*Helianthus annuus*) and Rape Straw (*Brassica napus*) Plaster Bio-Composites for Building Insulation // Advanced Engineering Forum. 2017. Vol. 21. Pp. 242–248. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.21.242>
8. Должонок А. В., Бакатович А. А. Стеновые материалы на основе дробленого бамбука // Сб. материалов 4-го Белорусско-китайского молодежного инновационного форума «Новые горизонты – 2017», Минск, 2–3 ноября 2017 г. Минск: Белорусский нац. техн. ун-т, 2017. С. 57–59.
9. Sathasivam K., Haris M. R. H. M., Noorsal K. The preparation and characterization of esterified banana trunk fibers/poly (vinyl alcohol) blend film // Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2010. Vol. 49, Issue 13. Pp. 1378–1384. URL: <https://doi.org/10.1080/03602559.2010.512324>
10. Bouasker M., Belayachi N., Hoxha D., Al-Mukhtar M. Physical Characterization of Natural Straw Fibers as Aggregates for Construction Materials Applications // Materials. 2014. Vol. 7, Issue 4. Pp. 3034–3048. URL: <https://doi.org/10.3390/ma7043034>
11. Panthapulakkal S., Zereshkian A., Sain M. Preparation and characterization of wheat straw fibers for reinforcing application in injection molded thermoplastic composites // Bioresource Technology. 2006. Vol. 97, Issue 2. Pp. 265–272. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.043>
12. Karjalainen M., Ämmälä A., Rousu P., Niinimäki J. Method for automatic analysis of wheat straw pulp cell types // Bio Resources. 2012. Vol. 7, no. 1. Pp. 827–840.
13. Bakatovich A., Davydenko N., Gaspar F. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste // Energy and Buildings. 2018. Vol. 180. Pp. 72–82. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.032>
14. Должонок А. В., Бакатович А. А. Влияние сорбционной влажности на долговечность стеновых блоков, содержащих заполнители из растительных отходов сельскохозяйственного производства // Сб. материалов II Национальной науч.-практ. конф. «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство», Омск, 18–19 апреля 2019 г. Омск: Сибирский гос. автомобильно-дорожный ун-т, 2019. С. 416–420.
15. Савицкий Н. В., Собинова К. С., Зинкевич О. Г., Ожищенко О. А., Аит И. Ф. Исследование теплофизических свойств вторичных продуктов сельскохозяйственного производства органического происхождения // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сер. Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития. 2015. № 81. С. 217–223.

References

1. Galay E. I. *Promyshlennoe zagryaznenie atmosfernogo vozdukha Minskoy oblasti vybrosami uglekislogo gaza* [Industrial pollution of atmospheric air of Minsk region with emissions of carbon dioxide]. *Trudy mezhd. nauchnoy konferentsii, Minsk, 5 – 8 maya 2015 g. «Problemy gidrometeorologicheskogo obespecheniya khozyaystvennoy deyatel'nosti v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata»* [Proceedings of the International scientific conference, Minsk, May 5–8, 2015 “Problems of hydro-meteorological support of economic activity in the conditions of changing climate”]. Minsk, Belarus. State University Publ., 2015, 337 p.
2. Wall K., et al. Development and testing of a prototype straw bale house, *Proceedings of the ICE – Construction Materials*. 2012, vol. 165, issue 6, pp. 377–384.
3. Barnat-Hunek D.; Smarzewski P.; Brzyski P. Properties of Hemp-Flax Composites for Use in the Building Industry. *J. Nat. Fibers*, 2017, vol.14, issue 3, pp. 410–425. Available at: <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1212764>
4. Soldatov S. N. *Sozdanie i issledovanie svoystv utepliteley na osnove mestnogo syr'ya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Creation and research of insulation properties on the basis of local raw materials. PhD in Sci. Tech. diss.]. Penza, 2001, 139 p.
5. Pinto J., et al. Corn cob lightweight concrete for nonstructural applications. *Constr. Build. Mater.*, 2012, vol. 34, pp. 346–351. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.043>
6. Mansour A., Srebric J., Burley B. Development of straw-cement composite sustainable building material for low-cost housing in Egypt. *Journal of Applied Sciences Research*, 2007, vol. 3, issue 11, pp. 1571–1580.
7. Brouard Y. et al. Hygrothermal Behavior of Clay - Sunflower (*Helianthus annuus*) and Rape Straw (*Brassica napus*) Plaster Bio-Composites for Building Insulation. *Advanced Engineering Forum*, 2017, vol. 21, pp. 242–248. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEE.21.242>
8. Dolzhonok A. V., Bakatovich A. A. *Stenovye materialy na osnove droblenogo bambuka* [Wall materials based on crushed bamboo]. *Trudy 4-go Belorussko-Kitayskogo molodezhnogo innovatsionnogo foruma, «Novye gorizonty – 2017»*, g. Minsk, 2–3 noyabrya 2017 g. [Proceedings of the 4-th Belorussian-Chinese youth innovation forum “New horizons–2017”, Minsk, November 2–3, 2017]. Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskii universitet Publ., 2017, pp. 57–59.
9. Sathasivam K., Haris M. R. H. M., Noorsal K. The preparation and characterization of esterified banana trunk fibers/poly (vinyl alcohol) blend film. *Polymer – Plastics Technology and Engineering*, 2010, vol. 49, iss. 13, pp. 1378–1384. Available at: <https://doi.org/10.1080/03602559.2010.512324>
10. Bouasker M., Belayachi N., Hoxha D., Al-Mukhtar M. Physical Characterization of Natural Straw Fibers as Aggregates for Construction Materials Applications. *Materials*, 2014, vol. 7, pp. 3034–3048. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma7043034>
11. Panthapulakkal S., Zereskian A., Sain M. Preparation and characterization of wheat straw fibers for reinforcing application in injection molded thermoplastic composites. *Bioresource Technology*, 2006, vol. 97, iss. 2, pp. 265–272. Available at <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.043>
12. Karjalainen M., Ämmälä A., Rousu P., Niinimäki J. Method for automatic analysis of wheat straw pulp cell types. *BioResources*, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 827–840.
13. Bakatovich A., Davydenko N., Gaspar F. Thermal insulating plates produced on the basis of vegetable agricultural waste. *Energy and Buildings*, 2018, vol. 180, pp. 72–82. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.032>
14. Dolzhonok A. V. *Vliyanie sorbtionnoy vlazhnosti na dolgovechnost' stenovykh blokov, soderzhashchikh zapolniteli iz rastitel'nykh otkhodov sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva* [Influence of sorption humidity on durability of wall blocks containing fillers from plant waste of agricultural production]. *Trudy II Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo»*, g. Omsk, 18–19 aprelya 2019 g. [Proceedings of the II National scientific and practical conference “Education. Transport. Innovations. Construction”, Omsk, April 18–19, 2019]. Sibirskiy gosudarstvennyy avtomobil'no-dorozhnyy universitet Publ., 2019, pp. 416–420.
15. Savitskiy N. V., Sobinova K. S., Zinkevich O. G., Ozhishchenko O. A., AitIshu F. *Issledovanie teplofizicheskikh svoystv vtorichnykh produktov sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva organicheskogo proiskhozhdeniya* [Investigation of thermo-physical properties of secondary products of agricultural production of organic origin]. *Sbornik nauchnykh trudov stroitel'stva, materialovedeniya, mashinostroeniya – Collection of scientific works of construction, materials science, mechanical engineering*, 2015, no. 81, pp. 217–223.