

**А. В. Артёмов, А. Е. Шкуро, К. А. Усова,
В. Г. Буриндин**

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ СВЯЗУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ТРОСТНИКА ОБЫКНОВЕННОГО

Ключевые слова: пластики, растительная биомасса, тростник обыкновенный, физико-механические свойства, биоразлагаемость.

Настоящее исследование является продолжением серии работ, посвященных пластикам без связующих (ПБС) на основе биомассы растительного происхождения. В настоящее время ряд ученых и производителей применяют биомассу однолетних растений в качестве наполнителя для композиционных материалов. Это решение позволяет снизить себестоимость продукции за счет замены традиционной ценной древесины. В качестве биомассы могут быть использованы как целые растения, так и их составляющие, такие как листья, стебли, побеги и другие части, в т.ч. и в виде порубочных остатков. Переход от технологии производства композиционных материалов на основе первичного природного сырья (древесины) к использованию вторичного сырья (аграрные и сельскохозяйственные отходы, растительная биомасса) должен обеспечить конкурентоспособность вторичного сырья по отношению к первичному. Одним из ключевых критериев, которым должно соответствовать вторичное сырье, является его стабильное образование или запасы в масштабах объема с минимальными материальными затратами. Растительное сырье в виде биомассы тростника обыкновенного имеет такие характеристики. В данном исследовании предлагается использовать пресс-материал, основанный на биомассе тростника с фракцией частиц менее 1,2 мм, при этом общее содержание таких частиц в фракционированной биомассе составляет около 86%. Рекомендуется выделять частицы размером 0,7 мм и менее, так как они обладают наибольшей реакционной способностью в процессе пьезотермической обработки. Установлено, что прочностные свойства ПБС будут зависеть от более крупного размера и формы частиц. Высокие показатели прочностных свойств образцов ПБС были определены для пресс-сырья с фракцией 1,2 мм. На основе показателей водо- и влагопоглощения образцов ПБС можно сделать вывод, что исследуемый растительный наполнитель не в состоянии полностью заменить древесину. В целом, все ПБС, созданные на основе недревесного растительного сырья, демонстрируют низкие показатели водостойкости. Однако предшествующие исследования указывают на то, что для ПБС, основанных на недревесном растительном сырье, характерны начальные стадии биоразлагаемости, которые осуществляются по гидролитическому механизму. Фракционированная биомасса тростника включает одревесневшие части стебля. Эта часть обладает повышенной устойчивостью благодаря наличию лигнина в клеточных стенках, который имеет консервирующие свойства и выполняет антисептическую функцию. Результаты оценки степени биоразлагаемости ПБС по отношению к грунту за 90 сут и полученные маркерные морфологические признаки, свидетельствуют о том, что исследованные образцы можно отнести к материалам с умеренной (частичной) биоразлагаемостью, что обусловлено особенностями исходного наполнителя.

**A. V. Artyomov, A. E. Shkuro, K. A. Usova,
V. G. Buryndin**

OBTAINING AND STUDYING THE PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS WITHOUT RESINS BASED ON COMMON REED

Key words: plastics, plant biomass, common reed, physical and mechanical properties, biodegradability.

The present study is a continuation of a series of papers devoted to plastics without resins (PWR) based on biomass of plant origin. Currently, a number of scientists and manufacturers are using biomass from annual plants as a filler for composite materials. This solution makes it possible to reduce the cost of production by replacing traditional valuable wood. Both whole plants and their components, such as leaves, stems, shoots and other parts, including in the form of felling residues, can be used as biomass. The transition from the production technology of composite materials based on primary natural raw materials (wood) to the use of secondary raw materials (agricultural and agricultural waste, plant biomass) should ensure the competitiveness of secondary raw materials in relation to primary. One of the key criteria that secondary raw materials should meet is their stable formation or large-scale reserves with minimal material costs. Vegetable raw materials in the form of biomass of common reed have the following characteristics. In this study, it is proposed to use a press material based on cane biomass with a particle fraction of less than 1.2 mm, while the total content of such particles in the fractionated biomass is about 86%. It is recommended to isolate particles with a size of 0.7 mm or less, as they have the highest reactivity during piezothermal treatment. It is established that the strength properties of PWR will depend on the larger size and shape of the particles. High strength properties of PWR samples were determined for press raw materials with a fraction of 1.2 mm. Based on the indicators of water and moisture absorption of PWR samples, it can be concluded that the studied vegetable filler is not able to completely replace wood. In general, all PWRs created on the basis of non-woody plant raw materials demonstrate low water resistance. However, previous studies indicate that PWRs based on non-woody plant raw materials are characterized by the initial stages of biodegradability, which are carried out by a hydrolytic mechanism. The fractionated biomass of cane includes both lamellar and needle-like particles, mainly consisting of the lignified part of the stem. This part has increased resistance due to the presence of lignin in the cell walls, which has preservative properties and performs an antiseptic function. The results of the assessment of the degree of biodegradability of PWR in relation to soil for 90 days and the obtained marker morphological features indicate that the studied samples can be attributed to materials with moderate (partial) biodegradability, due to the characteristics of the initial filler.

Введение

В настоящее время Центральная Азия обладает значительным потенциалом для экономического прогресса. Основной особенностью региона является то, что ни один зарубежный партнер не воспользовался его возможностями из-за сложных политических обстоятельств, связанных с пересечением и конкуренцией стратегических интересов различных субъектов, а также из-за существующих экономических трудностей и угроз безопасности. Для России существует больше благоприятных условий для активизации региона и разработки совместных проектов из-за схождения экономик и прежних связей [1].

Президент России Владимир Путин в интервью газете «Казахстанская правда» по итогам консультативной встречи лидеров центрально-азиатских государств заявил о взаимном интересе в сотрудничестве с Центральной Азией и призвал "реанимировать некоторые давно ушедшие в небытие предприятия" на совершенно новой технологической базе в странах Центральной Азии.

Итоги состоявшейся в Душанбе очередной Консультативной встречи лидеров центрально-азиатских государств формата «Центральная Азия плюс Россия» (14.09.2023 г.), определили направления сотрудничества в транспортно-логистической, энергетической и гуманитарной сферах. Аналогичным образом, было обсуждено решение экологических проблем Каспийского моря.

Обширные заросли тростника в Каспийском регионе оказывают значительное негативное воздействие. Эти заросли становятся причиной таких проблем, как ландшафтные пожары и ухудшение условий для возделывания сельскохозяйственных культур в районах, где данный сорняк произрастает, а его удаление оказывается практически невозможным [2].

В исследовании [3] описаны результаты экспериментов и изучения биологических характеристик роста и развития тростника как вредного сорняка. Рассматриваются основные технологические процессы, связанные с предпосевным уничтожением сорняков, включая агротехнические и химические методы борьбы.

Анализ контрольных выкосов показывает, что средняя ожидаемая урожайность тростника колеблется от 4,55 до 7,5 т/га [4].

Данная урожайность является достаточной для переработки биомассы в товарную продукцию, что особенно актуально для производства товаров, пользующихся широким потребительским спросом [5].

Например, биоконверсия сырья обыкновенного тростника в сбраживаемые сахара для производства биоэтанола является актуальной и динамично развивающейся областью научных исследований. С учетом недостатка моторных топлив в Узбекистане настало время для разработки альтернативных источников энергии, несмотря на дефицит нефтепродуктов. Биотопливо может стать катализатором экономического роста в стране, способствуя снижению дефицита топлива. В этой связи перспективы Узбекистана и развитие биотоплива в сфере топливно-энергетического комплекса представляют собой важные

направления, особенно в условиях отсутствия орошаемых земель в некоторых регионах республики. Одним из ключевых приоритетов государства Узбекистана является осуществление исследований, направленных на создание производства биотоплива из тростника обыкновенного [6].

В настоящее время в России проводятся исследования, направленные на переработку биомассы тростника с целью ее дальнейшего использования в народном хозяйстве. Кроме того, в литературе упоминаются исследования, посвященные использованию тростника в качестве сырья для производства биотоплива и в биоэнергетике [7, 8].

Одним из способов уменьшения углеродного следа является снижение или полный отказ от сжигания углеродосодержащих материалов, а также активное участие в программах по сокращению выбросов [9], т.е. использование биомассы тростника в качестве топлива недопустимо.

Сегодня большинство ученых исследуют пути перехода экономики от использования первичных природных ресурсов к более эффективному использованию вторичного сырья.

Одним из ключевых критериев, которыми должно обладать вторичное сырье, является его регулярное образование или восстановление в значительных объемах при минимальных материальных затратах. Эти факторы способствуют увеличению конкурентоспособности вторичного сырья по сравнению с первичным.

В этом контексте растительное сырье, представляющее собой порубочные растительные остатки (биомассу) тростника обыкновенного, может обеспечить значительные преимущества.

Ареал обитания многолетнего растения – тростник обыкновенный (или тростник южный, очерет, лат. – *Phragmites australis*) – в России и в сопредельных странах – повсеместно, за исключением крайнего Севера и приближенных к нему районов. Характеризуется высоким (до 4 м) и толстым стеблем (до 1 см в диаметре), крупными листьями шириной до 25 см. Такие характеристики растения, позволяет формировать большие объемы сырой фитомассы. Например, объемы запасов и урожайность тростника в зоне промышленной заготовки на территории Астраханской области (за 1957-1989 г.г.) достигали 898,37 тыс.т и 5,57 т/га соответственно [10].

Из-за своей распространенности и «урожайности» тростник нашел многообразное хозяйственное значение и применение. Биомасса тростника обладает широкими возможностями применения, включая производство сорбционных углей, целлюлозы и других биопродуктов [11-14].

В настоящее время для стимулирования экономики и повышения уровня жизни населения в нашей стране необходимо внедрение продукции, основанной на принципах импортозамещения.

Широко используемые различные импортные конструкционные и отделочные изделия получают на основе композиционных материалов. В древесно-полимерных композиционных материалах (ДПК) основным компонентом является древесная мука,

выступающая в роли наполнителя, а матрицей служит термопластичный полимер [15].

Для достижения конкурентоспособности, увеличения объемов производства и снижения стоимости таких материалов, многие ученые и производители предлагают различные решения. В частности, с целью применения в качестве сырья для производства композиционных материалов растительного сырья, обладающего следующими критериями – это легкодоступность (распространённость) и высокое воспроизводство. В настоящее время рассматриваются варианты применения лигноцеллюлозосодержащего сырья, включая использование древесных отходов в измельченном виде, фракционированных сельскохозяйственных растительных остатков (шелуха, лузга, биомасса) [16].

В работе [17] отмечается, что уровне законодательства в нашей стране, к биоразлагаемым материалам причисляются изделия и упаковка, изготовленные на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья, таких как бумага, картон, ткани из волокон природного происхождения и проч.

Введение синтетических полимеров в состав ДПКт создает определенные ограничения для полноценной классификации этих материалов как биоразлагаемых. Альтернативным решением является разработка композиционных материалов, которые можно получать исключительно из растительной биомассы без использования связующих веществ, посредством ее пьезотермической обработки [18].

Таким образом, изделия и материалы, созданные на основе растительной биомассы, могут обладать высоким потенциалом биоразлагаемости и не представляют опасности для окружающей среды.

Основным сырьем для получения композиционных материалов в виде пластиков без связующих (ПБС) в большинстве случаев являются древесные и растительные остатки, представляющие из себя мелкофракционированную массу опилок, стружки, шелухи, костры и проч. [19]. Такие частицы обладают значительной относительной поверхностью, которая способствует активному взаимодействию компонентов сырья (лигнина, целлюлозы) между собой в условиях высокого давления и температуры в замкнутом пространстве. Условия пьезотермической обработки позволяют достигать образование материала ПБС (а не спрессованного брикета) с высокими физико-механическими свойствами [19, 20].

Одним из ключевых преимуществ ПБС, изготовленных на основе растительного сырья, является их способность к гидролитической и микробиологической деструкции в естественной среде, благодаря отсутствию синтетического связующего и матричного полимера [20].

Цель данной работы – получение и всестороннее изучение ПБС на основе биомассы тростника обыкновенного.

В задачи данной работы входили следующие исследования:

- фракционного состава фракционированной биомассы тростника обыкновенного;
- физико-механических свойств и декоративных характеристик ПБС на основе биомассы тростника;

- биоразлагаемости ПБС по отношению к почвогрунту и оценка степени и механизма биоразлагаемости.

Испытания проводились в нескольких параллелях, количество образцов в каждой параллели составляла не менее 5. Полученные результаты испытаний были подвергнуты статистической обработке на выявление грубых промахов по Q-критерию.

Экспериментальная часть

Тростник обыкновенный представляет собой растение, состоящее из корневища с корнями и побегами, стебля с листьями и соцветиями (цветет с июля по сентябрь) [10]. В данной работе в качестве биомассы данного растения рассмотрено содержание в ней наиболее объемных частей растения, такие как стебель и листья. Вегетационный период – 2023 г., регион произрастания – прикаспийский регион республики Казахстан.

Стебли и листья растения промывались холодной водой для удаления пыли и минеральных примесей и высушивали при комнатной температуре.

В качестве изучаемых свойств пресс-сырья для получения ПБС на основе биомассы тростника обыкновенного были приняты визуальные и морфологические характеристики как самого исследуемого пресс-сырья, так и получаемых образцов ПБС.

Проведено микрофотографирование (при увеличении 400х) компонентов исходного сырья, составляющих основную биомассу (листья и стебли), которую предполагается использовать в качестве пресс-сырья для получения исследуемого материала. По визуальному анализу микрофотографий было установлено, что формирующие биомассу листья и стебли обладают цельной структурой, которые при фракционировании будут образовывать частицы игольчатого типа [18].

Далее сырье измельчалось в лабораторной мельнице и фракционировалось по ситам. В результате механического фракционирования на лабораторной мельнице из биомассы рассматриваемого растения были получены различные фракции. Для определения среднего фракционного состава были исследованы различные партии композиций, полученных при фракционировании (табл.1).

Таблица 1 – Средний фракционный состав композиций исследуемого пресс-сырья

Table 1 – Average fractional composition of the components of the studied press raw materials

Остаток на сите с диаметром, мм	> 5,2	5,2 ÷ 2,8	2,8 ÷ 1,2	1,2 ÷ 0,7	0,7 ÷ 0,4	0,4 <
Средний фракционный состав, %	10,6	2,2	1,2	11,7	48,9	25,4
Суммарная доля фракции 1,2 мм и менее, %	86,0					
Суммарная доля фракции 0,7 мм и менее, %	74,3					

Наибольшее количество фракционированных частиц (86,0 %) проходит сито с отверстием диаметром 1,2 мм и остается на поддоне, т.е. большая часть частиц имеет размер от 0 до 1,2 мм. Пресс-сырье с фракциями 0,7 мм и менее составляет порядка 74,3%.

При микроскопировании исследуемого пресс-сырья (при увеличении 400х) отмечается наличие овалообразных частиц, а также для фракции 1,2 мм в виде длинных игольчатых фрагментов, которые, вероятно, образовались из плохо фракционированного стебля (волокна и костра).

Из частиц фракции 1,2 и 0,7 мм были получены образцы ПБС. Условия прессования образцов соответствовали [18].

На рис.1 представлены сканографии [21], полученные с помощью планшетного сканера с CCD-матрицей при разрешении 300 dpi, для лицевой поверхности образцов ПБС.

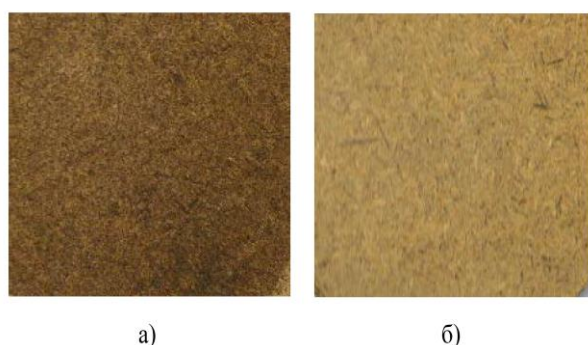


Рис. 1 – Сканография лицевой поверхности ПБС на основе биомассы тростника: а) фракция 0,7 мм и менее; б) фракция 1,2 мм и менее

Fig. 1 – Scan of the front surface of the PWR based on cane biomass: a) fraction 0.7 mm or less; b) fraction 1.2 mm or less

На рис.1, видно образование целостного монолитного материала и отсутствие пористости. Наиболее однородная структура наблюдалась у образцов, полученных из фракции 0,7 мм, что обусловлено более плотным контактом мелких частиц в процессе прессования. Однородность структуры подтверждается более темной окраской образца.

Фракция частиц 1,2 мм не позволяет осуществлять более глубокий контакт между собой, а наличие игольчатых частиц препятствуют проникновению большого количества внутренних связующих веществ. Лицевая поверхность таких образцов из-за этого более светлая.

Обработка растровой графики (сканографий на рис. 1) осуществлялось с использованием программы (free software) для анализа изображений и представления сводки доминирующих цветов «Image color summarizer».

ПБС, изготовленный на основе биомассы тростника, обладает насыщенными оттенками и разнообразной цветовой гаммой. Учитывая это, можно рассмотреть возможность применения материалов на основе ПБС для внутренней отделки помещений. В основном, полученные образцы имеют нейтральные цвета, близкие к коричневым оттенкам. Этот цвет может служить основным в интерьере различных типов

помещений, так как относится к классическому стилю.

Были определены прочностно-пластические характеристики, включающие в себя плотность, прочность при изгибе, твердость по Шору, модуль упругости при изгибе (в т.ч. по прогибу образца-диска) [19]. Были определены показатели водостойкости: водопоглощение по объему и разбухание по толщине за 24 часа, краевой угол смачивания [19].

Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства ПБС на основе биомасс тростника

Table 2 – Physico-mechanical properties PWR based on cane biomass

Показатель	Фракция, мм	
	0,7	1,2
Плотность, кг/м ³	970±4	981±6
Прочность при изгибе, МПа	3,4±0,2	7,5±0,2
Твердость по Шору, шкала D	56±3	66±2
Модуль упругости при изгибе, МПа	129,4±1,2	706,6±2,3
Модуль упругости при изгибе (по прогибу образца-диска), МПа	5386±12	4081±29
Водопоглощение по объему за 24 ч, %	57±2	69±5
Водопоглощение лицевой поверхностью за 24 ч, %	62±2	67±4
Разбухание по толщине за 24 ч, %	33,7±2,1	42,5±4,1
Разбухание по толщине за 24 ч через лицевую поверхность, %	17,4±0,7	10,9±1,1
Краевой угол смачивания, °	38±1	43±1

На основании полученных данных по результатам испытаний на прочностно-пластические характеристики ПБС, полученных на основе биомассы тростника, можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее высокие показатели прочностно-пластических свойств образцов ПБС (за исключением модуля упругости при изгибе по прогибу образца-диска) были установлены для пресс-сырья с фракцией 1,2 мм. Размер исходных частиц оказывает влияние на процесс формирования ПБС: меньшие размеры частиц способствуют лучшему контакту между ними во время пьезотермической обработки. Относительно высокая активная поверхность частиц обеспечивает более глубокие физико-химические процессы, что в свою очередь приводит к созданию более качественного материала. Ранее проведенные исследования [18] также подтвердили, что форма частиц исходного наполнителя влияет на структурообразование ПБС, что, в свою очередь, определяет их физико-механические свойства.

2. Можно утверждать, что прочностно-пластические характеристики ПБС на основе исследуемого пресс-сырья, в значительной степени определяются его исходным фракционным составом, что связано с

особенностями формы частиц. Это утверждение подтверждается показателем модуля упругости при изгибе по прогибу образцов-дисков, который у холодных образцов демонстрирует степень отверждения материала. Т.е. процессы структурообразования ПБС на основе исследуемого пресс-сырья с меньшими фракциями, протекают более интенсивно и глубоко, что способствуют формированию материала. Однако прочностно-пластические свойства ПБС в таком случае будут обусловлены более крупным размером и формой частиц.

Результаты проведенных испытаний на показатели водостойкости и влагопоглощения демонстрируют высокие значения водопоглощения и разбухания ПБС на основе биомассы тростника (табл. 2). При этом полное водонасыщение материала осуществляется через лицевую поверхность, которая обладает низким углом смачивания.

Параллельно проводилось микроскопирование образцов ПБС по результатам испытаний на водостойкость (см.рис.2).



Рис. 2 – Микрофотография (400х) образца ПБС до и после испытаний на водопоглощение по объему
Fig. 2 – Micrograph (400x) of a PWR sample before and after volume water absorption tests

Лицевая поверхность образцов после испытаний проявляет нетипичные цветовые оттенки. Возможно, такая интенсивная темно-серая окраска обусловлена процессами деструкции (гниения).

На основании показателей водо- и влагопоглощения образцов ПБС можно сделать косвенный вывод о том, что исследуемый растительный наполнитель не способен полностью заменить древесину. В целом, низкие показатели водостойкости наблюдаются у всех ПБС на основе недревесного растительного сырья [20].

Оценка биоразлагаемости образцов ПБС проводилась по отношению почво-грунту в течение 90 сут.

В качестве критериев для оценки степени биоразлагаемости ПБС были использованы следующие показатели [19]:

- изменение массы образцов;
- изменение массы при лицевой проницаемости образцов (при герметизации торцов и боковой поверхности образца);
- изменение размеров толщины образцов;
- изменение размеров толщины при лицевой проницаемости образцов (при герметизации торцов и боковой поверхности образца);

- изменения внешнего вида образцов по результатам микроскопирования лицевой и боковой поверхности.

Результаты микроскопирования образцов ПБС после экспозиции в почво-грунте представлены на рис.3.



Рис. 3 – Результаты микроскопирования лицевой поверхности образца ПБС до и после экспозиции в почво-грунте (90 сут)

Fig. 3 – Results of microscopy of the front surface of the PWR sample before and after exposure in soil (90 days)

Результаты испытаний образцов ПБС на биоразлагаемость при их экспозиции в почво-грунте (90 сут) представлены в табл.3.

Таблица 3 – Результаты изменения массы и толщины образцов ПБС

Table 3 – Results of changes in the mass and thickness of PWR samples

Показатель	Фракция, мм	
	0,7	1,2
Изменение массы, %	-38±2	-36±2
Изменение массы при испытаниях на лицевую проницаемость, %	-39±2	-38±2
Изменения размеров по толщине, %	+25±3	+41±3
Изменения размеров по толщине при испытаниях на лицевую проницаемость, %	+49±3	+23±3

На основе результатов испытаний на биоразлагаемость образцов ПБС на основе биомассы тростника, выполненных в почво-грунте в течение 90 сут, можно сделать следующие выводы:

1. За указанный период наблюдается потеря массы образцов почти на 40 %. При этом размер фракции биомассы тростника не оказывает влияния на процессы деструкции. Показатель потери массы одинаков независимо от условий первоначального влагонасыщения, что свидетельствует о том, что гидролитическая деструкция ПБС протекает равномерно по всему объему и во всех направлениях материала.

2. При общем водонасыщении наблюдается увеличение толщины образцов, причем у образцов с более крупной фракцией частиц биомассы тростника это увеличение достигает почти двукратного раз-

мера. В то же время, при водонасыщении через лицевую поверхность наблюдается противоположная тенденция: образцы из меньшей фракции пресс-сырья увеличиваются в толщине практически в 1,5 раза. Это свидетельствует о том, что влагонасыщение материала происходит преимущественно через его лицевую поверхность. Крупные частицы пресс-материала формируют более обширную удельную гидрофобную поверхность. Однако, при формировании материала по толщине за счет более крупного размера и продольной формы, такие частицы имеют меньшую текучесть, что препятствует достижению равномерной толщины материала. Неровное формирование толщины приводит к образованию трещин и пустот, что, в свою очередь, способствует интенсификации начальной гидролитической деструкции ПБС.

Оценка степени биоразлагаемости ПБС на основе лигноцеллюлозосодержащего сырья выполняется на основании анализа маркерных признаков (критериев) морфологического изменения испытуемых образцов ПБС [20].

Результаты фото- и микроскопического анализа образцов ПБС, проведенных после испытаний на биоразлагаемость, представлены в табл.4. Полученные данные позволяют визуально установить маркерные признаки (критерии) степени биоразложения и выполнить балльную оценку степени биоразложения ПБС.

Таблица 4 – Оценка биоразлагаемости ПБС на основе биомассы тростника

Table 4 – Assessment of the biodegradability of PWR based on cane biomass

Маркерный признак (критерий)	Описание критерия	Средний балл по критерию оценки	Коэффициент вариации, %
Деструкция материала (потеря массы)	Наблюдается частичная деструкция материала в периферийной части	3,8	3,2
Расслоение (разбухание) материала по толщине	Имеется ярко выраженное расслоение материала по толщине	4,8	2,1
Деформация материала	Наблюдается локальная деформация (разломы) лицевой поверхности	3,3	3,0
Пигментация лицевой поверхности материала	Пигментация лицевой поверхности слабовыраженная	1,8	2,9
Микробиологическое поражение материала	Наличие прямых признаков биологического поражения отсутствуют	1,2	1,1
Итого (среднее)		3,0	2,5

На основе зафиксированных морфологических и физических изменений образцов ПБС после испытаний на биоразлагаемость была выполнена оценка биоразлагаемости исследуемых материалов [20] (рис.4).



Рис. 4 – Оценка биоразлагаемости ПБС на основе биомассы тростника по маркерным признакам

Fig. 4 – Assessment of the biodegradability of PWR based on reed biomass by marker signs

Изучаемые образцы ПБС продемонстрировали минимальные морфологические изменения, касающиеся пигментации поверхности и биологического поражения. Хотя внешне образцы не имели явных признаков биологического поражения, на них был зафиксирован рост корней. Это позволяет сделать вывод о том, что процессы биологической активности растений и микроорганизмов, хоть и слабо выраженные, все же имели место.

На основании проведенного исследования и анализа маркерных показателей биоразлагаемости ПБС на основе биомассы тростника, можно сделать вывод о том, что данный материал обладает умеренной (частичной) биоразлагаемостью.

Процесс разрушения исследуемого материала начинается с гидролитической деструкции, которая приводит к расслоению, деформации и частичному разрушению структуры. В дальнейшем биологическая деструкция и пигментация материала происходят с меньшей интенсивностью, что обусловлено особенностями структуры наполнителя. Фракционированная биомасса тростника содержит как пластинчатые, так и игольчатые частицы, которые преимущественно состоят из одревесневшей части стебля. Эта часть характеризуется повышенной устойчивостью, обусловленной наличием лигнина в клеточных стенках, который обладает консервирующими свойствами и выполняет функцию антисептика, что повышает стойкость тканей к разрушительному воздействию грибов и бактерий.

Заключение

На основании выполненной работы и анализа литературных данных определена возможность получения ПБС на основе биомассы тростника обыкновенного.

В ходе исследования был исследован фракционный состав образуемой биомассы, были проанализированы физико-механические характеристики образцов ПБС, включая плотность, модуль упругости при изгибе, прочность при изгибе, твердость, водопоглощение и разбухание по толщине. Кроме того, проведены испытания на биоразлагаемость в почво-грунте. На основе полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Рекомендуются использовать пресс-материал, изготовленный на основе биомассы тростника обыкновенного с размером частиц менее 1,2 мм, содержание которых в общей массе биомассы составляет около 86 %.

2. Выявлено влияние фракционного состава исходного пресс-материала с размерами частиц 0,7 и 1,2 мм. Наилучшие показатели прочности и водостойкости были зафиксированы у образцов с фракцией 0,7 мм. Наименьшие физико-механические свойства наблюдались у прессованных образцов, изготовленных из крупнофракционированного пресс-сырья. Это может быть объяснено тем, что крупные частицы затрудняют плотный контакт между собой во время прессования и препятствуют образованию монолитного материала.

3. Установлено, что все образцы ПБС, полученные на фракциях 0,7 и 1,2 мм, демонстрируют низкие показатели водостойкости. Для ПБС, изготовленных из данного сырья, характерна начальная стадия разрушения, происходящая по гидролитическому механизму. Применение гидрофобизирующих и химических добавок в состав этого наполнителя позволит разрабатывать материалы с регулируемым сроком деструкции.

4. В ходе испытаний в почво-грунте было установлено, что ПБС на основе биомассы тростника обладают умеренной способностью к биоразложению. Это связано с тем, что прессованная масса из данного наполнителя в основном состоит из одревесневших стеблей, обладающих высокой гидролитической стойкостью.

5. При исследовании эстетических характеристик было выявлено, что ПБС на основе биомассы тростника может быть использован для отделки внутренних помещений. Это объясняется тем, что светло-коричневый цвет получаемых ПБС является универсальным для всех типов помещений и пользуется спросом в дизайне интерьеров. Анализ цветовых характеристик образцов ПБС, полученных из различных фракций измельченной биомассы тростника, демонстрирует возможность исключения применения лакокрасочных материалов, необходимых для достижения указанных оттенков.

Литература

1. В. О. Кротков, *Геоэкономика энергетики*, **11**, 3, 97-105 (2020). DOI 10.48137/2687-0703_2020_11_3_97.
2. Р. Ю. Скоков, Д. А. Ранделин, А. В. Соловьев, К. А. Томиленко, *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*, **3 (75)**, 231-241 (2024). DOI 10.32786/2071-9485-2024-03-27.
3. Х. Тагаев, *Международная научно-практическая конференция, посвящённая году экологии в России «Научно-практические пути повышения экологической устойчивости и социально-экономическое обеспечение сельскохозяйственного производства»* (с. Соленое Займище, Россия, 18-19 май, 2017). Прикаспийский научно-исследовательский институт аридного земледелия, Соленое Займище, 2017. С. 1238-1242.
4. Н. А. Соколова, В. Е. Костин, И. И. Васенев, В. И. Ерошенко, *Социально-экологические технологии*, **11**, 2, 215-229 (2021). DOI 10.31862/2500-2961-2021-11-2-215-229.
5. О. П. Мансуров, А. Ф. Кемалов, *Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология*, **2 (407)**, 27-33 (2023). DOI 10.15518/isjaee.2023.02.027-033.
6. З. З. Джамалов, *Устойчивое развитие науки и образования*, **6 (45)**, 32-38 (2020).
7. О. П. Мансуров, *Агрохимический вестник*, **2**, 53-60 (2023). DOI 10.24412/1029-2551-2023-2-009.
8. А. В. Броднева, Е. Н. Нуруллина, Д. В. Тунцев, *Химия. Экология. Урбанистика*, **1**, 22-25 (2024).
9. Д. Х. Ахтямова, О. С. Алеевская, В. А. Куклев, А. С. Сальников, В сб. *Наставничество и экология*. Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет, 2023. С. 126-129.
10. Л. Е. Курлович, В. Н. Косицын, *Таксационный справочник по лесным ресурсам России (за исключением древесины)*, Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, Пушкино, 2018. 282 с.
11. А. Н. Кортусов, В. Н. Золотухин, Г. Ф. Миронова, Ю. В. Севастьянова, Н. В. Бычин, В. В. Будаева, *XIV Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященная 90-летию юбилею академика Саковича Г. В. «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности»* (Бийск, Россия, 19-21 май, 2021). Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, Бийск, 2021. С. 271-277. DOI 10.25699/tohhbipp.2021.16.98.002.
12. F. Cotana, G. Cavalaglio, A. L. Pisello, M. Gelosia, D. Ingles, E. Pompili, *Sustainability*, **7 (9)**, 12149-12163 (2015). doi.org/10.3390/su70912149.
13. Н. А. Муравьева, Ю. В. Куликова, О. О. Бабич, *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, **336**, 1, 7-17 (2025). DOI 10.18799/24131830/2025/1/4627.
14. G. Cavallo, F. Cotana, M. Gelosia, Enrico Pompili, S. D'Antoni, D. Ingles, *Environmental progress and sustainable energy*, **36 (3)** (2017). doi.org/10.1002/ep.12529.
15. V. Vatanpour, M. E. Pasaoglu, H. Barzegar, O. O. Teber, K. Recep, M. Bastug, A. Khataee, I. Koyuncu, *Chemosphere*, **295**, P. 133914 (2022). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.133914.
16. К. А. Усова, А. Е. Шкуро, А. В. Артёмов, В. В. Глухих, *Вестник Технологического университета*, **28**, 3, 54-58 (2025). DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_3_54
17. Ю. А. Чусова, *Международная ежегодная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы правовой охраны окружающей среды и экологического образования в Российской Федерации и Республике Беларусь»* (Ижевск, 19–20 апреля 2023 года). Удмуртский государственный университет, Ижевск, 2024. С. 38-41.
18. А. С. Ершова, А. В. Савиновских, А. В. Артёмов, В. Г. Бурындина, К. В. Садыкова, *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*, **2**, 5-16 (2023). DOI 10.25686/2542-114X.2023.2.5.
19. А. В. Артёмов, А. Е. Шкуро, В. Г. Бурындина, *Деревообрабатывающая промышленность*, **1**, 64-77 (2025).
20. А. В. Артёмов, А. С. Ершова, А. Е. Шкуро, В. Г. Бурындина, *Лесотехнический журнал*, **14**, 1(53), 134-150 (2024). DOI 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/8.

21. А. В. Артёмов, А. В. Вураско, А. С. Ершова, В. Г. Буриндин, *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, **245**, 293-307 (2023). DOI 10.21266/2079-4304.2023.245.293-307.

References

1. V. O. Krotkov, *Geoconomics of Energy*, **11**, 3, 97-105 (2020). DOI 10.48137/2687-0703_2020_11_3_97.
2. R. Y. Skokov, D. A. Randelin, A.V. Solovyov, K. A. Tomilenko, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitet complex: Science and higher professional education*, **3** (75), 231-241 (2024). DOI 10.32786/2071-9485-2024-03-27.
3. Kh. Tagaev, *International Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Ecology in Russia "Scientific and practical ways to improve environmental sustainability and socio-economic support for agricultural production"* (Saline village, Russia, May 18-19, 2017). Caspian Scientific Research Institute of Arid Agriculture, Saline Zaymishche, 2017. pp. 1238-1242.
4. N. A. Sokolova, V. E. Kostin, I. I. Vasenev, V. I. Eroshenko, *Socio-ecological technologies*, **11**, 2, 215-229 (2021). DOI 10.31862/2500-2961-2021-11-2-215-229.
5. O. P. Mansurov, A. F. Kemalov, *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology*, **2** (407), 27-33 (2023). DOI 10.15518/isjaee.2023.02.027-033.
6. Z. Z. Jamalov, *Sustainable development of science and education*, **6** (45), 32-38 (2020).
7. O. P. Mansurov, *Agrochemical Bulletin*, **2**, 53-60 (2023). DOI 10.24412/1029-2551-2023-2-009.
8. A.V. Brodneva, E. N. Nurullina, D. V. Tuntsev, *Chemistry. Ecology. Urbanistics*, **1**, 22-25 (2024).
9. D. H. Akhtyamova, O. S. Aleevskaya, V. A. Kuklev, A. S. Salnikov, *In the collection Mentoring and Ecology*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2023. pp. 126-129.
10. L. E. Kurlovich, V. N. Kositsyn, *Tax Reference Book on Russian Forest Resources (excluding timber)*, All-Russian Scientific Research Institute of Forestry and Forestry Mechanization, Pushkino, 2018. 282 p.
11. A. N. Kortusov, V. N. Zolotukhin, G. F. Mironova, Yu.V. Sevastyanova, N.V. Bychin, V.V. Budaeva, *XIV All-Russian Scientific and practical Conference of students, postgraduates and young scientists with international participation, dedicated to the 90th anniversary of Academician G.V. Savukovich. "Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries"* (Biysk, Russia, May 19-21, 2021). Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Biysk, 2021. pp. 271-277. DOI 10.25699/tohbipp.2021.16.98.002.
12. F. Cotana, G. Cavalaglio, A.L. Pisello, M. Gelosia, D. Ingles, E. Pompili, *Sustainability*, **7** (9), 12149-12163 (2015). doi.org/10.3390/su70912149
13. N. A. Muravyeva, Yu. V. Kulikova, O. O. Babich, *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo-resources*, **336**, 1, 7-17 (2025). DOI 10.18799/24131830/2025/1/4627.
14. G. Cavallo, F. Cotana, M. Gelosia, Enrico Pompili, S. D'Antoni, D. Ingles, *Environmental progress and sustainable energy*, **36** (3) (2017). doi.org/10.1002/ep.12529.
15. V. Vatanpour, M. E. Pasaoglu, H. Barzegar, O. O. Te-ber, K. Recep, M. Bastug, A. Khataee, I. Koyuncu, *Chemosphere*, **295**. P. 133914 (2022). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.133914.
16. K. A. Usova, A. E. Shkuro, A.V. Artemov, V. V. Glukhykh, *Herald of Technological University*, **28**, 3, 54-58 (2025). DOI 10.55421/3034-4689_2025_28_3_54
17. Yu. A. Chusova, *International Annual Scientific and Practical Conference "Actual problems of Legal Environmental Protection and Environmental Education in the Russian Federation and the Republic of Belarus"* (Izhevsk, April 19-20, 2023). Udmurt State University, Izhevsk, 2024. pp. 38-41.
18. A.S. Yershova, A.V. Savinovskikh, A.V. Artemov, V.G. Burindin, K.V. Sadykova, *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*, **2**, 5-16 (2023). DOI 10.25686/2542-114X.2023.2.5.
19. A.V. Artyomov, A. E. Shkuro, V. G. Buryndin, *Wood processing industry*, **1**, 64-77 (2025).
20. A. V. Artyomov, A. S. Yershova, A. E. Shkuro, V. G. Buryndin, *Forestry Engineering Journal*, **14**, 1(53), 134-150 (2024). DOI 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/8
21. A.V. Artyomov, A.V. Vurasko, A. S. Yershova, V. G. Buryndin, *Izvestiya St. Petersburg Forestry Academy*, **245**, 293-307 (2023). DOI 10.21266/2079-4304.2023.245.293-307.

© **А. В. Артёмов** – канд. техн. наук, доцент кафедры Технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров (ТЦБППП), Уральский государственный лесотехнический университет (УГЛТУ), Екатеринбург, Россия, artemovav@m.usfeu.ru; **А. Е. Шкуро** – д-р техн. наук, профессор кафедры ТЦБППП, УГЛТУ, shkuroae@m.usfeu.ru; **К. А. Усова** – ассистент кафедры ТЦБППП, УГЛТУ, usovaka@m.usfeu.ru; **В. Г. Буриндин** – д-р техн. наук, профессор кафедры ТЦБППП, УГЛТУ, buryndinv@m.usfeu.ru.

© **A. V. Artyomov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Pulp and Paper Production Technologies and Polymer Processing (PPPT&PP), Ural State Forest Engineering University (USFEU), Ekaterinburg, Russia, artemovav@m.usfeu.ru; **A. E. Shkuro** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the PPPT&PP department, USFEU, shkuroae@m.usfeu.ru; **K. A. Usova** – Assistant of the PPPT&PP department, USFEU, usovaka@m.usfeu.ru; **V. G. Buryndin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the PPPT&PP department, USFEU, buryndinv@m.usfeu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 21.05.25.

Дата принятия рукописи в печать – 15.06.25.