

УДК 66.061.5:678.56.022.5

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЕ ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ НЕДРЕВЕСНОГО ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ

© *М.М. Ромашева, Е.Ю. Демьянцева**, Р.А. Смит, М.А. Селянкин, В.К. Дубовый

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, 198095, Россия, demyantseva@mail.ru

Обоснована перспективность использования лигноцеллюлозных отходов сельскохозяйственного производства – стеблей подсолнечника (*Helianthus annuus*), топинамбура (*Helianthus tuberosus*) и соломы пшеницы (*Triticum aestivum*) – в качестве альтернативного сырья для получения микрокристаллической целлюлозы (МКЦ). Показано, что недревесное сырье, характеризующееся более тонкой клеточной стенкой и пониженным содержанием лигнина по сравнению с древесиной, обеспечивает более легкую делигнификацию и высокую доступность целлюлозы для химической переработки. Предварительная щелочная экстракция с извлечением танинов и водорастворимых компонентов позволяет снизить расход надуксусной кислоты на побочные реакции и повысить селективность делигнификации. Сохранение высокой влажности целлюлозного материала (около 83%) на стадии подготовки предотвращает ороговение волокон и закрытие пор, что способствует улучшению морфологии порошкового продукта. Комбинированная обработка – щелочная экстракция, размол в одношнековом экструдере и кислотный гидролиз – позволяет целенаправленно регулировать степень полимеризации МКЦ в диапазоне 200–500 единиц и снижать жидкостный модуль процесса с 1 : 50 до 1 : 25 без существенного ухудшения качества конечного продукта. Предложенная схема глубокой переработки агропромышленных отходов, объединяющая выделение танинов и получение микрокристаллической целлюлозы, способствует локализации производства биополимера и повышает ресурсо- и энергоэффективность технологического цикла за счет рационального использования всех компонентов растительной биомассы.

Ключевые слова: микрокристаллическая целлюлоза, агропромышленные отходы, степень полимеризации, надуксусная кислота, щелочная экстракция, танины, ороговение волокон, жидкостный модуль.

Для цитирования: Ромашева М.М., Демьянцева Е.Ю., Смит Р.А., Селянкин М.А., Дубовый В.К. Ресурсосберегающее получение микрокристаллической целлюлозы из недревесного лигноцеллюлозного сырья // Химия растительного сырья. 2026. №2. С. 416–424. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260219238>.

Введение

Микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ) представляет собой порошковый продукт неполного кислотного гидролиза природной целлюлозы, характеризующийся степенью полимеризации (СП) 200–350 и кристаллическостью $\geq 55\%$ [1]. Эти структурные параметры обуславливают ее реологические, сорбционные и таблеткообразующие свойства, что определяет широкое применение в фармацевтике, пищевой и косметической промышленности, а также в производстве биоразлагаемых композиционных материалов [2, 3]. Мировой рынок МКЦ демонстрирует устойчивый рост (~10% год). Рост обусловлен тенденциями к использованию натуральных, экологичных и биodeградируемых материалов, а также усилением нормативной поддержки безопасных ингредиентов [4]. В период 2022–2023 годов емкость российского рынка микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) составила примерно 3700–4000 тонн в натуральном выражении [5, 6], наблюдается устойчивая положительная динамика спроса на микрокристаллическую целлюлозу, обусловленная ее универсальностью и широким спектром применения в различных отраслях промышленности, однако российская промышленность остается зависимой от импорта, что актуализирует задачу разработки отечественных технологий на доступном местном сырье [7].

Основным способом получения МКЦ является гидролиз неорганической кислотой беленой целлюлозы из хлопка или древесины хвойных пород. Недревесное сырье по сравнению с древесным сырьем

* Автор, с которым следует вести переписку.

обладает некоторыми особенностями: малотоннажностью, сильно выраженной сезонностью, разнообразным компонентным составом, поэтому возрос интерес к локальному производству микрокристаллической целлюлозы из многотоннажных отходов сельского хозяйства [3, 4]. Согласно официальным данным Росстата, в 2024 году в Российской Федерации собрано 82.6 млн тонн пшеницы и 16.5–17.25 млн тонн подсолнечника [8]. При этом в процессе выращивания на 1 тонну зерна пшеницы генерируется 1.25–5 тонн соломы, а на 1 тонну семян подсолнечника – 3–4 тонны стеблей, что подчеркивает значительный объем агропромышленных отходов как потенциального сырья для инновационных перерабатывающих технологий [9, 10]. Комплексная переработка таких отходов не только усиливает рентабельность производства, но и способствует диверсификации малого и среднего бизнеса за счет вторичных продуктов. Предлагаемый подход обеспечивает не только решение задачи локализации производственных мощностей, но и эффективную утилизацию отходов материалов посредством их конверсии в высокотехнологичные продукты с существенной добавленной стоимостью.

Аграрный сектор обладает уникальными возможностями для реализации замкнутых циклов переработки благодаря доступности растительных отходов с высокой скоростью ежегодного возобновления, интенсивной урожайностью и низкими затратами на производство. Агропромышленные отходы (солома злаковых, стебли масличных культур) обладают рядом преимуществ: ежегодным возобновлением, сниженным содержанием лигнина (10–20% против 25–35% у древесины), высокой доступностью целлюлозы [11]. Однако их переработка осложнена присутствием экстрактивных веществ, кремнийсодержащих компонентов и структурной неоднородностью клеточных стенок. Предварительная обработка, направленная на удаление низкомолекулярных примесей и целенаправленную деструкцию аморфных областей, является ключевым этапом, определяющим селективность делигнификации и конечную степень полимеризации продукта [12].

Особый интерес представляет влияние водосодержания целлюлозного полуфабриката на стадии подготовки к гидролизу. Сушка до абсолютно сухого состояния приводит к необратимому ороговению волокон – сжатию пор, образованию дополнительных водородных связей и снижению доступности целлюлозы для реагентов [13]. Сохранение высокой влажности может препятствовать этому процессу, однако количественные закономерности влияния остаточной влаги на кинетику гидролиза надуксусной кислотой и морфологию МКЦ из недревесного сырья изучены недостаточно.

Цель работы – разработка технологически реализуемой комбинированной схемы переработки стеблей подсолнечника, топинамбура и соломы пшеницы в МКЦ с заданной степенью полимеризации, а также установление влияния щелочной экстракции, механического размола и исходной влажности полуфабриката на качество продукта и расход реагентов.

Экспериментальная часть

Объектом исследования являлись стебли подсолнечника (*Helianthus annuus*) и топинамбура (*Helianthus tuberosus*), выращенные в Ленинградской области и собранные в сентябре. В качестве референсного материала использовали солому пшеницы (*Triticum aestivum*), собранную в Северо-Западном регионе России в 2024 г., как типичный многотоннажный сельскохозяйственный отход. Стебли *Helianthus spp.*, относящиеся к двудольным растениям, характеризуются прямым цилиндрическим строением высотой 2–3 м с центральным паренхиматозным цилиндром (рис. 1). Механические ткани представлены колленхимой, склеранхимой и мощной паренхимой. Паренхима сердцевин (2) содержит до 90% α -целлюлозы в комплексе с моносахаридами (глюкоза, фруктоза, манноза, галактоза), а камбий и первичная кора (1) обогащены лигнином и целлюлозой [14]. Пористая структура паренхимы (рис. 1б) способствует сорбции тяжелых металлов, но усложняет переработку из-за низкой плотности.

В отличие от *Heliantus*, солома пшеницы как однодольного растения имеет тонкий полый стебель высотой до 1 м без камбия и выраженной сердцевин; механические ткани представлены склеранхимой и лубяными волокнами, проводящие элементы – открытыми коллатеральными пучками.

Компонентный состав сырья определяли по стандартным методикам: влажность ГОСТ 16932; массовая доля веществ, растворимых в горячей воде; массовая доля лигнина по методу Комарова, массовая доля целлюлозы по методу Кюршнера определены согласно стандартным методикам [15]. Микроскопический анализ поперечного среза был проведен световым (оптическим) микроскопом МДК-2 при приближении $\times 150$.

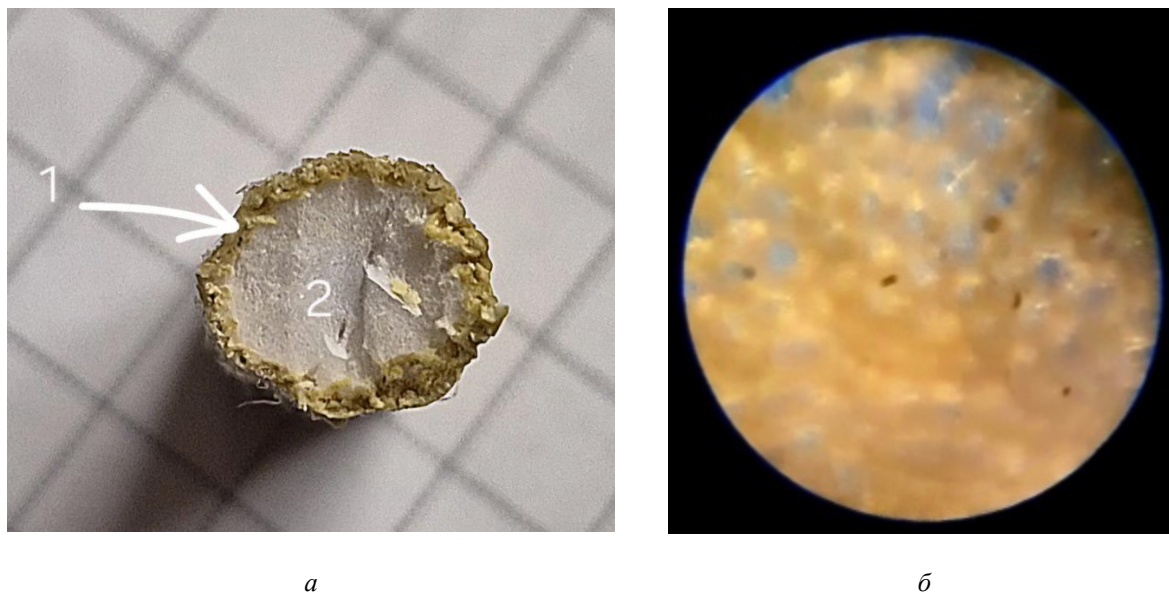


Рис. 1. Внешний вид стебля *Helianthus*: а – поперечный срез стебля *Helianthus* без приближения; б – сердцевина топинамбура при приближении $\times 150$ под микроскопом

Предварительная обработка лигноцеллюлозного материала была проведена щелочной экстракцией растворами NaOH (0; 5; 10 % мас.) при 100 °С в течение 60 мин при гидромодуле 1 : 20. После обработки массу фильтровали, промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции. В фильтрах определяли содержание конденсированных и неконденсированных танинов титриметрическим и гравиметрическим методами соответственно [15]. Анализ полученной целлюлозы проводили по следующим методикам: определение степени делигнификации согласно ГОСТ 10070-74, определение выхода – ГОСТ Р 56847-2015 [16]. Растворы после предварительной обработки были проанализированы на содержание неконденсированных танинов титриметрическим методом, конденсированных танинов гравиметрией – как возможных целевых компонентов из отработанных растворов [15]. Влажный целлюлозный материал (влажность ~83%) подвергали размолу в лабораторном одношнековом экструдере (диаметр шнека – 20 мм, частота вращения – 60 об./мин, температура зоны – 80–90 °С) для обеспечения разволокнения и гомогенизации структуры.

Гидролизированные продукты из волокнистых лигноцеллюлозных материалов были получены обработкой надуксусной кислотой при температуре 100 °С в течение 60 мин [17]. Исследовали два гидромодуля: 1 : 50 (контроль) и 1 : 25 (оптимизированный). После гидролиза суспензию нейтрализовали 5% раствором NaHCO_3 , промывали водой до pH 6.5–7.0, сушили при 40 °С до постоянной массы и просеивали через сито 0.2 мм.

Степень полимеризации определяли вискозиметрически в кадоксене при 25 °С по ГОСТ ISO 5351 [18]. Число Каппа – по ГОСТ 10070. Кристалличность оценивали методом ИК-спектроскопии методом ИК-Фурье спектроскопии по величине отношения интенсивности полосы поглощения при 710 см^{-1} (деформационные колебания СН-групп) к интенсивности поглощения при 2965 см^{-1} (валентные колебания СН-групп). Полосу поглощения при 2965 см^{-1} использовали в качестве внутреннего стандарта, так как она не зависит от кристалличности целлюлозы [19]. Морфологию частиц изучали на оптическом микроскопе МДК-2 (увеличение $\times 150$). Все эксперименты повторяли трижды; результаты приведены как среднее значение \pm стандартное отклонение. Статистическую значимость различий оценивали методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA, $p < 0.05$).

Результаты и обсуждение

Компонентный состав исследованных образцов растительного сырья представлен на рисунках 2 и 3.

Содержание целлюлозы в соломе, определенное по методу Кюршнера, составляет величину, сопоставимую с показателями для листовых пород древесины [20]. Это указывает на высокую потенциальную ценность соломы как источника целлюлозы для последующей химической или биохимической переработки. Доля водорастворимых веществ не превышает 10%, что свидетельствует о низком содержании легкоизвлекаемых компонентов, таких как сахара, органические кислоты и некоторые экстрактивные вещества. В то

же время отмечено существенное накопление кремния, что характерно для злаковых культур и обусловлено биогенным осаждением силикатов в клеточных стенках. Высокое содержание кремния создает дополнительные трудности при делигнификации и механической обработке, поэтому требует предварительной обработки сырья (например, кислотной или щелочной промывки) с целью его удаления и предотвращения образования силикатных отложений в цикле производства. Содержание α -целлюлозы в соломе пшеницы составило $41.2 \pm 0.8\%$, в стеблях топинамбура – $38.7 \pm 1.1\%$, подсолнечника – $40.3 \pm 0.9\%$. Доля лигнина варьировала от 24 до 29%, что соответствует данным для растений рода *Helianthus* и обусловлено морфологическими особенностями строения растения и климатом места произрастания [21].

Подсолнечник и топинамбур относятся к одному виду, что объясняет их близость по химическому составу и идентичность морфологического строения (рис. 1, 3). Оба вида характеризуются схожим соотношением основных компонентов: целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина, что делает их сопоставимыми в качестве сырья для биорефайнинга. Несмотря на химическую и морфологическую схожесть, стебли подсолнечника характеризуются большей диаметральной величиной по сравнению с топинамбуром, что, вероятно, обусловлено селекционными приемами, направленными на формирование более мощного стебля и повышение урожайности. Увеличение диаметра стебля может оказывать влияние на эффективность измельчения и проникновение реагентов при делигнификации, что требует корректировки технологических режимов при переработке. Стебли *Helianthus spp.* обладают выраженной паренхимной сердцевиной (до 90% полисахаридов в комплексе с моносахаридами) и плотной склеренхимной коркой, что обуславливает необходимость механической активации после щелочной обработки.

Содержание легко- и трудногидролизуемых веществ соответствует осеннему периоду вегетации, когда преобладающая часть метаболитов направлена на подготовку растения к зимнему периоду, включая накопление запасных и структурных полисахаридов. В этот период наблюдается максимальное накопление полимерных углеводов в стеблях, что делает осенний урожай наиболее перспективным для целлюлозно-сахарного направления переработки. Полученные данные позволяют рассматривать стебли подсолнечника и топинамбура как альтернативное сырье для производства продуктов биорефайнинга, при этом выбор между ними должен учитывать не только химический состав, но и морфологические особенности, а также энергозатраты на предварительную обработку. Для удаления сахаров, водорастворимых веществ, а также размягчения растительного материала была проведена предварительная экстракция. Данный этап позволяет извлечь водорастворимые компоненты, включая моно- и дисахариды (в первую очередь глюкозу), органические кислоты, а также фенольные соединения, к которым относятся танины.

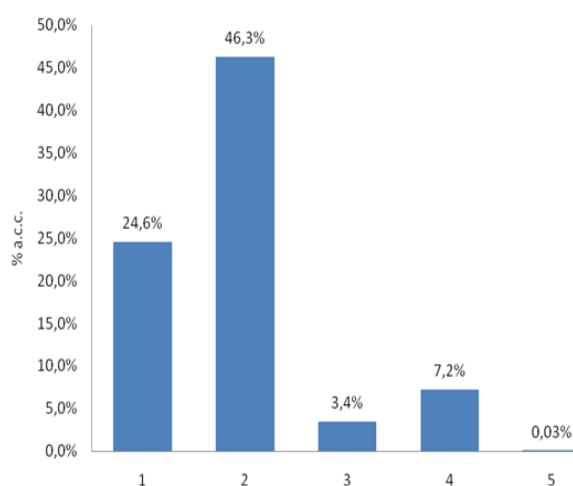


Рис. 2. Компонентный состав соломы пшеницы: 1 – Лигнин по методу Комарова; 2 – целлюлоза по Кюршнеру; 3 – легкогидролизуемые вещества; 4 – трудногидролизуемые вещества; 5 – кремний

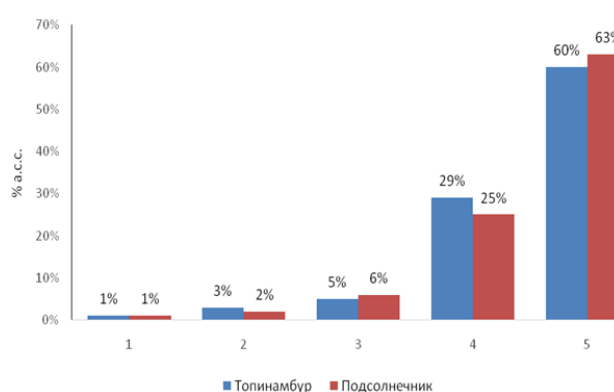


Рис. 3. Компонентный состав топинамбура и подсолнечника: 1 – эфирорастворимые вещества; 2 – легкогидролизуемые вещества; 3 – трудногидролизуемые вещества; 4 – лигнин по методу Комарова; 5 – целлюлоза по методу Кюршнера

Танины представляют интерес как целевые компоненты – биологически активные вещества, потенциально пригодные для использования в фармацевтической, косметической, пищевой промышленности и получения на их основе бесфенольного клея. Их извлечение на стадии предварительной экстракции позволяет не только повысить чистоту последующих продуктов переработки (например, микрокристаллической целлюлозы), но и обеспечить комплексное использование растительного сырья. Результаты представлены на рисунке 4.

Как следует из рисунка 4, с увеличением щелочности обрабатываемого раствора возрастает выход конденсированных танинов, что обусловлено частичной деструкцией лигнина и его переходом в растворимую форму. Соответственно, это приводит к снижению остаточного содержания лигнина в целлюлозном материале, что подтверждается прямыми аналитическими данными. При этом содержание неконденсированных танинов в экстракте остается практически неизменным, что указывает на их более устойчивую структуру в данных условиях обработки.

Твердая корка стебля *Helianthus* препятствует эффективному размягчению и разволокнению материала после щелочной обработки, что, в свою очередь, затрудняет проникновение гидролизующего агента вглубь клеточных стенок. Для обеспечения однородности целлюлозного материала была применена механическая обработка – размол горячей массы в лабораторном одношнековом экструдере. После размола проведена оценка остаточного содержания лигнина в материале. Установлено, что с ростом концентрации щелочи в обрабатываемом растворе остаточный лигнин снижается с 25 до 17% (на абсолютно сухое сырье), что свидетельствует о высокой эффективности щелочной предобработки в сочетании с механическим размолом.

Однако при обработке соломы пшеничных культур наблюдается выраженная деструкция и размягчение материала даже при использовании только воды, что указывает на относительно высокую доступность полимерных компонентов клеточных стенок и их склонность к гидролизу в мягких условиях. В этих условиях в водную фазу переходят значительные количества водорастворимых фенольных соединений, включая танины, что подтверждается данными по выходу веществ (рис. 5).

Как следует из рисунка 5, с увеличением концентрации щелочи в экстрагенте (от 0 до 10%) происходит резкое возрастание выхода конденсированных танинов – с 3,4 до 43%. Это связано с щелочным расщеплением сложноэфирных и эфирных связей, удерживающих фенольные полимеры в лигноцеллюлозной матрице [7]. При этом выход неконденсированных танинов также возрастает, но в меньшей степени – с 1 до 5,9%, что свидетельствует о различной устойчивости этих классов соединений к щелочной обработке. Параллельно наблюдается снижение содержания лигнина, что подтверждает эффективную селективную делигнификацию. Извлечение танинов на ранней стадии снижает расход надуксусной кислоты на окисление экстрактивных веществ на 18–24%, повышая экономичность процесса. Полученные закономерности подтверждают перспективность щелочной экстракции для направленного извлечения танинов из соломы пшеничных как целевого компонента, пригодного для дальнейшего использования.

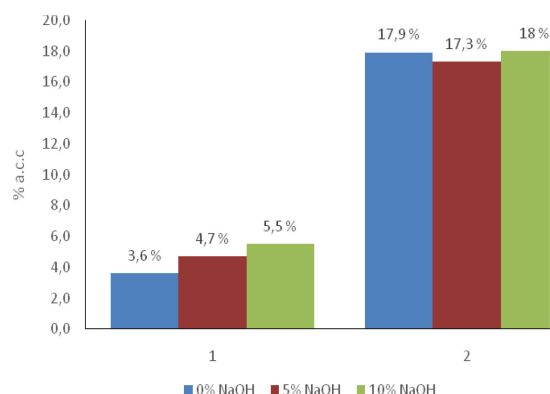


Рис. 4. Содержание танинов в растворе при обработке *Helianthus spp.*: 1 – конденсированных; 2 – неконденсированных

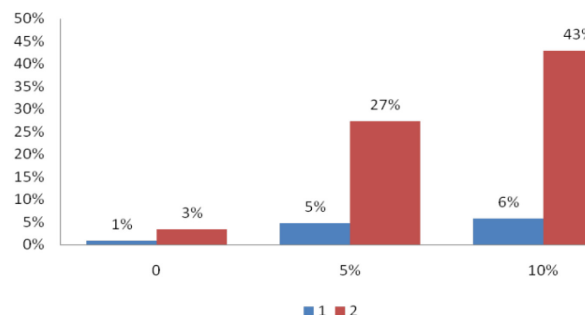


Рис. 5. Выход танинов в зависимости от содержания щелочи в экстрагенте: 1 – танины неконденсированные, % а.с.с.; 2 – танины конденсированные, % а.с.с.

Целлюлозный материал из *Helianthus*, предназначенный для гидролиза с последующим получением микрокристаллической целлюлозы (МКЦ), сохранявший влажность ~83% на стадии подготовки, не подвергался необратимому ороговению. Вода выступала в роли пластификатора, поддерживая рыхлость надмолекулярной структуры и предотвращая коллапс пор при механическом воздействии [22]. При гидролизе такого материала без предварительной обработки СП составила 500 ± 12 . После водной экстракции и размола в экструдере СП снизилась до 460 ± 9 за счет увеличения удельной поверхности и частичного раскрытия аморфных областей.

Наиболее значительное снижение до 360 ± 8 достигнуто при использовании щелочной экстракции (5–10% NaOH). Снижение жидкостного модуля с 1 : 50 до 1 : 25 для влажного образца целлюлозного материала, предварительно обработанного 10% раствором NaOH с последующим размолем в экструдере, позволило получить МКЦ с СП 220 ± 10 , что полностью соответствует фармакопейным требованиям (ГФ РФ XV, ОФС 1.4.1.0028.18) [23]. При этом выход порошкового продукта снизился незначительно (на 4.2%), а морфология частиц осталась однородной (размер 20–150 мкм). Для образца, обработанного 5% NaOH, снижение модуля до 1 : 25 привело к неполной делигнификации (СП 350 ± 11 , желтоватый оттенок, остаточный лигнин 0.8%), что указывает на необходимость баланса между глубиной щелочной обработки и интенсивностью гидролиза.

Качество целлюлозного полуфабриката из соломы злаковых культур закономерно улучшалось с ростом концентрации щелочи в обрабатываемом растворе. Полученные образцы МКЦ по степени полимеризации близки к продуктам из биомассы топинамбура и подсолнечника. При этом использование влажного целлюлозного материала позволило снизить жидкостный модуль при гидролизе с 1 : 50 до 1 : 25 без существенных изменений в степени полимеризации МКЦ, что указывает на повышение эффективности процесса.

На рисунке 6 представлена зависимость выхода порошкового продукта от концентрации водно-щелочного раствора при предварительной экстракции сырья. Анализ данных показывает, что повышение концентрации щелочи улучшает качественные показатели волокнистого полуфабриката (степень очистки, однородность структуры), однако сопровождается закономерным снижением выхода гидролизованного продукта вследствие частичного разрушения целлюлозы и потерь при щелочной обработке.

Таким образом, стебли подсолнечника и топинамбура показали близкие результаты по СП и выходу МКЦ (34.5–36.2% от а.с.с.), что обусловлено сходным химическим составом и морфологией. Солома пшеницы обеспечила более низкий выход ($29.8 \pm 1.3\%$) из-за потерь при удалении кремния и экстрактивных веществ, однако качество МКЦ оказалось сопоставимым. Следовательно, при выборе сырья необходимо учитывать не только химический состав, но и логистическую доступность, сезонность и энергозатраты на предварительную подготовку.

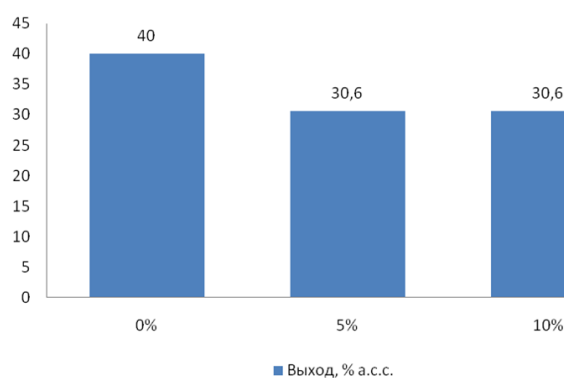


Рис. 6. Выход порошкового материала в зависимости от концентрации щелочи при предварительной обработке исходного сырья

Заключение

Предварительная щелочная экстракция (5–10% NaOH, 100 °С, 60 мин) эффективно удаляет конденсированные танины и водорастворимые компоненты, снижая расход надуксусной кислоты на побочные реакции на 18–24% и повышая селективность делигнификации недревесного растительного сырья.

Сохранение высокой влажности целлюлозного полуфабриката (~83%) предотвращает ороговение волокон, сохраняет рыхлую надмолекулярную структуру и повышает доступность аморфных областей для гидролиза.

Комбинированная обработка (щелочная экстракция, размол в одношнековом экструдере, гидролиз надуксусной кислотой) при жидкостном модуле 1 : 25 позволяет целенаправленно регулировать степень полимеризации МКЦ в диапазоне 220–340 единиц, что соответствует требованиям ГФ РФ.

Снижение гидромодуля с 1 : 50 до 1 : 25 при использовании влажного материала сокращает расход воды и реагентов на 30–35%, улучшая ресурсо- и энергоэффективность процесса без ухудшения морфологических характеристик продукта.

Комплексная переработка агропромышленных отходов с выделением танинов и получением МКЦ представляет собой перспективное направление для локализации производства биоматериалов и развития замкнутых циклов в аграрном секторе.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы предоставите соответствующие ссылки на автора(ов), источник и Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Пименов С.Д. Получение и модификация микрокристаллической целлюлозы: дис. ... канд. хим. наук. СПб, 2023. 145 с.
2. Аутлов С.А., Базарнова Н.Г., Кушнир Е.Ю. Микрокристаллическая целлюлоза: структура, свойства и области применения (обзор) // Химия растительного сырья. 2013. №3. С. 33–41.
3. Гришанин В.С., Вайнштейн В.А. Сравнительное изучение возможности применения микрокристаллической целлюлозы, полученной методом газофазного гидролиза, в технологии таблеток // Молодой учёный. 2021. №12. С. 48–51.
4. Кулматов К.А. и др. Получение микрокристаллической целлюлозы из местного сырья // Universum: Технические науки. 2022. №8(101). С. 14–19.
5. Рынок микрокристаллической целлюлозы в России [Электронный ресурс]. URL: <https://prcs.ru/analytics-article/rynok-mikrokristallicheskoj-cellyulozy/>.
6. Анализ рынка микрокристаллической целлюлозы в России [Электронный ресурс]. URL: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Otchet_DEMO_Analiz_rynka_mikrokristallicheskoj_tsellyulozy_v_Rossii-22.pdf.
7. Shatalov A.A., Pereira H. Kinetics of polysaccharide and lignin degradation during hydrothermal treatment of Helianthus stalks // Bioresource Technology. 2021. Vol. 335. 125289. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125289>.
8. Росстат. Итоговые данные по уборке урожая сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2024 году. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/>
9. Рахимов М.М., Ниязмухамедова М.Б. Распределение сухого вещества по органам пшеницы в процессе вегетации в разных абиотических условиях // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук. 2019. №1(204). С. 44–51.
10. Авдеев А.П. Продуктивность озимой пшеницы в зависимости от нормы посева и обработки биопрепаратами в условиях ростовской области // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. №10 (41). С. 12–14. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.41.009>.
11. Цуканов С.Н., Будаева В.В. Гидротермобарический способ получения целлюлозы из отходов злаков // Химия растительного сырья. 2011. №4. С. 147–152.
12. Zhang X. et al. Alkaline pretreatment for enhanced delignification and enzymatic hydrolysis of agricultural residues // Industrial Crops and Products. 2022. Vol. 185. 115132. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115132>.
13. Maloney T.C., Paulapuro H. The formation of pores in dried cellulose fibers // Journal of Pulp and Paper Science. 1999. Vol. 25, no. 12. Pp. 430–436.
14. Шайхиев И.Г., Садыкова В.П. Использование биомассы топинамбура в качестве сорбционного материала ионов тяжёлых металлов из водных сред // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды – фундаментальные и прикладные исследования: сборник докладов Всероссийской научной конференции. Белгород, 2020. 6 с.
15. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М., 1991. 320 с.

16. ГОСТ Р 56847-2015. Целлюлоза дисперсная. Метод определения выхода. М., 2016.
17. Кушнир Е.Ю., Гаврилина Н.Б., Абрамович М.А. и др. Получение микрокристаллической целлюлозы непосредственно из древесины под воздействием микроволнового нагрева // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2014. №235. С. 80–86.
18. ГОСТ ISO 5351. Целлюлоза. Определение предельной вязкостной степени полимеризации в кадоксене. М., 2018.
19. Ешбаева У.Ж., Джалилов А.А. ИК-спектроскопические исследования свойств бумаг со связующими полимерами // *Universum: технические науки*. 2022. №1 (94).
20. Шерстобитов А.Л., Вураско А.В., Агеев М.А. Использование целлюлозы из соломы пшеницы в технологии гофрированного картона // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : материалы XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции. Екатеринбург, 2022. С. 740–745.
21. Ziebell A.L. et al. Sunflower as a biofuels crop: An analysis of lignocellulosic chemical properties // *Biomass and Bioenergy*. 2013. Vol. 59. Pp. 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.06.009>.
22. Евдокимов М.Ю., Сыроватка В.И. Водопоглощение и разбухание древесины *Betula pendula* ROTH, модифицированной олигомерами из побочных продуктов производства полибутадиена // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2016. №5. С. 3–14.
23. Государственная фармакопея Российской Федерации XV изд. М., 2023.

Поступила в редакцию 14 апреля 2026г.

После переработки 22 апреля 2026 г.

Принята к публикации 4 июня 2026 г.

Romasheva M.M., Demyantseva E.Yu. , Smith R.A., Selyankin M.A., Dubovoy V.K.* RESOURCE-SAVING PRODUCTION OF MICROCRYSTALLINE CELLULOSE FROM NON-WOOD LIGNOCELLULOSIC RAW MATERIALS

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy, st. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russia, demyantseva@mail.ru

This study substantiates the feasibility of utilizing lignocellulosic agricultural waste – sunflower stalks (*Helianthus annuus*), Jerusalem artichoke stalks (*Helianthus tuberosus*), and wheat straw (*Triticum aestivum*) – as an alternative feedstock for microcrystalline cellulose (MCC) production. It is demonstrated that non-wood biomass, characterized by thinner cell walls and lower lignin content compared to wood, enables more efficient delignification and higher cellulose accessibility for chemical processing. Preliminary alkaline extraction with the recovery of tannins and water-soluble compounds reduces peracetic acid consumption in side reactions and enhances delignification selectivity. Maintaining a high moisture content (~83%) in the cellulose material during the preparation stage prevents fiber hornification and pore collapse, thereby improving the morphology of the final powder. The combined treatment - alkaline extraction, single-screw extruder refining, and acid hydrolysis – allows targeted control of the MCC degree of polymerization within the range of 200–500 units and reduces the liquid-to-solid ratio from 1 : 50 to 1 : 25 without significantly compromising product quality. The proposed integrated processing scheme for agro-industrial waste, which combines tannin recovery and MCC production, promotes the localization of biopolymer manufacturing and enhances the resource and energy efficiency of the technological cycle through the comprehensive utilization of all plant biomass components.

Keywords: microcrystalline cellulose, agricultural waste, degree of polymerization, peracetic acid, alkaline extraction, tannins, fiber hornification, solid-to-liquid ratio.

For citing: Romasheva M.M., Demyantseva E.Yu., Smith R.A., Selyankin M.A., Dubovoy V.K. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 2, pp. 416–424. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260219238>.

References

1. Pimenov S.D. *Polucheniye i modifikatsiya mikrokrystallicheskoj tsellyulozy: dis. ... kand. khim. nauk*. [Production and modification of microcrystalline cellulose: dis. ... Cand. of Chemical Sciences]. St. Petersburg, 2023, 145 p. (in Russ.).
2. Autlov S.A., Bazarnova N.G., Kushnir Ye.Yu. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2013, no. 3, pp. 33–41. (in Russ.).
3. Grishanin V.S., Vaynshteyn V.A. *Molodoy uchonyy*, 2021, no. 12, pp. 48–51. (in Russ.).
4. Kulmatov K.A. i dr. *Universum: Tekhnicheskiye nauki*, 2022, no. 8(101), pp. 14–19. (in Russ.).
5. *Rynok mikrokrystallicheskoj tsellyulozy v Rossii* [The microcrystalline cellulose market in Russia]. URL: <https://prcs.ru/analytics-article/rynok-mikrokrystallicheskoj-cellyulozy/>. (in Russ.).

* Corresponding author.

6. *Analiz rynka mikrokrystallicheskoj tsellyulozy v Rossii* [Analysis of the microcrystalline cellulose market in Russia]. URL: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Otchet_DEMO_Analiz_rynka_mikrokrystallicheskoj_tsellyulozy_v_Rossii-22.pdf. (in Russ.).
7. Shatalov A.A., Pereira H. *Bioresource Technology*, 2021, vol. 335, 125289. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125289>.
8. *Rosstat. Itogovyye dannyye po uborke urozhasya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v Rossiyskoy Federatsii v 2024 godu*. [Rosstat. Final data on the harvest of agricultural crops in the Russian Federation in 2024]. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (in Russ.).
9. Rakhimov M.M., Niyazmukhamedova M.B. *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadjikistan. Otdeleniye biologicheskikh i meditsinskikh nauk*, 2019, no. 1(204), pp. 44–51. (in Russ.).
10. Avdeyenko A.P. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2015, no. 10 (41), pp. 12–14. <https://doi.org/10.18454/IRJ.2015.41.009>. (in Russ.).
11. Tsukanov S.N., Budayeva V.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2011, no. 4, pp. 147–152. (in Russ.).
12. Zhang X. et al. *Industrial Crops and Products*, 2022, vol. 185, 115132. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115132>.
13. Maloney T.C., Paulapuro H. *Journal of Pulp and Paper Science*, 1999, vol. 25, no. 12, pp. 430–436.
14. Shaykhiyev I.G., Sadykova V.P. *Bezopasnost', zashchita i okhrana okruzhayushchey prirodnoy sredy – fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya: sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii*. [Safety, protection and conservation of the natural environment – fundamental and applied research: collection of reports of the All-Russian scientific conference]. Belgorod, 2020, 6 p. (in Russ.).
15. Obolenskaya A.V., Yel'nitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratornyye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy*. [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose]. Moscow, 1991, 320 p. (in Russ.).
16. *GOST R 56847-2015. Tsellyuloza dispersnaya. Metod opredeleniya vykhoda*. [GOST R 56847-2015. Dispersed cellulose. Method for determining yield]. Moscow, 2016. (in Russ.).
17. Kushnir Ye.Yu., Gavrilina N.B., Abramovich M.A. i dr. *Trudy BGTU. Ser. 2, Khimicheskiye tekhnologii, biotekhnologii, geokologiya*, 2014, no. 235, pp. 80–86. (in Russ.).
18. *GOST ISO 5351. Tsellyuloza. Opredeleniye predel'noy vyazkostnoy stepeni polimerizatsii v kadoksene*. [GOST ISO 5351. Cellulose. Determination of the limiting viscosity degree of polymerization in cadoxene]. Moscow, 2018. (in Russ.).
19. Eshbayeva U.Zh., Dzhililov A.A. *Universum: tekhnicheskiye nauki*, 2022, no. 1 (94). (in Russ.).
20. Sherstobitov A.L., Vurasco A.V., Ageev M.A. *Nauchnoye tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii : materialy XVIII Vse-rossiyskoy (natsional'noy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. [Scientific creativity of youth to the Russian forest complex : proceedings of the XVIII All-Russian (national) Scientific and Technical Conference]. Ekaterinburg, 2022, pp. 740–745. (in Russ.).
21. Ziebell A.L. et al. *Biomass and Bioenergy*, 2013, vol. 59, pp. 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.06.009>.
22. Yevdokimov M.Yu., Syrovatka V.I. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Yestestvennyye nauki»*, 2016, no. 5, pp. 3–14. (in Russ.).
23. *Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii XV izdaniya*. [State Pharmacopoeia of the Russian Federation, 15th edition]. Moscow, 2023. (in Russ.).

Received April 14, 2026

Revised April 22, 2026

Accepted June 4, 2026

Сведения об авторах

Ромашева Маргарита Максимовна – аспирант,
rita.romasheva@gmail.com

Демьянцева Елена Юрьевна – кандидат химических наук, доцент, demyantseva@mail.ru

Смит Регина Анатольевна – кандидат химических наук, доцент, zz1234567@yandex.ru

Селянкин Михаил Алексеевич – студент,
m.seliankin@gmail.com

Дубовый Владимир Климентьевич – доктор технических наук, профессор, dubovy2004@mail.ru

Information about authors

Romasheva Margarita Maksimovna – Postgraduate Student,
rita.romasheva@gmail.com

Demyantseva Elena Yurievna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, demyantseva@mail.ru

Smith Regina Anatolyevna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, zz1234567@yandex.ru

Selyankin Mikhail Alekseevich – Student,
m.seliankin@gmail.com

Dubovy Vladimir Klimentievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, dubovy2004@mail.ru