

УДК 66.061, 665.662.3, 676.0, 677.11, 66.061, 631.57, 633.8

DOI: 10.15372/KhUR2024576

EDN: YJJSYD

Экстракционные технологии переработки отходов лесной промышленности и растениеводства (обзор)

Е. А. АВДЕЕНКО¹, К. А. НАДЕИНА¹, Ю. В. ВАТУТИНА¹, А. В. САЙКО¹, П. А. ЗАЙКИН¹, А. И. ШАМСУЛЛИН²,
Н. М. ШИГАПОВ², А. С. МИННИБАЕВ²

¹Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН,
Новосибирск, Россия

E-mail: avdeenko@nioch.nsc.ru

²НПО ТН-Биотех,
Альметьевск, Россия

(Поступила 02.06.2024; после доработки 15.07.2024; принята к печати 22.07.2024)

Аннотация

Несмотря на увеличение вклада комплексных подходов к переработке отходов лесной промышленности и растениеводства, основным способом утилизации отходов растительного сырья до сих пор является сжигание, что приводит к потерям ценных веществ. Альтернативным и прогрессивным способом переработки растительных отходов выступает экстракция с получением полезных веществ. В работе обобщены ранее опубликованные данные по экстракционным способам извлечения ценных веществ из древесных отходов и соломы различных культур в промышленных и лабораторных условиях. Систематизированы данные по химическому составу отходов лесной промышленности и растениеводства, а также содержанию химических соединений, имеющих потенциальную практическую ценность. Описаны основные подходы к извлечению из отходов растительного сырья таких ценных компонентов, как лигнин, фурфурол, воски, органические кислоты, полифенолы, красители, диоксид кремния и другие ценные вещества.

Ключевые слова: экстракция, переработка отходов, древесное сырье, солома, лигнин

Оглавление

Введение	458
Содержание ценных соединений в отходах лесной промышленности и растениеводства	459
Получение целлюлозы	462
Получение лигнина	462
Получение растительных восков	463
Получение других ценных продуктов	463
Заключение	465
Список литературы	465

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России ежегодно образуется большой объем отходов древесного сырья и соломы различных культур [1]. И хотя

часть отходов растительного сырья применяется в производстве разного вида строительных материалов [2], топливных брикетов или в качестве корма и подстилки для скота в животноводстве, большая часть отходов выбрасывается

без дальнейшего использования [3]. Несмотря на увеличение вклада различных комплексных подходов переработки отходов, основным способом утилизации отходов растительного сырья до сих пор является сжигание, что приводит к потерям ценных продуктов.

В качестве альтернативного и прогрессивного способа переработки древесных отходов и соломы различных культур для получения полезных веществ в последнее время рассматривается экстракция. Растительное сырье содержит целлюлозу, гемицеллюлозные фракции, лигнин [4, 5], кремнезем, пентозаны, воск и другие соединения, которые далее могут быть использованы в различных областях фармацевтики, медицины и химической промышленности. Применение экстракции в переработке древесного сырья привлекает внимание специалистов возможностью выделения ценных компонентов, как правило, обладающих биологической активностью. В качестве сырьевой базы используют древесную зелень, кору или реже корни деревьев лиственных или хвойных пород. Работы, касающиеся применения экстракционных методов в переработке соломы, в основном направлены на делигнификацию последней с целью получения целлюлозы для производства материалов на ее основе, либо для ее дальнейшего гидролиза с получением сахаров или их производных.

Процесс извлечения полезных веществ из древесных отходов и соломы обычно включает в себя подготовку сырья, проведение самой экстракции, отделение экстракта от экстрагента и удаление неизвлекаемых веществ. Наиболее простые и хорошо известные способы экстракции – процесс с использованием экстрактора Сокслета, экстракция сверхкритическим CO_2 , перколяция и мацерация [6]. Степень извлечения и компонентный состав полученного раствора во многом определяется выбором используемого экстрагента.

Переработка отходов древесины и соломы методом экстракции с получением максимально возможного количества полезных компонентов для их дальнейшего использования в различных областях актуальна в связи с возможностью увеличения энергоэффективности производств, а также снижения выбросов в атмосферу, вызванных, с одной стороны, масштабным сжиганием соломенных культур, а с другой – добычей и использованием нефтепродуктов.

Цель настоящей работы – обзор научной и патентной литературы, включающий варианты выделения экстракционными методами ценных органических и неорганических соединений из

отходов лесной промышленности и отходов растениеводства.

СОДЕРЖАНИЕ ЦЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ОТХОДАХ ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И РАСТЕНИЕВОДСТВА

К отходам производства в лесной и деревообрабатывающей промышленности относят куковые и мягкие отходы лесопиления и деревообработки, мебельного и фанерного производства, шпалопиления и др. Кора, сучья, ветви, вершины, древесная зелень, пни и корни также считаются отходами [7].

Химический состав древесины представлен в виде схемы на рис. 1 [8]. Остаток после сжигания древесины обычно не превышает 1 мас. %. По химическому составу зола представляет собой смесь различных солей и подразделяется на две части: растворимую в воде (соли Na^+ , K^+) и нерастворимую (соли Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} и др.). Основную массу древесного вещества составляют органические компоненты, которые, в свою очередь, подразделяются на структурные и экстрактивные. Углеводная часть структурных компонентов содержит комплекс полисахаридов и называется холоцеллюлозой, ее массовая доля – 70–80 %. В состав холоцеллюлозы входят целлюлоза и гемицеллюлозы, при этом содержание целлюлозы – 40–50 %. Гемицеллюлозы – это полисахариды, макромолекулы которых построены из остатков различных моносахаридов (пентоз и гексоз). Содержание гемицеллюлоз в древесине – 20–30 мас. %. Пентозаны в древесине представлены ксиланами (глюкуроноксилан, арабиноглюкуроноксилан), гексозаны – в основном маннанами (глюкоманнан, галактоглюкоманнан). Ароматическая часть древесины (лигнин) характеризуется смесью полимеров родственного строения фенольной природы, макромолекулы которых построены из мономерных звеньев, называемых фенилпропановыми структурными единицами. В древесине структурные компоненты тесно связаны между собой связями различного типа, что в значительной степени затрудняет их разделение и выделение в чистом виде. Экстрактивными веществами называют соединения, которые можно извлекать из древесины нейтральными полярными и неполярными растворителями. Содержание экстрактивных веществ в древесине обычно составляет 3–5 мас. % [8], однако для некоторых пород деревьев это значение может быть значительно выше. Несмотря на малую массовую долю, экс-

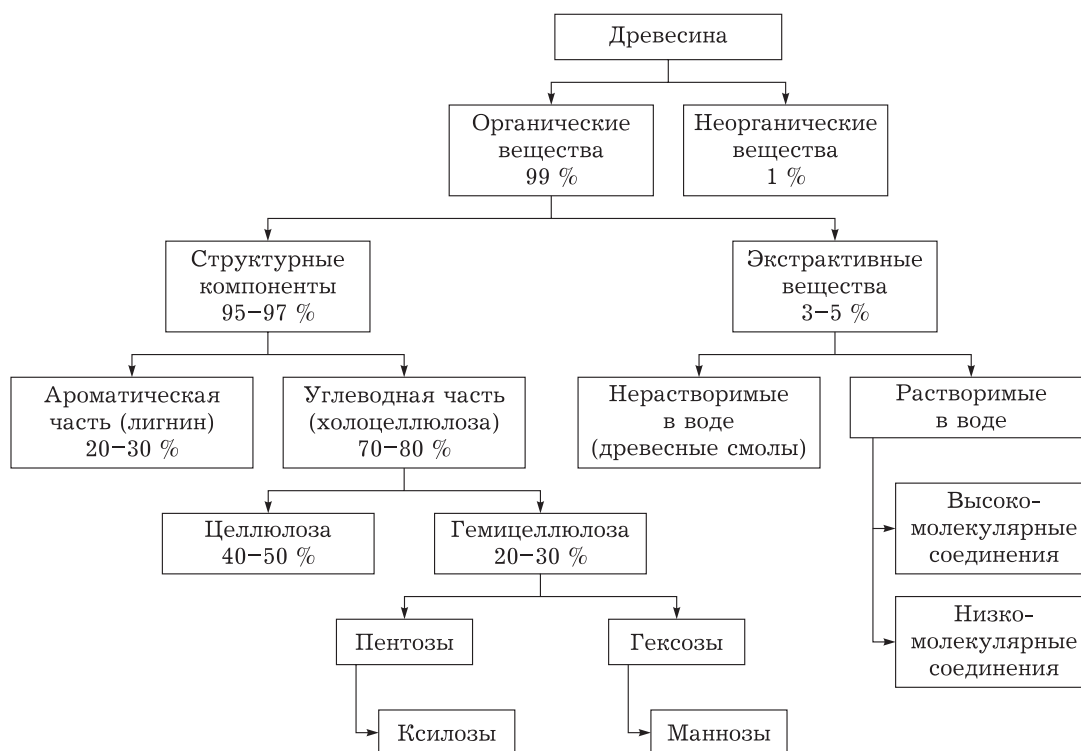


Рис. 1. Химический состав древесины. Информация адаптирована из [8].

трактивные вещества весьма разнообразны по химическому составу и, за исключением водорастворимых полисахаридов, представляют собой низкомолекулярные соединения: органические кислоты, полифенолы, флавоноиды, красители и др. По методу выделения их подразделяют на три группы: 1) растворимые в воде; 2) растворимые в органических растворителях; 3) летучие с паром (эфирные масла).

Твердые породы древесины (осина и береза) и мягкие породы (ель) различаются как по химическим, так и по структурным характеристикам [9, 10]. Необходимо отметить, что химический состав одной и той же породы не является строго постоянным, а зависит от ряда факторов, среди которых географическая зона произрастания, возраст и др. [11]. Хвоя сосны по сравнению с остальной биомассой дерева характеризуется большим содержанием экстрактивных веществ, которые составляют более трети ее сухой массы [12].

Значительная доля зерновых среди общего количества посевов позволяет заготовить значительные объемы соломы [1]. Достаточно богатый химический состав различных видов соломы расширяет возможности использования их экстрактов в различных областях. В настоящее время технологии химической переработки от-

ходов растениеводства предусматривают получение одного или в лучшем случае двух продуктов, пренебрегая остальными компонентами сырья. Из недревесного растительного сырья могут быть получены продукты органической (жиры, воски красители, пигменты, волокнистый полуфабрикат) и неорганической (диоксид кремния) природы. Для повышения эффективности переработки недревесного растительного сырья целесообразно поэтапное извлечение компонентов. Краткая схема переработки недревесного сырья показана на примере переработки соломы риса на рис. 2 [13].

Характерной особенностью химического состава соломы считается высокое содержание в ней клетчатки, очень небольшое количество белков и жиров, незначительное содержание витаминов [14]. Химический состав соломы зерновых культур достаточно сложен и представлен главным образом тремя группами органических соединений: целлюлозой, гемицеллюлозой и лигнином [15, 16]. Питательные вещества соломы заключены в прочный лигниноцеллюлозный комплекс. Состав клетчатки соломы, мас. %: целлюлоза 35–45, лигнин 14–20, пентозаны 20–30, кутин 2–3, кремнийсодержащих соединений 3–5 [17, 18]. В табл. 1 приведено содержание полисахаридов и лигнина в некоторых образцах



Рис. 2. Принципиальная схема ресурсосберегающей переработки соломы риса. Информация адаптирована из [13].

соломы. При обработке соломы в первую очередь подвергается гидролизу гемицеллюлоза, а затем целлюлоза. Состав моносахаридов, полученных в результате гидролиза гемицеллюлозы, мас. %: рамноза – следы, арабиноза 12.6–12.8, ксилоза 46.7–47.5, глюкоза 23.9–24.4, галактоза 11.7–16.2. Состав моносахаридов, полученных в результате гидролиза трудногидрируемых полисахаридов (целлюлозы), мас. %: арабиноза 1.6–1.8, ксилоза 9.0–9.6, глюкоза 79.3–84.7, галактоза 3.9–9.9 [19].

Кроме основных веществ, в состав соломы входят и другие органические соединения, в том числе в небольших количествах белок, воски, сахара, соли и зола. Особенность химического состава соломы различных злаков заключается в относительно высоком содержании в них азотсодержащих соединений и неорганических элементов, что убедительно продемонстрировано в [14, 16]. Солома злаковых культур отличается наличием жировоскового слоя, локализованного на поверхности стеблей. Растительные воски представляют собой сложную смесь алканов, алкенов, эфиров жирных кислот и первичных спиртов, свободных жирных кислот, терпеноидов и фенольных веществ и благодаря своему составу перспективны для пищевой и косметической промышленности в качестве биологически активных добавок и эмульгаторов. Жиры и воски получают из соломы экстракцией поляр-

ными органическими растворителями. На следующей стадии обычно извлекают водорастворимые вещества (пектины, крахмал, танины, красители, пигменты, минеральные вещества) кислотными или щелочными растворителями. Предварительная обработка сырья приводит к набуханию и разрыхлению клеточных стенок и межклеточного вещества, что позволяет снизить расход реагентов и облегчает процесс экстракции.

Во многом подходы к экстракции ценных компонентов из древесного сырья и отходов растениеводства достаточно близки. Однако из-за различия в химическом составе растительного сырья наблюдаются различия в способах проведения экстракции: выбор аппаратного оформления, экстрагентов, необходимость в предварительной

ТАБЛИЦА 1

Содержание полисахаридов и лигнина в некоторых образцах соломы. Информация адаптирована из [19]

Вид соломы	Содержание, мас. %		
	Целлюлоза	Гемицеллюлоза	Лигнин
Пшеничная	39	29	17
Ячменная	35	28	14
Овсяная	37	29	15
Ржаная	40	27	18
Рисовая	33	26	7

обработке биомассы или воздействию для интенсификации процесса, дальнейшие превращения экстрактов и т. д.

ПОЛУЧЕНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Процесс получения целлюлозы из древесного сырья называется делигнификацией и сводится к отделению ее от других веществ, находящихся в древесине, основным из которых является лигнин. Несмотря на то, что прямых способов экстракционного выделения целлюлозы из древесного сырья в литературе практически не описано, экстракционные способы переработки применяются для удаления других компонентов, в результате чего получается очищенная целлюлоза [20, 21]. Тем не менее, в литературе описан способ извлечения целлюлозы из древесины сосны и тополя с использованием хлорида 1-аллил-3-метилимидазолия и ионных жидкостей [22]. Ионная жидкость взаимодействует с древесиной сосны и за счет разрушения меж- и внутримолекулярных водородных связей между лигноцеллюлозами в результате получается экстракт, содержащий в основном целлюлозу. Из рисовой соломы могут быть получены целлюлозные пленки методом экстракции целлюлозы субкритической водой при повышенной температуре [23, 24]. В [25] исследована водная экстракция гемицеллюлозы из различного древесного и другого растительного сырья с использованием каскадной реакторной установки. В ходе процесса наблюдалась деградация исходных биополимеров. Было отмечено, что гемицеллюлоза из ели извлекается быстрее, чем из сахарного клена, початка кукурузы и эвкалипта, вероятно, ввиду высокого содержания маннозы, которая легко вступает в реакцию.

ПОЛУЧЕНИЕ ЛИГНИНА

Лигнин, обладающий заданными физическими и химическими параметрами, может применяться в качестве предшественника субстрата для микробиологических сред, получения углеродных адсорбентов, сажи и углей с определенными свойствами. Лигнин-углеводные комплексы обладают структурными преимуществами как лигнина, так и углеводов. Они представляют собой перспективные амфифильные биополимеры, но их экстракция затруднена из-за возможного разрыва химической связи между лигнином и углеводами. В [26] описывается простой способ

извлечения лигнин-углеводных комплексов из растительного сырья с помощью эвтектических растворителей в мягких условиях. Авторами предложен процесс, включающий стадию механохимического фракционирования рисовой соломы на шаровой мельнице для облегчения экстракции целевого продукта. Данный подход позволяет достичь выхода лигниноцеллюлозного комплекса до 24 % с попутным получением высокогидролизуемой целлюлозы.

Солома реже используется в качестве источника лигнина в сравнении с древесиной, однако встречаются работы, посвященные экстракционным способам переработки недревесного сырья с целью получения лигнина из биомассы и изучения возможностей его применения. В [27] предложен простой процесс эффективного извлечения лигнина из соломы пшеницы с помощью усовершенствованной технологии на основе LignoForce™, которая обычно применяется при промышленной экстракции лигнина из древесного сырья. Мембранная сепарация в сочетании с щелочно-этиленгликолевой экстракцией позволяет с высоким выходом получить лигнин с заданным диапазоном молекулярных масс из рисовой соломы [28].

Гидротермальная обработка соломы пшеницы также может применяться для облегчения процесса выделения лигнина водно-этанольными растворами [29]. Микроволновое воздействие при получении лигнина из соломы тритикале [30] или соломы ячменя [31] также способствует значительной интенсификации процесса экстракции. Предварительная обработка соломы пшеницы органическими [32] или органосольватными растворителями [33] или проведение процесса в присутствии катализаторов с льюисовской кислотностью [34] позволяет получать лигнин с заданными химическими и физическими параметрами.

Кроме того, стоит отметить, что в связи со значительным содержанием полисахаридов в соломе, она может использоваться как сырье в приготовлении гидролизата с последующим применением в качестве питательной среды для культивирования микроорганизмов и микробиологического синтеза. Поэтому выделенный из растительных отходов лигнин потенциально может быть применен для получения биоэтанола [35–39] и биобутанола [39–43]. Однако для эффективного протекания процесса брожения требуется качественная очистка растительного сырья и питательного лигниносодержащего субстрата путем предварительной экстракции ингибирующих соединений из биомассы.

ПОЛУЧЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОСКОВ

Способам извлечения липидов из различных видов соломы посвящено множество исследований ввиду высокой практической ценности растительных восков. В [44] был определен детальный липидный состав пшеничной соломы с использованием метода газовой хроматографии. Общий состав исследуемой соломы пшеницы представлен в табл. 2. Стероидные соединения также присутствовали в липофильных экстрактах пшеничной соломы, но в незначительных количествах.

Экстракция сверхкритическим диоксидом углерода (CO_2) достаточно часто применяется для выделения восков из растительного сырья [45]. В [46] показана возможность получения растительных восков из соломы пшеницы с достаточно высоким выходом. Кроме того, авторами была построена математическая модель процесса экстракции восков из соломы пшеницы. Комбинирование процессов экстракции сверхкритическим CO_2 и классическим экстрагентом (гексан) позволило количественно выделить и изучить растительные воски в соломе тритикале [47]. Сочетание методов обработки сверхкритическим CO_2 и микроволнового пиролиза рисовой соломы [48] обеспечило выделение целевых молекул с выходом 0.7 % от сухой биомассы. Состав липидов, полученных предложенным методом, был сопоставим с составом восков, извлекаемых гексаном в аппарате Сокслета. Способ переработки отходов ветвей хвойных пород путем сверхкритической экстракции CO_2 для выделения стероидов, летучих органических соединений и органических кислот приведен в [49].

Существует способ извлечения растительных восков из соломы пшеницы и льна с помощью жидкого азота (N_2) [50]. Подход заключается в погружении биомассы в жидкий N_2 с выдерживанием в нем в течение короткого времени. Впоследствии солома отделяется, жидкий азот испаряется, а кристаллы растительных восков либо собирают механически, либо растворяют в гексане. Авторы сравнивают данный метод с прямой экстракцией растительных восков гексаном и показывают, что предложенный способ является эффективной альтернативой классическому методу с использованием органических растворителей.

Из свежей древесной зелени сосны обыкновенной (*Pinus silvestris*) путем кипячения в гексане могут быть экстрагированы продукты, содержащие около 80 мас. % нейтральных липидов,

17 мас. % восков и около 3 мас. % фосфолипидов [51]. Дальнейшая переработка полученного экстракта позволила авторам получить хлорофилл-каротиновую пасту, хвойный воск и эфирное масло. Обработка сверхкритическим CO_2 для выделения растительных восков из хвои также описана в [52].

Проведено исследование прямого микробного превращения пшеничной соломы в липиды целлюлозолитическим грибом *Aspergillus oryzae* A-4 в процессе твердофазной ферментации [53]. При использовании смеси пшеничной соломы и отрубей в данном процессе выход липидов достигал 63 мг/г. Было показано, что предварительная обработка соломы разбавленной кислотой и добавление в солому различных агропромышленных отходов может повысить накопление липидов грибом. Выделение липидов экстракционными методами позволило получить чистый продукт, пригодный для дальнейшего применения. В [54] было установлено, что масляные дрожжи *Lipomyces starkeyi* NRRL Y-1389 продуцировали наибольшее количество липидов при культивировании в целлюлозном и гемицеллюлозном гидролизатах соломы пшеницы. Дальнейшее выделение аккумулированных липидов из биомассы дрожжей экстракционными методами позволяет рассматривать предложенный подход как перспективный способ получения растительных липидов из данного сырья.

ПОЛУЧЕНИЕ ДРУГИХ ЦЕННЫХ ПРОДУКТОВ

В состав отходов растениеводства входят компоненты, которые могут быть использованы в фармацевтической, пищевой и косметической

ТАБЛИЦА 2

Основные компоненты пшеничной соломы.
Информация адаптирована из [44]

Компонент	Содержание, мас. % сухого вещества
Водорастворимые	9.6
Общие экстрактивные вещества, в т. ч.:	2.7
липофильные соединения	2.0
полярные соединения	0.7
Лигнин Класона	16.2
Кислоторастворимый лигнин	1.5
Холоцеллюлоза, в т. ч.:	67.2
целлюлоза	36.5
гемицеллюлоза	30.7
Зола	6.6

промышленности. Возможности применения экстракционных технологий для выделения биологически активных молекул из различных типов древесного сырья или отходов сельского хозяйства опубликованы в обзорах [55–57].

Известны отечественные публикации по экстрагированию компонентов из древесной зелени хвойных пород водяным паром в условиях избыточного давления [58–62]. Конденсация испаренной жидкости позволяет получить экстракт с высокой концентрацией летучих соединений, при этом отгонка растворителя при низких температурах и пониженном давлении обеспечивает сохранение многих биологически активных веществ без их термического разрушения. Экстракция летучих соединений из отходов хвойных деревьев с помощью сверхкритического CO_2 описана в [49]. Возможности применения сверхкритического CO_2 для извлечения различных ценных биологических молекул из отходов лесной промышленности также освещены в обзоре [63]. Микроволновое [64] или ультразвуковое [65] воздействие при проведении процесса интенсифицируют экстракцию ценных соединений из древесных отходов и позволяют достичь большего выхода целевых веществ.

Выделение флавоноидов из стружки древесины белой акации (*Robinia pseudoacacia*) путем подачи горячей воды под давлением происходит с наибольшим выходом при температуре 120 °С, в то время как выходы полифенольных соединений и сахаров в этом способе максимальны при 160 °С [66]. Авторами работы была построена кинетическая модель процесса, с высокой точностью описывающая процесс экстракции целевых флавоноидов в различных условиях.

Луковая шелуха содержит значительное количество ценных органических соединений. Описано большое количество экстракционных способов извлечения флавоноидов, полифенолов, органических кислот и антоцианов из луковой шелухи [67]. Чаще всего для выделения этих соединений применяются глубокие эвтектические растворители, этанол, метанол, этилацетат, кислотные агенты или ацетон. Способы получения полисахаридов из лука, чеснока и их отходов экстракционными методами детально изложены в обзоре [68].

Отходы лесозаготовки и растениеводства, такие как шелуха различных семян и плодов, кожура овощей и фруктов, древесная зелень, а также солома некоторых сельскохозяйственных культур, могут служить источниками природных красителей. Экстракционными методами могут

быть выделены из природного сырья антоцианы, каротиноиды, хлорофилл, беталаин и другие соединения [69–71]. Для более полного и быстрого выделения красителей из биомассы чаще всего используют методы интенсификации, такие как микроволновое [72–74], импульсное электрическое [70, 74, 75] или ультразвуковое [69, 74] воздействие. Также достаточно распространенным подходом является накопление пигментов из растительных отходов в микробиологических средах с последующим экстракционным выделением [76, 77].

Экстракция водно-этанольным раствором соломы сахарного тростника позволяет извлечь из биомассы значительное количество полифенольных соединений, а последующая очистка и концентрирование с помощью ионообменных смол приводит к получению продукта, преимущественно содержащего флавоноиды, гидросибензойные и гидроксикоричные кислоты, а также обладающего высокой антиоксидантной активностью [78]. Экстракция этанольным раствором применяется для выделения из отходов винограда полифенольных соединений [79]. Для интенсификации процесса авторы использовали ультразвуковую обработку. Однако чаще всего для извлечения органических кислот применяют экстракцию щелочными агентами [80–83]. В работе [84] приведен сравнительный обзор методов получения полифенольных экстрактов и индивидуальных соединений из рисовой соломы. Способы экстракции полифенольных соединений из ветвей виноградных лоз рассмотрены в [85].

К настоящему моменту также описано выделение салицилатов из коры молодой осины [86], получение салицина из отходов осины [87] и биологически активных веществ из отходов древесины эвкалипта [88]. В [89] показан способ извлечения фульвокислот из компоста кукурузной соломы с помощью экстракции щелочными агентами. Подобраны оптимальные условия вытяжки и осаждения целевых компонентов, проанализирован состав выделяемых фульвокислот и определена их молекулярная структура. Авторы заключили, что предложенный способ является перспективным и экологичным для получения из растительного сырья фульвокислот приемливого качества и состава.

Фурфурол считается значимым соединением для органического синтеза и используется в качестве растворителя, компонента производства смол, лекарственных препаратов или предшественника для синтеза фурана и тетрагидрофу-

рана. И хотя известные промышленные способы получения фурфурола достаточно эффективны, исследователи экспериментируют в области экстракционных технологий получения фурфурола из отходов лесозаготовок и растениеводства, в том числе кукурузных початков, свекловичного жома, отрубей и древесных опилок [90].

Солома различных культур содержит большое количество кремния, который может быть выделен из растительного сырья путем сжигания с последующей обработкой золы различными агентами либо с последующими экстракционными методами извлечения силикагеля. В [91] представлен обзор способов получения наночастиц диоксида кремния (SiO_2) из рисовой соломы с использованием экстракции, при этом чаще всего присутствует стадия предварительного прокаливания биомассы. Тем не менее, прокаливание не является обязательной стадией для выделения силикагеля из соломы. Например, в [92] предложен способ выделения SiO_2 из рисовой соломы путем щелочной экстракции. Авторами были подобраны условия получения диоксида кремния с чистой более 97 % при одновременном выделении лигнина из соломы риса с выходом 50–70 %. Кроме того, описаны схемы процесса одновременного выделения SiO_2 , целлюлозы и лигнина из рисовой соломы с достаточно высокими выходами [93] или получение высокочистого SiO из рисовой соломы без термической обработки [94].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзоре показаны основные возможности применения экстракционных технологий для переработки отходов лесоперерабатывающей промышленности и растениеводства. Приведены способы получения ценных продуктов, показана возможность вовлечения соломы различных сельскохозяйственных культур и древесного сырья в комплексную переработку.

С помощью методов экстракции возможно получение таких продуктов, как целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин, флавоноиды, растительные воски, полифенольные соединения, органические кислоты, красители, диоксид кремния и др. Выбор условий экстракционного выделения и экстракционной очистки позволяет получать целевые соединения с высокой степенью чистоты и регулируемые физическими характеристиками. Простота аппаратного оформ-

ления процессов экстракции позволяет широко использовать данные методы в промышленной переработке растительного сырья, а высокая значимость извлеченных продуктов делает экстракционную переработку растительного сырья важнейшим способом получения ценных органических соединений.

Возможность более глубокой переработки биомассы и вовлечения отходов растениеводства или лесной промышленности в цикл производства ценных соединений предопределяет перспективность и значимость экстракционных технологий в современной химической промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Новосибирской области (Соглашение о предоставлении гранта 0000005406995998235121742 / № МЛ-2 от 26.10.2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Лазаревич А. Н., Леснов А. П. Солома в рационах сельскохозяйственных животных: рекомендации. Красноярск, 2016. 90 с.
- 2 Угрюмов С. А. Совершенствование технологии производства композиционных материалов с использованием древесных отходов // Актуал. направления науч. исслед. XXI в.: теория и практика. 2014. Т. 2, № 2-2 (7-2). С. 160–164.
- 3 Baykova O. V., Pugach V. N., Kazakov A. V. The entrepreneurial method as a way to solve the problems of processing wood waste in a circular economy // Теорет. и приклад. экология. 2022. № 4. С. 224–231.
- 4 Lou R., Ma R., Lin K.-T., Ahamed A., Zhang X. Facile extraction of wheat straw by deep eutectic solvent (DES) to produce lignin nanoparticles // ACS Sustainable Chem. Eng. 2019. Vol. 7, No. 12. P. 10248–10256.
- 5 Tribot A., Amer G., Abdou Alio M., De Baynast H., Delattre C., Pons A., Mathias J.-D., Callois J.-M., Vial C., Michaud P., Dussap C.-G. Wood-lignin: supply, extraction processes and use as bio-based material // Eur. Polym. J. 2019. Vol. 112. P. 228–240.
- 6 Ravetti Duran R., Muhr L., Barth D. Extraction processes of high added value molecules from wood waste: overview and comparison of processes for an eco-friendly recovery from paper industry by-product // Ind. Crops Prod. 2024. Vol. 213. Art. 118403.
- 7 Использование отходов лесозаготовок и лесопиления / Л. Т. Губернская (ред.). М., 1961. 36 с.
- 8 Терентьева Э. П., Удовенко Н. К., Павлова Е. А. Химия древесины, целлюлозы и синтетических полимеров: учеб. пособие. Ч. 2. СПб., 2015. 83 с.
- 9 Ragauskas A. J., Beckham G. T., Biddy M. J., Chandra R., Chen F., Davis M. F., Davison B. H., Dixon R. A., Gilna P., Keller M., Langan P., Naskar A. K., Saddler J. N., Tschaplinski T. J., Tuskan G. A., Wyman C. E. Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery // Science. 2014. Vol. 344, No. 6185. Art. 1246843.
- 10 Дейнеко И. П., Фаустова Н. М. Элементный и групповой химический состав коры и древесины осины // Химия растит. сырья. 2015. № 1. С. 51–62.

- 11 Азаров В. И., Буров А. В., Оболенская А. В. Химия древесины и синтетических полимеров: учебник. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2010. 618 с.
- 12 Алиев Р. Г., Павлова Е. А., Терентьева Э. П., Удовенко Н. К. Комплексная химическая переработка древесины: учеб. пособие. СПб., 2012. 74 с.
- 13 Вураско А. В., Дрикер Б. Н., Галимова А. Р. Ресурсосберегающая переработка недревесного сырья // Вестн. Московского гос. ун-та леса – Лесной вестн. 2007. № 8. С. 140–143.
- 14 Богданович А. А., Конопелько Л. А., Болтовский В. С. Определение компонентного состава соломы зерновых и масличных культур, районированных в Республике Беларусь, и перспективные направления ее переработки // Труды БГТУ. Сер. 2: Хим. технологии, биотехнология, геоэкология. 2017. № 2 (199). С. 37–41.
- 15 Валеева Р. Т., Понкратов А. С., Мухачев С. Г., Ананьева О. В., Нуртдинов Р. М., Емельянов В. М. Солома как перспективное сырье для биотехнологических производств. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 144 с.
- 16 Wang X., Yang Z., Liu X., Huang G., Xiao W., Han L. The composition characteristics of different crop straw types and their multivariate analysis and comparison // Waste Manage. 2020. Vol. 110. P. 87–97.
- 17 Mirmohamadsadeghi S., Karimi K. Recovery of silica from rice straw and husk // Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Resource Recovery from Wastes / S. Varjani, A. Pandey, E. Gnansounou, S. K. Khanal, S. Raveendran (Eds.). Amsterdam: Elsevier, 2020. P. 411–433.
- 18 Souri Z., Khanna K., Karimi N., Ahmad P. Silicon and plants: current knowledge and future prospects // J. Plant Growth Regul. 2021. Vol. 40, No. 3. P. 906–925.
- 19 Хускивадзе Б. К., Выслоух В. А., Воробьева Г. И. Обогащение растительных материалов микробным белком. М.: ОНТИТЭИмикробиопром, 1982. 39 с.
- 20 Hanhikoski S., Niemelä K., Vuorinen T. Biorefining of Scots pine using neutral sodium sulphite pulping: investigation of fibre and spent liquor compositions // Ind. Crops Prod. 2019. Vol. 129. P. 135–141.
- 21 Ekstrand E.-M., Hedenström M., Svensson B. H., Shakeri Yekta S., Björn A. Methane potentials and organic matter characterization of wood fibres from pulp and paper mills: the influence of raw material, pulping process and bleaching technique // Biomass Bioenergy. 2020. Vol. 143. Art. 105824.
- 22 Wang X., Li H., Cao Y., Tang Q. Cellulose extraction from wood chip in an ionic liquid 1-allyl-3-methylimidazolium chloride (AmimCl) // Bioresour. Technol. 2011. Vol. 102. P. 7959–7965.
- 23 Freitas P. A. V., Santana L. G., González-Martínez C., Chiralt A. Combining subcritical water extraction and bleaching with hydrogen peroxide to obtain cellulose fibres from rice straw // Carbohydr. Polym. Technol. Appl. 2024. Vol. 7. Art. 100491.
- 24 Zhou Y., Hu Y., Tan Z., Zhou T. Cellulose extraction from rice straw waste for biodegradable ethyl cellulose films preparation using green chemical technology // J. Cleaner Prod. 2024. Vol. 439. Art. 140839.
- 25 Grénman H., Eränen K., Krogell J., Willför S., Salmi T., Murzin D. Yu. Kinetics of aqueous extraction of hemicelluloses from spruce in an intensified reactor system // Ind. Eng. Chem. Res. 2011. Vol. 50, No. 7. P. 3818–3828.
- 26 Jiang B., Shen F., Jiang Y., Huang M., Zhao L., Lei Y., Hu J., Tian D., Shen F. Extraction of super high-yield lignin-carbohydrate complexes from rice straw without compromising cellulose hydrolysis // Carbohydr. Polym. 2024. Vol. 323. Art. 121452.
- 27 Fan Z., An X., Cheng Z., Cao H., Li J., Liu L., Liu H. A facile process for efficient extraction of lignin with controllable morphology from wheat straw based bio-mechanical pulping effluent // Ind. Crops Prod. 2023. Vol. 201. Art. 116927.
- 28 Chen Y.-L., Lo C.-C., Liu Y.-L., Sun Y.-M. Lignin extraction and fractionation from rice straw biorefinery residues // Sep. Purif. Technol. 2023. Vol. 326. Art. 124778.
- 29 Li J., Feng P., Xiu H., Zhang M., Li J., Du M., Zhang X., Kozliak E., Ji Y. Wheat straw components fractionation, with efficient delignification, by hydrothermal treatment followed by facilitated ethanol extraction // Bioresour. Technol. 2020. Vol. 316. Art. 123882.
- 30 Monteil-Rivera F., Huang G. H., Paquet L., Deschamps S., Beaulieu C., Hawari J. Microwave-assisted extraction of lignin from triticale straw: optimization and microwave effects // Bioresour. Technol. 2012. Vol. 104. P. 775–782.
- 31 Mohammadabadi S. I., Javanbakht V. Lignin extraction from barley straw using ultrasound-assisted treatment method for a lignin-based biocomposite preparation with remarkable adsorption capacity for heavy metal // Int. J. Biol. Macromol. 2020. Vol. 164. P. 1133–1148.
- 32 Jöul P., Ho T. T., Kallavus U., Konist A., Leiman K., Salm O.-S., Kulp M., Koel M., Lukk T. Characterization of organosolv lignins and their application in the preparation of aerogels // Materials. 2022. Vol. 15, No. 8. Art. 2861.
- 33 Labauze H., Cachet N., Benjelloun-Mlayah B. Acid-based organosolv lignin extraction from wheat straw: kinetic and structural analysis // Ind. Crops Prod. 2022. Vol. 187, Part A. Art. 115328.
- 34 Constant S., Basset C., Dumas C., Di Renzo F., Robitzer M., Barakat A., Quignard F. Reactive organosolv lignin extraction from wheat straw: influence of Lewis acid catalysts on structural and chemical properties of lignins // Ind. Crops Prod. 2015. Vol. 65. P. 180–189.
- 35 Жукова Ю. А., Мезенова О. Я. Технологии получения биоэтанола из пшеничной соломы // Вестн. Междунар. акад. холода. 2011. № 4. С. 21–23.
- 36 Rosgaard L., Pedersen S., Meyer A. S. Comparison of different pretreatment strategies for enzymatic hydrolysis of wheat and barley straw // Appl. Biochem. Biotechnol. 2007. Vol. 143, No. 3. P. 284–296.
- 37 Yuan Z., Li G., Hegg E. L. Enhancement of sugar recovery and ethanol production from wheat straw through alkaline pre-extraction followed by steam pretreatment // Bioresour. Technol. 2018. Vol. 266. P. 194–202.
- 38 Chen X., Li H., Sun S., Cao X., Sun R. Co-production of oligosaccharides and fermentable sugar from wheat straw by hydrothermal pretreatment combined with alkaline ethanol extraction // Ind. Crops Prod. 2018. Vol. 111. P. 78–85.
- 39 De Carvalho D. M., Sevastyanova O., De Queiroz J. H., Colodette J. L. Cold alkaline extraction as a pretreatment for bioethanol production from eucalyptus, sugarcane bagasse and sugarcane straw // Energy Convers. Manage. 2016. Vol. 124. P. 315–324.
- 40 Advanced Biofuels and Bioproducts / J. W. Lee (Ed.). New York: Springer, 2013. 1122 p.
- 41 Ezeji T. C., Qureshi N., Blaschek H. P. Microbial production of a biofuel (acetone-butanol-ethanol) in a continuous bioreactor: impact of bleed and simultaneous product removal // Bioprocess Biosyst. Eng. 2013. Vol. 36, No. 1. P. 109–116.
- 42 Ezeji T., Milne C., Price N. D., Blaschek H. P. Achievements and perspectives to overcome the poor solvent resistance in acetone and butanol-producing microorganisms // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2010. Vol. 85, No. 6. P. 1697–1712.
- 43 Ezeji T., Blaschek H. P. Fermentation of dried distillers' grains and solubles (DDGS) hydrolysates to solvents and

- value-added products by solventogenic clostridia // *Biore-sour. Technol.* 2008. Vol. 99, No. 12. P. 5232–5242.
- 44 Del Río J. C., Prinsen P., Gutiérrez A. A comprehensive characterization of lipids in wheat straw // *J. Agric. Food Chem.* 2013. Vol. 61, No. 8. P. 1904–1913.
 - 45 Attard T. M., Bukhanko N., Eriksson D., Arshadi M., Geladi P., Bergsten U., Budarin V. L., Clark J. H., Hunt A. J. Supercritical extraction of waxes and lipids from biomass: a valuable first step towards an integrated biorefinery // *J. Cleaner Prod.* 2018. Vol. 177. P. 684–698.
 - 46 Sin E. H. K., Marriott R., Hunt A. J., Clark J. H. Identification, quantification and Chrastil modelling of wheat straw wax extraction using supercritical carbon dioxide // *C. R. Chim.* 2014. Vol. 17, No. 3. P. 293–300.
 - 47 Athukorala Y., Mazza G. Supercritical carbon dioxide and hexane extraction of wax from triticale straw: content, composition and thermal properties // *Ind. Crops Prod.* 2010. Vol. 31, No. 3. P. 550–556.
 - 48 Sikhon C., Attard T. M., Winotapun W., Supanchaiyamat N., Farmer T. J., Budarin V., Clark J. H., Hunt A. J. Enhanced microwave assisted pyrolysis of waste rice straw through lipid extraction with supercritical carbon dioxide // *RSC Adv.* 2024. Vol. 14, No. 1. P. 29–45.
 - 49 Trubetskaya A., Hunt A. J., Budarin V. L., Attard T. M., Kling J., Surup G. R., Arshadi M., Umeki K. Supercritical extraction and microwave activation of wood wastes for enhanced syngas production and generation of fullerene-like soot particles // *Fuel Process. Technol.* 2021. Vol. 212. Art. 106633.
 - 50 Canizares D., Angers P., Ratti C. Selective wax recovery from flax and wheat straw // *Ind. Crops Prod.* 2019. Vol. 141. Art. 111700.
 - 51 Речкина Е. А., Губаненко Г. А., Рубчевская Л. П. Особенности производства пектиновых веществ из хвойного сырья // *Соврем. наукоемкие технологии.* 2010. № 1. С. 35–38.
 - 52 McElroy C. R., Attard T. M., Farmer T. J., Gaczynski A., Thornthwaite D., Clark J. H., Hunt A. J. Valorization of spruce needle waste via supercritical extraction of waxes and facile isolation of nonacosan-10-ol // *J. Cleaner Prod.* 2018. Vol. 171. P. 557–566.
 - 53 Lin H., Cheng W., Ding H.-T., Chen X.-J., Zhou Q.-F., Zhao Y.-H. Direct microbial conversion of wheat straw into lipid by a cellulolytic fungus of *Aspergillus oryzae* A-4 in solid-state fermentation // *Bioresour. Technol.* 2010. Vol. 101, No. 19. P. 7556–7562.
 - 54 Liu Z., Feist A. M., Dragone G., Mussatto S. I. Lipid and carotenoid production from wheat straw hydrolysates by different oleaginous yeasts // *J. Cleaner Prod.* 2020. Vol. 249. Art. 119308.
 - 55 Santos M. B., Sillero L., Gatto D. A., Labidi J. Bioactive molecules in wood extractives: methods of extraction and separation, a review // *Ind. Crops Prod.* 2022. Vol. 186. Art. 115231.
 - 56 Jena S., Singh R. Agricultural crop waste materials – A potential reservoir of molecules // *Environ. Res.* 2022. Vol. 206. Art. 112284.
 - 57 N'Guessan J. L. L., Niamké B. F., Yao N. J. C., Amusan N. Wood extractives: main families, functional properties, fields of application and interest of wood waste // *For. Prod. J.* 2023. Vol. 73, No. 3. P. 194–208.
 - 58 Сафин Р. Р., Разумов Е. Ю., Воронин А. Е., Зиятдинов А. Р., Сабиров А. Т. Установка для переработки отходов древесных производств // *Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского.* 2009. № 5 (19). С. 82–87.
 - 59 Сафин Р. Г., Зиятдинова Д. Ф., Альмухаметов Р. С., Степанова Т. О., Крайнов А. А., Дукси Ф. Экстракция компонентов древесины // *Вестн. технолог. ун-та.* 2017. Т. 20, № 2. С. 159–161.
 - 60 Пат. RU 2351642 C2, 2009.
 - 61 Пат. RU 2404238 C1, 2010.
 - 62 Сафина А. В., Тимербаев Н. Ф., Зиятдинова Д. Ф., Арсланова Г. Р. Экстракция ценных компонентов из лесосечных отходов // *Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн.* 2018. № 1 (351). С. 109–119.
 - 63 Aili Q., Cui D., Li Y., Zhige W., Yongping W., Minfen Y., Dongbin L., Xiao R., Qiang W. Composing functional food from agro-forest wastes: selectively extracting bioactive compounds using supercritical fluid extraction // *Food Chem.* 2024. Vol. 455. Art. 139848.
 - 64 Alvi T., Asif Z., Khan M. K. I. Clean label extraction of bioactive compounds from food waste through microwave-assisted extraction technique – A review // *Food Biosci.* 2022. Vol. 46. Art. 101580.
 - 65 Bin Mokaizh A. A., Nour A. H., Kerboua K. Ultrasonic-assisted extraction to enhance the recovery of bioactive phenolic compounds from *Commiphora gileadensis* leaves // *Ultrason. Sonochem.* 2024. Vol. 105. Art. 106852.
 - 66 Sangaré D., Caré F., Buron F., Lafite P., Bostyn S. Numerical modeling and evaluation of solid-liquid extraction with pressurized hot water extraction applied to *Robinia pseudoacacia* wood // *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 2024. Vol. 195. Art. 109605.
 - 67 Bains A., Sridhar K., Singh B. N., Kuhad R. C., Chawla P., Sharma M. Valorization of onion peel waste: from trash to treasure // *Chemosphere.* 2023. Vol. 343. Art. 140178.
 - 68 Kumari N., Kumar M., Radha, Lorenzo J. M., Sharma D., Puri S., Pundir A., Dhumal S., Bhuyan D. J., Jayanthi G., Selim S., Abdel-Wahab B. A., Chandran D., Anitha T., Deshmukh V. P., Pandiselvam R., Dey A., Senapathy M., Rajalingam S., Mohankumar P., Kennedy J. F. Onion and garlic polysaccharides: a review on extraction, characterization, bioactivity, and modifications // *Int. J. Biol. Macromol.* 2022. Vol. 219. P. 1047–1061.
 - 69 Extraction of Natural Products from Agro-Industrial Wastes: a Green and Sustainable Approach / S. A. Bhawani, A. Khan, F. B. Ahmad (Eds.). Amsterdam: Elsevier, 2023. 354 p.
 - 70 Cazón P., Silva A. S. Natural pigments from food wastes: new approaches for the extraction and encapsulation // *Curr. Opin. Green Sustainable Chem.* 2024. Vol. 47. Art. 100929.
 - 71 Guddi K., Chithra G. V., Bhavani R., Naik S., Sarkar A. Pigments and paints from wastes // *Processing of Biomass Waste: Technological Upgradation and Advancement / A. Sarkar, U. Lassi (Eds.). Amsterdam: Elsevier, 2024. P. 233–243.*
 - 72 Kocer S., Copur O. U., Tamer C. E., Suna S., Kayahan S., Uysal E., Cavus S., Akman O. Optimization and characterization of chestnut shell pigment extract obtained microwave assisted extraction by response surface methodology // *Food Chem.* 2024. Vol. 443. Art. 138424.
 - 73 Netravati, Gomez S., Pathrose B., Joseph M., Shynu M., Kuruvila B. Comparison of extraction methods on anthocyanin pigment attributes from mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) fruit rind as potential food colourant // *Food Chem. Adv.* 2024. Vol. 4. Art. 100559.
 - 74 Zuin V. G., Ramin L. Z. Green and sustainable separation of natural products from agro-industrial waste: challenges, potentialities, and perspectives on emerging approaches // *Chemistry and Chemical Technologies in Waste Valorization / Lin C. S. K. (Ed.). Cham: Springer, 2018. P. 229–282. (Topics in Current Chemistry Collections).*
 - 75 Bocker R., Silva E. K. Pulsed electric field assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices // *Food Chem.: X.* 2022. Vol. 15. Art. 100398.
 - 76 Umesh M., Suresh S., Santosh A. S., Prasad S., Chinna-thambi A., Al Obaid S., Jhanani G. K., Shanmugam S. Valorization of pineapple peel waste for fungal pigment pro-

- duction using *Talaromyces albobiverticillius*: insights into antibacterial, antioxidant and textile dyeing properties // Environ. Res. 2023. Vol. 229. Art. 115973.
- 77 Ranveer R. C., Tapre A. R., Rathod N. B., Sakhale B. K. Enzymatic extraction of pigments from agro-processing waste // Value-Addition in Agri-Food Industry Waste Through Enzyme Technology / M. Kuddus, P. W. Ramteke (Eds.). Amsterdam: Elsevier, 2023. P. 191–198.
 - 78 Carvalho M. J., Costa J. R., Pedrosa S. S., Pintado M., Oliveira A. L. S., Madureira A. R. Sugarcane straw extracts: production and purification by amberlite XAD-2 // Food Bioprod. Process. 2023. Vol. 140. P. 189–199.
 - 79 Cañadas R., Díaz I., Sánchez-Monedero A., González E. J., González-Miquel M. Green extraction of natural antioxidants from white grape waste using bio-renewable solvents and ultrasonic process intensification // Chem. Eng. Process. Process Intensif. 2024. Vol. 196. Art. 109644.
 - 80 Salleh N. H. M., Daud M. Z. M., Arbain D., Ahmad M. S., Ismail K. S. K. Optimization of alkaline hydrolysis of paddy straw for ferulic acid extraction // Ind. Crops Prod. 2011. Vol. 34, No. 3. P. 1635–1640.
 - 81 Aires A., Carvalho R., Saavedra M. J. Valorization of solid wastes from chestnut industry processing: extraction and optimization of polyphenols, tannins and ellagitannins and its potential for adhesives, cosmetic and pharmaceutical industry // Waste Manage. 2016. Vol. 48. P. 457–464.
 - 82 Qian S., Lu M., Zhou X., Sun S., Han Z., Song H. Improvement in caffeic acid and ferulic acid extraction by oscillation-assisted mild hydrothermal pretreatment from sorghum straws // Bioresour. Technol. 2024. Vol. 396. Art. 130442.
 - 83 Maia A. M. M., Pessoa-Junior A., Roberto I. C. Extraction of hydroxycinnamic acids (ferulic and *p*-coumaric) from rice straw alkaline black liquor using Pluronic F-127 for potential applications in the cosmetics industry // Ind. Crops Prod. 2023. Vol. 201. Art. 116914.
 - 84 Ramos M., Laveriano E., San Sebastián L., Perez M., Jiménez A., Lamuela-Raventos R. M., Garrigós M. C., Vallverdú-Queralt A. Rice straw as a valuable source of cellulose and polyphenols: applications in the food industry // Trends Food Sci. Technol. 2023. Vol. 131. P. 14–27.
 - 85 Zwingelstein M., Draye M., Besombes J.-L., Piot C., Chatel G. Viticultural wood waste as a source of polyphenols of interest: opportunities and perspectives through conventional and emerging extraction methods // Waste Manage. 2020. Vol. 102. P. 782–794.
 - 86 Сафин Р. Г., Зиатдинова Д. Ф., Арсланова Г. Р. Экстрагирование биологически активных веществ из коры осины // Лесной вестн. 2017. Т. 21, № 2. С. 65–69.
 - 87 Турецкова В. Ф., Лобанова И. Ю., Рассыпнова С. С., Талыкова Н. М. Осина обыкновенная как перспективный источник получения препаратов противовоспалительного и противомикробного действия // Бюл. сибирской медицины. 2011. Т. 10, № 5. С. 106–111.
 - 88 Fernández-Agulló A., Freire M. S., González-Álvarez J. Effect of the extraction technique on the recovery of bioactive compounds from eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) wood industrial wastes // Ind. Crops Prod. 2015. Vol. 64. P. 105–113.
 - 89 Chi M., Wang Z., Xu W., Hou R. Extraction and characterization of fulvic acid from corn straw compost by alkali solution acid precipitation // Ind. Crops Prod. 2023. Vol. 198. Art. 116678.
 - 90 Клещевников Л. И., Логинова И. В., Харина М. В., Емельянов В. М. Методы получения фурфурола и его применение // Вестн. Казанского технолог. ун-та. 2015. Т. 18, № 19. С. 95–101.
 - 91 Singh G., Chowdhary K., Sharma S. Elucidating the prospects of paddy straw as a potential source of nanosilica: a road map towards sustainable agriculture, bioeconomy and entrepreneurship // J. Cleaner Prod. 2024. Vol. 449. Art. 141607.
 - 92 Reddy A., Begum S., Juntupally S., Pavuluri S., Anupolu G. R. Silica extraction followed by biogas generation from rice straw: investigating the impact of pretreatment on purity of silica, biogas yield and microbial diversity along with insights on techno-economic analysis // J. Environ. Chem. Eng. 2022. Vol. 10, No. 5. Art. 108274.
 - 93 Krishania M., Kumar V., Sangwan R. S. Integrated approach for extraction of xylose, cellulose, lignin and silica from rice straw // Bioresour. Technol. Rep. 2018. Vol. 1. P. 89–93.
 - 94 Nandiyanto A. B. D., Rahman T., Fadhlulloh M. A., Abdullah A. G., Hamidah I., Mulyanti B. Synthesis of silica particles from rice straw waste using a simple extraction method // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2016. Vol. 128. Art. 012040.