

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 666.973.2

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ТРОСТНИКА И СОЛОМЫ
НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩЕЙ КОМПОЗИЦИИ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Н.В. БАКАТОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)
PhD, professor F. GASPAR
(Leria Polytechnical Institute, Portugal)

Выполнена электронная микроскопия структуры тростника гигантского и ржаной соломы. Выявлены и изучены параметры микроструктуры, влияющие на коэффициент теплопроводности измельченного тростника и соломы. Исследован фракционный состав, включая определение процентного содержания измельченного тростника гигантского по фракциям. Установлены оптимальные размеры частиц тростника с учетом минимального коэффициента теплопроводности сырьевой композиции. Для повышения эффективности изолирующей способности измельченного тростника гигантского в структурообразующую смесь вводили ржаную солому. Введение в композицию измельченной соломы дает возможность понизить коэффициент теплопроводности структурообразующей смеси на 21% до показателя, соответствующего 0,045 Вт/(м·°С).

Ключевые слова: тростник гигантский, солома, микроструктура, фракция, коэффициент теплопроводности, тепловая изоляция.

Введение. В последние десятилетия все большую роль в строительстве играет экологический аспект. Основные вопросы при строительстве связаны с обеспечением экологической чистоты изоляционных материалов. Применяемая в настоящее время тепловая изоляция на основе пенополиуретана, пенополистирола и минеральной ваты представляет серьезную опасность для здоровья человека и ухудшает экологическую обстановку в целом. Альтернативой выступают теплоизоляционные материалы на основе отходов растениеводства и на природном растительном сырье.

Результаты практических экспериментальных исследований указывают на высокую эффективность применения отходов растениеводства как сырья для получения теплоизоляционных материалов с высокими теплоизоляционными характеристиками. За рубежом научным исследованиям данного направления уделяется повышенное внимание. Значительных результатов удалось достичь группам зарубежных ученых под руководством R. Pennacchio, С. Buratti, М. Palumbo, X. Yin, С. Ingraо, F. Collet, занимающихся исследованиями волокон технической конопля, рисовой лузги, пшеничной и рисовой соломы в качестве заполнителей для изоляционных материалов [1–6].

Солома злаковых культур является наиболее распространенным структурообразующим сырьем, применяемым для получения теплоизоляционных материалов в виде соломенных блоков, панелей Ecososop, плит Stramit [7–9]. Наибольшего эффекта по теплоизоляционным свойствам удается достичь при использовании структурообразующих композиций из смеси дробленой соломы и других сырьевых материалов разной фракции и микроструктуры. В качестве примера можно отметить теплоизоляционные плиты на основе смесей мха сфагнума и соломы, дробленой соломы и отходов искусственного меха, дробленой соломы и тростника, дробленой и измельченной гречишной соломы разной фракции [10–12].

Основываясь на международном опыте получения тепловой изоляции, в исследовательской работе изучено влияние микроструктуры тростника гигантского и ржаной соломы на теплопроводность с целью определения возможности использования данного растительного сырья и применения в качестве структурообразующих компонентов теплоизоляционного материала.

Материалы и методы. Частицы из измельченного стебля арундо тростникового (тростника гигантского) использовали в качестве основного структурообразующего компонента для тепловой изоляции. Арундо тростниковый произрастает в южных регионах Европы в т.ч. в Португалии. Полые стволы свежесрезанного тростника нарезали на цилиндры длиной 30–50 мм на ленточной пиле, а затем измельчали в шаровой мельнице, высушивали и фракционировали. Для изготовления образцов утеплителей использовали частицы тростника длиной 10–30 мм.

Дополнительным структурообразующим компонентом являлась солома ржи, получаемая в больших объемах в разных странах. Для переработки соломы использовали ножевой измельчитель типа Эликор-1 (Украина). На выходе из измельчителя получали солому в виде мелких пластинок длиной 5–10 мм и шириной 1–2 мм. Высота соломенной пластинки соответствовала толщине стенки стебля ржи равной менее 1 мм.

Микроскопический анализ частиц соломы ржи и тростника выполняли с использованием электронного микроскопа марки «JSM-5610 LV». При работе микроскопа в низковакуумном режиме исследуют непроводящие органические и неорганические объекты без подготовки пробы и нанесения проводящих покрытий, т.е. получают изображение с реальной поверхности. Наличие двух типов детекторов обеспечивает фиксацию изображения в режимах вторичных и обратно-отраженных электронов.

Коэффициент теплопроводности измеряли на образцах-плитах размером 250×250×30 мм в соответствии с требованиями СТБ 1618 «Методы определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме». Измельченный структурообразующий материал засыпали и равномерно распределяли в приборе ИТП-МГ4 (Россия) для установления показателя теплопроводности.

Измельченные смеси тростника и соломы высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу SNOL 60/300 LFN (Литва). Электронные весы ВНЭ-35 (УП «Завод Эталон» (Беларусь)) использовали для определения массы образцов и сырьевых материалов.

Экспериментальные исследования. Исследования микроструктуры соломы ржи и тростника гигантского с применением электронной микроскопии проводили для выявления особенностей растительного сырья, влияющих на физические характеристики теплоизоляционных материалов. Микроструктуру соломы и тростника исследовали по поперечным и продольным срезам стеблей. На рисунках 1–4 приведены фотоизображения поперечных срезов высушенных стеблей соломы и тростника, полученные на электронном микроскопе.

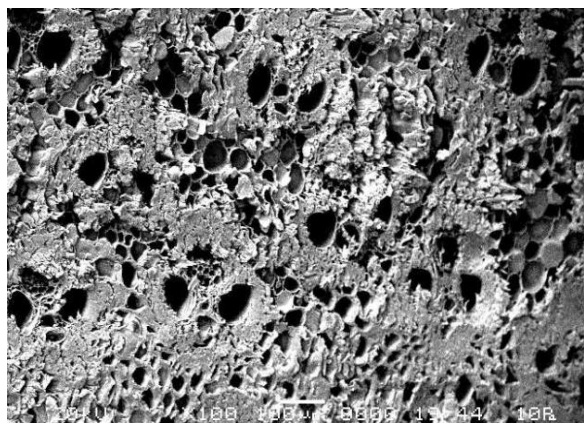


Рисунок 1. – Поперечный срез стебля тростника гигантского (100-кратное увеличение)

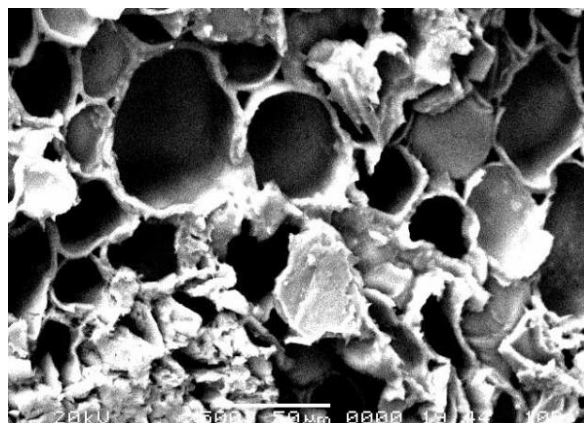


Рисунок 2. – Поперечный срез стебля тростника гигантского (500-кратное увеличение)

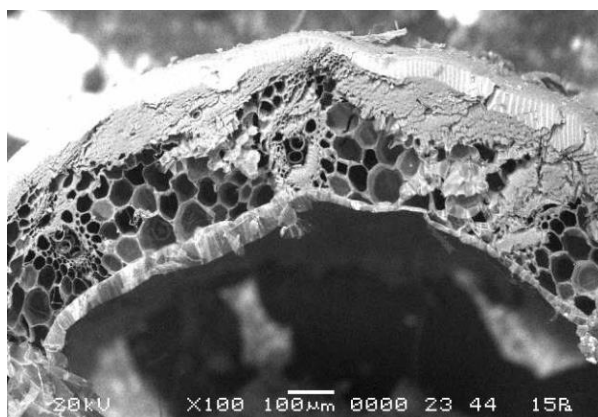


Рисунок 3. – Поперечный срез стебля ржаной соломы (100-кратное увеличение)

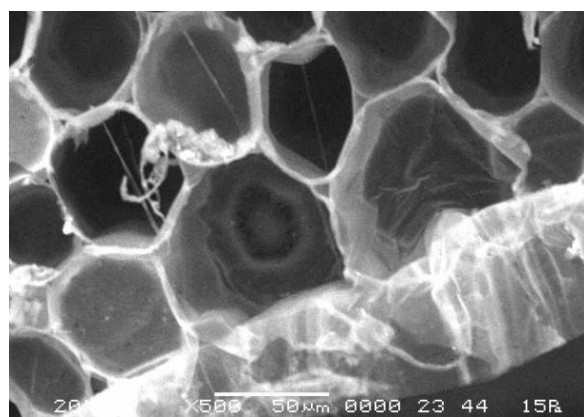


Рисунок 4. – Поперечный срез внутренней области стебля соломы (500-кратное увеличение)

При исследовании торцевого среза стебля тростника (см. рисунки 1, 2) установлено хаотичное расположение микрообластей из сосудистых пучков. На торцевом сечении пучки представлены в виде трех близко расположенных круглых отверстий диаметром 50–80 мкм. Одна полость относится к области флоэмы, а два сосуда – к области ксилемы. Вокруг пучков находится склеренхима в виде скоплений из плотных волокон. Остальное пространство в объеме 40–50% в строении стебля в виде сотовой структуры занимают паренхимные клетки диаметром 30–70 мкм. В поперечном сечении капилляры паренхимы имеют близкую к округлой форму. Толщина оболочек сосудов флоэмы, ксилемы и паренхимы составляет 2–4 мкм.

Описанная микроструктура находится в своеобразной оболочке толщиной 150–300 мкм, расположенной по внешнему контуру стебля. Обойма состоит из плотных волокон.

При 100-кратном увеличении строения структуры в поперечном сечении тростника видно, что сосуды флоэмы и ксилемы представляют собой сквозные трубки без поперечных перегородок. В паренхиме капилляры разделены через 150–200 мкм поперечными перегородками на ячейки вытянутой формы в виде цилиндров или коротких трубок.

После измельчения тростника в шаровой мельнице внешняя поверхность частиц имеет вид, аналогичный продольному срезу тростника. Такая поверхность частиц существенно улучшает адгезию с вяжущим компонентом при изготовлении теплоизоляционных плит.

Установленные параметры микроструктуры стебля тростника ставят под сомнение высокую эффективность измельченного тростника в качестве структурообразующего материала для тепловой изоляции. Для окончательного подтверждения выдвинутого предположения требуется определение коэффициента теплопроводности измельченного тростника.

Стебель ржаной соломы представляет собой трубку, зауженную в верхней части. В основной части стебля диаметр внутренней полости в 5–10 раз превышает толщину стенки. Ближе к колосу постепенное сужение трубки в верхней части приводит к уменьшению диаметра полости до размеров толщины стенки стебля.

Стенка стебля соломы представляет собой плотную структуру из продольных капилляров с округлой, гексагональной и неопределенной формой поперечного сечения. Пустотное пространство в поперечном и продольном сечении стебля соломы значительно превышает площадь, занимаемую структурным материалом капилляров.

Анализ полученных фотоизображений (см. рисунки 3, 4) позволяет определить две четко различимые структурные области в стебле соломы. Внутренняя область представлена капиллярами с размером 40–90 мкм в поперечном сечении. Оболочки капилляров очень тонкие, толщиной менее 0,5 мкм. Соседние оболочки капилляров плотно соединены между собой и формируют структуру из прозрачных перегородок (см. рисунок 4). На внутреннюю область приходится 50–60% от всего объема структуры стебля. По своему строению в поперечном сечении капиллярная структура соломы имеет сходство с пчелиными сотами.

Во внутренней области стебля каждый капилляр по длине делится поперечными перегородками с шагом 50–100 мкм на отдельные ячейки, схожие по форме с цилиндром или многоугольной призмой.

Во внешней области расположены капилляры с размером 5–40 мкм в поперечном сечении. Диаметр капилляров постепенно уменьшается к верхушке стебля. Оболочки капилляров более толстые, размером 1–2 мкм, с поперечными перегородками шириной около 1–3 мкм через 150–500 мкм. На внешнюю область приходится 40–50% от общего объема структуры стебля соломы.

Ранее проведенные исследования на атомно-силовом микроскопе [13] подтверждают, что стебель соломы с внешней стороны защищен плотной оболочкой, имеющей бороздчатый рельеф. При измельчении соломы происходит разрыв и деформация капиллярной структуры в продольном и поперечном направлениях по боковым граням получаемых соломенных пластинок. В то же время рваная рельефная поверхность боковых граней пластинок соломы способствует хорошему сцеплению с вяжущим материалом.

Ячеистое строение капилляров во внутренней области стеблей соломы по своей форме, размерам ячеек и толщине перегородок имеет показатели, аналогичные структуре пенополистирола. Таким образом, установлено, что солома может проявлять высокие теплотехнические свойства в качестве теплоизоляции благодаря эффективной микроструктуре внутренней области стебля.

Для исследования теплоизоляционных материалов на основе тростника проведен комплекс экспериментов по подбору составов, включая получение заполнителей различных фракций, определение теплопроводности заполнителей и вяжущих материалов, разработку технологии получения утеплителей.

На первом этапе в экспериментальных исследованиях использовали заполнитель, представляющий собой смесь из частиц измельченного тростника. Предположение о возможности использования тростника в качестве заполнителя для теплоизоляционных материалов основано на результатах электронной микроскопии.

Подготовленный стебель тростника сначала измельчали в шаровой мельнице на протяжении 90 мин. После измельчения в шаровой мельнице из стебля тростника получали полифракционную смесь. Для определения фракционного состава использовали сита с размером ячеек 5; 2; 1; 0,5 и 0,25 мм. Фракционный состав приведен в таблице 1.

Таблица 1. – Фракционный состав измельченного тростника

№ фракции	Частный остаток на сите с диаметром ячейки, мм	Содержание по массе, %
1	5	9
2	2	25
3	1	36
4	0,5	15
5	0,25	11
6	менее 0,25	4

Основная масса измельченного тростника (61%) приходится на фракции 2 и 3. Фракции 4, 5 составляют 26% от общей массы частиц тростника. Мелкие частицы и пыль проходят через сито с размером ячеек 0,25 мм

и имеют незначительный объем по массе. Крупные частицы тростника фракции 1 представляют собой недоизмельченную часть сырья и могут добавляться в новую сырьевую массу нарезанных на цилиндры стеблей тростника перед измельчением в шаровой мельнице.

Как показали исследования, полного измельчения сырья до фракций 2–5 достичь невозможно. Снижение процентного содержания частиц фракции 1 примерно на 50% требует увеличения времени работы шаровой мельницы на 30–35 минут, что в 1,3 раза увеличивает технологический цикл измельчения и экономически нецелесообразно.

Далее проводили исследования по определению теплопроводности измельченного тростника по фракциям. Внешний вид образца из смеси тростника (фракции 3–5) в измерительном устройстве прибора ИТП-4МГ после определения коэффициента теплопроводности приведен на рисунке 5. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Плотность и коэффициент теплопроводности частиц тростника по фракциям

№ фракции	Частный остаток на сите с диаметром ячейки, мм	Масса, г	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
2	2	250	136	0,066
3	1	265	139	0,059
4	0,5	270	141	0,057
5	0,25	300	144	0,057

В диапазоне плотностей 139–144 кг/м³ для фракций 3–5 показатели теплопроводности имеют близкие значения и находятся в пределах 0,057–0,059 Вт/(м·°С). Коэффициент теплопроводности для фракции 2 превышает указанные значения фракций 3–5 в среднем на 14%, поэтому в последующих исследованиях эта фракция не использовалась. Так как значения коэффициентов теплопроводности фракций 3–5 практически совпадают, то решено использовать в качестве структурообразующего сырья для дальнейших экспериментов частицы тростника на ситах с диаметром ячеек 0,25–1 мм. В общем объеме измельченного материала на частицы тростника фракций 3–5 приходится 62%. Частицы фракции 2 рационально использовать для повторного измельчения в шаровой мельнице.

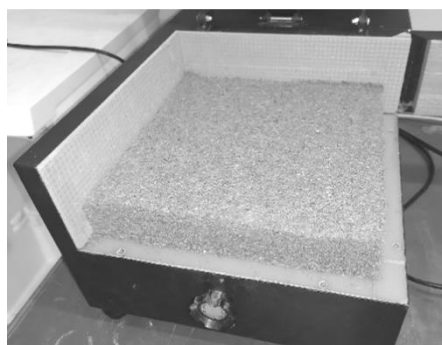


Рисунок 5. – Образец из смеси тростника (фракции 3–5) в приборе ИТП-4МГ

Теплопроводность измельченного тростника имеет достаточно высокие показатели (см. таблицу 2). С учетом имеющегося опыта [10; 14] решено ввести второй компонент заполнителя в виде измельченной соломы. Коэффициент теплопроводности измельченной ржаной соломы равен 0,045 Вт/(м·°С). Первоначально заменили 20 и 30% тростника по массе измельченной соломой. Влияние расхода соломы на теплопроводность смеси заполнителя изучали при изменении плотности от 120 до 180 кг/м³. Результаты измерений представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Коэффициент теплопроводности смеси тростника и соломы

Соотношение тростника к соломе, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С), при плотности, кг/м ³			
	120 (225)*	140 (260)*	160 (300)*	180 (340)*
80:20	0,055	0,05	0,049	0,052
70:30	0,055	0,047	0,048	0,05
50:50	0,052	0,045	0,046	0,049

Примечание. * – расход смеси заполнителя по массе, г, на образец-плиту размером 250×250×30 мм.

При соотношении компонентов 80:20 коэффициент теплопроводности изменяется в пределах 0,049–0,055 Вт/(м·°С). Минимальное значение теплопроводности смеси заполнителя при плотности 160 кг/м³ на 11% ниже максимального показателя, соответствующего плотности 120 кг/м³. Относительно составов 3 и 4 (см. таблицу 2) коэффициент теплопроводности смеси заполнителя при плотности 160 кг/м³ уменьшился на 14%.

Увеличение расхода соломы до 30% в смеси заполнителя подтвердило дальнейшее снижение коэффициента теплопроводности до 0,047 Вт/(м·°С), что меньше наибольшего значения на 15%. Наименьшие коэффициенты теплопроводности 0,045 и 0,046 Вт/(м·°С) по результатам испытаний получены на смесях с соотношением массы тростника к соломе 50:50 при плотности 140–160 кг/м³.

Замещение 50% тростника измельченной соломой привело к снижению коэффициента теплопроводности в среднем на 26% относительно показателей измельченного тростника (см. таблицу 2). При равном соотношении по массе в объеме композиции преобладает измельченная солома, обладающая более низкой плотностью. Полученная двухкомпонентная смесь представляет собой структурную систему из двух взаимопроникающих пространственных структур из измельченного тростника и соломы, обладающую низким коэффициентом теплопроводности.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. По результатам электронной микроскопии установлено, что в строении стебля тростника на область паренхимы приходится 40–50% от всего объема. Клетки паренхимы формируют ячеистую структуру. Ячейки диаметром 30–70 мкм и длиной 150–200 мкм имеют толщину стенок 2–4 мкм. Стебель тростника с указанными параметрами микроструктуры не может обладать высокими теплотехническими показателями и рассматриваться как самостоятельное сырье для получения тепловой изоляции.

2. Для измельченного тростника минимальный коэффициент теплопроводности равный 0,057–0,059 Вт/(м·°С) достигается на фракциях 3–5 (сита с размером ячеек 0,25–1 мм) при плотности смеси 139–144 кг/м³. Полученные результаты не позволяют определить измельченный тростник как высокоэффективный структурообразующий материал для тепловой изоляции.

3. Высокие теплоизоляционные свойства ржаной соломе обеспечивает микроструктура внутренней области стебля, по своему строению сопоставимая с микроструктурой пенополистирола. На внутреннюю область приходится 50–60% от общего объема структуры стебля соломы. Внутренняя область представлена капиллярами с размером 40–90 мкм в поперечном сечении. Оболочки капилляров очень тонкие и прозрачные, толщиной менее 0,5 мкм. Во внутренней области стебля каждый капилляр по длине делится поперечными перегородками с шагом 50–100 мкм на отдельные ячейки, схожие по форме с цилиндром или многоугольной призмой.

4. Замещение части тростника измельченной соломой обеспечивает снижение коэффициента теплопроводности на 21%. Наименьший коэффициент теплопроводности 0,045 Вт/(м·°С) по результатам испытаний получен на смесях с соотношением массы тростника к соломе 50:50 при плотности 140 кг/м³. В результате подобранных фракций и соотношения формируется оптимальная теплоизоляционная структурная матрица, обеспечивающая низкий коэффициент теплопроводности композиции, что позволяет использовать измельченный тростник в качестве компонента смеси для получения эффективного структурообразующего материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Pennacchio, L. Savio, D. Bosia, F. Thiebat, G. Piccablotto, A. Patrucco, S. Fantucci, Fitness: Sheep-wool and Hemp Sustainable Insulation Panels, *Energy Procedia*. 111 (2017) 287–297. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.030](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.030).
2. C. Buratti, E. Belloni, E. Lascaro, F. Merli, P. Ricciardi, Rice husk panels for building applications: thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials, *Constr. Build. Mater.* 171 (2018) 338–349. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089).
3. M. Palumbo, A.M. Lacasta, N. Holcroft, A. Shea, P. Walker, Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials, *Constr. Build. Mater.* 124 (2016). DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2016.07.106](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.106).
4. X. Yin, M. Lawrence, D. Maskell, M. Ansell, Comparative micro-structure and sorption isotherms of rice straw and wheat straw, *Energy Build.* 173 (2018) 11–18. DOI: [10.1016/j.enbuild.2018.04.033](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.033).
5. C. Ingrao, A. Lo Giudice, J. Vacenetti, C. Tricase, G. Dotelli, M. Fiala, V. Siracusa, C. Mbohwa, Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51 (2015) 29–42. DOI: [10.1016/j.rser.2015.06.002](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.002).
6. F. Collet, S. Pretol, C. Lanos, Hemp-straw composites: Thermal and hygric performances, *Energy Procedia* 139 (2017) 294–300. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.11.211](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.211).
7. Широков, Е.И. Экологическая биопозитивных ограждающих конструкций из соломенных блоков в Беларуси : в 2 ч. / Е.И. Широков. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2007. – Ч. 1 : Экодома из соломы: технология строительства. – 40 с.
8. Environmental product declaration (EPD). EcoCocon Straw Modules (Panels). Owner: UAB/Ltd EcoCocon, Lithuania. Assessment made by VTT Technical Research Center of Finland Ltd. Project reference no: VTT-CRM-158424-18. Validity: 5 year period from assessment date. Reference year 2016–2017.
9. Грибанова, С. Урожай обернется домом / С. Грибанова // Эксперт Казахстан. – 2006. – № 32 (88). – С. 57–62.
10. A. Bakatovich, F. Gaspar, Composite material for thermal insulation based on moss raw material, *Constr. Build. Mater.* 228 (2019). DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.116699](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116699).
11. Petrov, A. Thermal insulation materials based on straw and inorganic binders : Dissertation of the Candidate of Technical Sciences : 05.23.05 / A. Petrov. – Kazan, 1998. – 178 p.
12. Крутов, П.И. Строительные материалы из местного сырья в сельском строительстве / П.И. Крутов, Н.И. Склизов, А.Д. Терновский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1978. – 284 с. – (Серия «Сельскому строителю»).

13. Долгонок, А.В. Отличительные особенности микроструктуры и рельефа поверхности растительных заполнителей, обуславливающие показатели коэффициента теплопроводности и прочности на сжатие стеновых блоков / А.В. Долгонок, А.А. Бакатович // Вестн. гражданских инженеров. Сер. Строит. материалы и изделия. – 2019. – № 6. – С. 200–209.
14. Bakatovich, A. Ensuring a sustainable structure and efficiency of thermal insulation straw-bone slabs in full-scale conditions / A. Bakatovich, N. Davydenko // Construction Science. – 2017. – Vol. 20. – P. 4–9.

Поступила 08.10.2021

**THE INFLUENCE OF THE MICROSTRUCTURE OF REEDS AND STRAW
ON THE COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY OF THE STRUCTURE-FORMING
COMPOSITION OF THE THERMAL INSULATION MATERIAL**

A. BAKATOVICH, N. BAKATOVICH, F. GASPAR

Electron microscopy of the structure of giant reed and rye straw was performed. The microstructure parameters affecting the thermal conductivity coefficient of crushed reed and straw have been identified and studied. The fractional composition was investigated, including the determination of the percentage of crushed giant reed by fractions. The optimal sizes of reed particles have been determined taking into account the minimum thermal conductivity coefficient of the raw composition. To increase the effectiveness of the insulating ability of crushed giant reed, rye straw was introduced into the structure-forming mixture. The introduction of crushed straw into the composition makes it possible to reduce the thermal conductivity coefficient of the structure-forming mixture by 21% to an indicator corresponding to 0.045 W/(m×°C).

Keywords: reed, straw, microstructure, fraction, thermal conductivity coefficient, thermal insulation.