

БИОПЕРЕРАБОТКА ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ

А.Н. Иванкин✉, А.Н. Зарубина

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи,
ул. 1-я Институтская, д. 1

aivankin@inbox.ru

Описана методология утилизации лигниновых щелоков путем получения дрожжевой биомассы с использованием продуцента пекарских дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в ходе осуществления биосинтеза на питательной среде с отходами целлюлозно-бумажной промышленности — лигносульфонатами. Показано, что лигносульфонаты, как продукты переработки древесной биомассы, в процессе их биопереработки могут быть в присутствии дрожжей утилизированы в питательную биомассу, которая представляет собой белковый ингредиент для последующего балансирования, например, животных кормов. Приведен анализ углеводного состава свободных сахаров в лигносульфонатной части исходной питательной среды и показано, что в ней соотношение основных углеводов: арабинозы, галактозы, глюкозы, маннозы, ксилозы, рибозы и лактозы было равным 1 : 1,6 : 1,8 : 6,4 : 12,5 : 0,1 : 0,02, что перспективно для использования продукта в качестве питательного компонента в биотехнологии. Изложена методология ведения биосинтеза. Установлены оптимальные условия ведения процесса с использованием лигносульфонатной культуральной жидкости. Определен оптимальный состав питательной среды, включающей (г/л воды водопроводной): гидрофосфат аммония — 1; дигидрофосфат калия — 2; гидрофосфат калия — 0,1; хлорид калия — 1,5; сульфат магния — 0,5; сульфат аммония — 3; лигносульфонат — 2,5. Показано, что процесс культивирования дрожжей при температуре 35...40 °С и pH 5,0 позволял за 8...10 ч получать суспензию, содержащую 12...15 г/л сырых дрожжевых клеток, которые в дальнейшем можно сепарировать и использовать в практических целях. Изучены аминокислотный и жирнокислотный составы полученной биомассы, что подтвердило высокую биологическую ценность продукта, который может представлять интерес для использования в животноводстве.

Ключевые слова: отходы целлюлозно-бумажной промышленности, лигносульфонаты, пекарские дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*, биопереработка

Ссылка для цитирования: Иванкин А.Н., Зарубина А.Н. Биопереработка лигносульфонатов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 2. С. 94–106. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-94-106

Растительное сырье вызывает повышенный интерес у исследователей, поскольку является возобновляемым. Оно широко используется в различных отраслях промышленности [1, 2]. Его переработка сопровождается образованием значительного количества отходов. Например, в России, по литературным данным, таких отходов образуется порядка 200 млн м³ в год, из которых перерабатывается не более половины [3, 4].

Сложность биопереработки растительного сырья и получаемых отходов обусловлена их компонентным составом. Основной химический состав сырья растительного происхождения включает в себя целлюлозные полисахариды, лигнин, влагу и минеральные вещества [5–7]. В растительном сырье, также как и в других объектах природного происхождения, содержатся липиды и белок, которые можно использовать на практике в качестве компонентов пищевых систем [8, 9]. Углеводная часть растительного сырья может достаточно успешно

перерабатываться ферментными системами с целлюлазной и гидралазной активностями, на чем, основана вся мировая гидролизная промышленность. Лигниновые компоненты представляют собой настоящую проблему для биопереработки [10]. Ввиду наличия сложной, в основном, замещенной ароматической структуры и низкой реакционной способности к деполимеризации, лигниновые структуры с большим трудом ассимилируются в пищевых системах живых организмов [11, 12]. В связи с этим, лигнин является крупным, практически бросовым отходом производств, связанных с глубокой переработкой растительного и, в первую очередь, древесного сырья [13–15].

Лигниновые вещества образуются преимущественно на гидролизных и целлюлозно-бумажных производствах, связанных с глубоким химическим расщеплением биомассы растительного происхождения [16, 17]. При получении бумаги осуществляется сульфитная или сульфатная варка древесной щепы, в ходе которой содержащийся в измельченной древесной

массе лигнин частично преобразуется в лигносульфонаты, которые до настоящего времени не находят эффективного применения [18–20].

В основном, направление использования лигнина и лигносульфонатов как наиболее распространенного ароматического ресурса, сводятся к техническому использованию в качестве биотоплива [21], сорбентов и различных абсорбирующих материалов [22–24], диспергаторов бетона [25] и наполнителей композитов [26–28], а также структурообразователей почв [29]. То есть, имеется в виду и используется энергетическая или экономическая ценность, но не биологическая.

Лигнин и его производные представляют собой природный амфифильный биополимерный материал, который можно получать в неограниченных количествах из постоянно возобновляемого растительного сырья. Он обладает такими благоприятными свойствами, как нетоксичность, разлагаемость и биосовместимость. Производные лигнина проявляют антиоксидантные свойства и способность к поглощению УФ-излучения. Он имеет очень широкие перспективы применения. Однако гетерогенность и ограниченная реакционная способность лигнина являются основными препятствиями для развития его потенциальной ценности, что делает сам лигнин и его производные недоиспользуемым ресурсом биомассы [30, 31].

Практическое применение производных лигнина, как биосовместимого материала, может быть реализовано при получении биоэмульсий, что является достаточно важным фактором для медицины и биотехнологии в случае контакта с живыми системами. Такие эмульсии, стабилизированные микрочастицами или наночастицами, обеспечивают превосходную агрегатную стабильность и пониженное раздражение. Преимущества таких эмульсий делают их очень привлекательными, обеспечивая эффективный подход к реализации максимальной ценности лигнина как биосырья для экологически безопасного приготовления жидких систем. Частицы лигносульфонатов, так же как и самого лигнина, могут способствовать активному эмульгированию небольших компонентов в питательных средах при выращивании микроорганизмов, т. е. способствовать реализации механизма иммобилизации витаминов, аминокислот и моносахаров [31, 46].

Производные лигнина в последнее время все чаще используются в виде антикоррозионных составов при разработке экологически чистых покрытий. В них содержатся важнейшие экстрактивные компоненты, прежде всего, танины (дубильные вещества), представляю-

щие собой группу водорастворимых веществ ароматического характера на основе полифенольных соединений с большим количеством гидроксильных групп и молекулярной массой от 500 до 25 000, которые обладают характерными вяжущими свойствами, что придает им отличные ингибиторные свойства. Высокая защитная эффективность таких «зеленых» ингибиторов» проявляется в отношении многих металлов и сплавов. При их использовании скорость коррозии может снижаться в 8–10 раз, степень защиты может составлять более 80 %. Самовосстанавливающиеся экологически чистые покрытия для антикоррозионного применения обеспечивают более надежную защиту, чем пассивные покрытия, что смягчает загрязнение окружающей среды, возникающее в результате использования покрытий на основе нефтепродуктов. Благодаря своим собственным антикоррозионным свойствам лигнин является эффективным потенциальным предшественником для разработки самовосстанавливающихся антикоррозионных покрытий. Однако структурная жесткость лигнина и отсутствие функций самовосстановления в композиционных покрытиях на основе чистого лигнина препятствуют всестороннему применению лигнина в этой области, а лигносульфонаты могут выступать более подходящими компонентами антикоррозионных систем [30, 47–49].

Химические вещества, входящие в состав лигниновых производных, могут представлять интерес для использования в биотехнологии в качестве составных частей питательной среды. Определенные проблемы при проектировании питательных систем с использованием в качестве сырьевых компонентов лигносульфонатов связаны с дисперсностью в полиэлектролитной среде, поскольку в питательной жидкости содержатся как различные соли, так и нерастворимые фазообразующие частицы.

В последнее время в литературе уделяется достаточно много внимания синтезу различных наночастиц, использование которых позволяет существенно варьировать физико-химические свойства среды. Так, например, в пищевых системах для человека, благоприятная органолептическая восприимчивость пищи оценивается для дисперсности менее 100 мкм. Очевидно, что для микроорганизмов, задействованных в биотехнологии, имеющих номинальные размеры менее 0,2 мкм, проблема дисперсности среды переходит на нано уровень. Наночастицы на основе лигнина обладают огромным потенциалом для различных применений. Синтез сферических гибридных лигниновых наночастиц с настраиваемой

структурой пор осуществляют с использованием других полимерных соединений, например аминокислот, что приводит к образованию термочувствительных полиэлектролитных комплексов. При нагревании такие макрокомплексы подвергаются самосборке в однородные сферические наночастицы с минимальным индексом полидисперсности. Исследования показывают, что формирование наночастиц включает одновременный коллапс и их рост. Во время коллапса наночастицы становятся более компактными, увеличивая свое эластичное поведение и ингибируя коалесценцию, что имеет решающее значение для образования стабильных наночастиц с низкой дисперсностью [50].

Различные способы получения наночастиц приводят к получению систем для инкапсуляции диспергированных в жидкости компонентов. Такие термочувствительные полиэлектролитные комплексы на основе лигнина обеспечивают новое направление в технологиях контролируемого приготовления наночастиц на основе лигнина. Такие наночастицы демонстрируют многообещающий потенциал для практического применения с целью регулируемого инкапсулирования лекарств и физиологически активных компонентов питательных сред [23, 50].

Разработка питательных сред с включением лигносульфонатов для практического применения в биотехнологии предполагает учет роли и влияния неорганических солей. Древесина, как исходное сырье, характеризуется нативной зольностью на уровне 1–2 %. Массовая доля неорганических солей в древесине в виде остатка после сжигания (зола) обычно составляет от 0,2 до 1,5 % абсолютно сухих веществ (АСВ). В то же время состав основных элементов металлов может варьироваться и составлять, мг/кг: Na — 50; Mn — 200; Fe — 200; Ca — 700; Mg — 1500; K — до 3500. Такое природное соотношение биометаллов предопределяет привлекательность такого сырьевого источника в качестве питательной среды для микроорганизмов. Промышленные щелока, содержащие лигносульфонаты, включают в себя все эти природные компоненты с соответствующим составом, кроме натрия или кальция, наличие которых в технических продуктах лигносульфонатов достаточно высокое из-за использования химических веществ в процессе регулирования pH среды [30].

Лигносульфонаты как преобразованные структурные компоненты растений содержат биodeградируемые фрагменты сахаров, которые могут использоваться микроорганизмами в качестве питательных субстратов. Сюда

относятся такие моносахара, как глюкоза, манноза, галактоза, ксилоза и другие структурные аналоги с гликозидными циклами. Причем, моносахара в составе промышленно получаемых лигносульфонатных отходов, содержатся в основном как примеси. Их образование в щелоках в основном обусловлено деградацией целлюлоз. Исходя из этого биотехническая переработка лигносульфонатов представляет интерес с точки зрения решения проблем экологии, в частности утилизации лигнинов в отвалах и потенциального применения бросового сырья для наработки полезной биомассы.

В окружающей природной среде существуют живые организмы, способные разлагать лигнин и его производные — бактерии, грибы и некоторые виды земляных червей. Наиболее активные группы микроорганизмов, разрушающих лигнин, относятся к древоразрушающим базидиомицетам, образующим на древесине белую гниль. Среди грибов, разлагающих древесину в природе, есть и съедобные, прежде всего опята, вешенки и шампиньоны. Грибы как активные биопреобразователи выделяют широкий спектр ферментов, вызывающих дефрагментацию лигниновой структуры с последующей природной утилизацией [30, 31]. Некоторые виды грибов, в частности грибы белой гнили, катализируют полное разложение лигнинов до диоксида углерода и воды. Этот процесс происходит в природе достаточно медленно и приводит к разрушению погибших растений [32].

Бактерии разлагают лигнин не так активно, хотя они сами по себе менее требовательны к условиям культивирования в биотехнологических процессах. Лигнолитические бактерии присутствуют в рубце крупного рогатого скота, способствуя перевариванию одревесневших частей растений растительных компонентов в животных кормах.

В пищевой промышленности широко используются так называемые пекарские дрожжи вида *Saccharomyces cerevisiae*. Они относятся к домену эукариотов подцарства высших грибов класса сахаромицетов. Дрожжи — это мезофильные микроорганизмы с обычным температурным оптимумом роста 35,5 °C и pH от 4,0 до 4,5. В диапазоне температуры 30...36 °C удельная скорость роста клеточной биомассы возрастает прямо пропорционально повышению температуры. При температуре 45...60 °C дрожжи могут инактивироваться, что приводит к их гибели [33, 38].

В биопроцессах, протекающих в природе, микроорганизмы потребляют практически все виды органического сырья природного проис-

хождения. При культивировании штаммов-продуцентов, применяемых в практической биотехнологии, используются разные виды бросового сырья, которые в основном являются отходами сельскохозяйственного производства. Для целевого осуществления процесса биосинтеза в ферментерах обычно требуется использование достаточно эффективных видов сырья, которые представляют повышенный интерес с точки зрения их питательности при активном выращивании клеток микроорганизмов.

Для приготовления питательных сред в биотехнологии используют сырье как минеральное, так и животного или растительного происхождения. В ряде биотехнических процессов применяют также синтетические субстраты, которые специально синтезируют химическим путем. Они не должны содержать вредных примесей, способных задерживать или ингибировать скорость роста микроорганизмов [44].

При выборе сырья необходимо учитывать его влияние на себестоимость продукции, так как в микробиологическом синтезе важное значение имеет стоимость исходных веществ и материалов. В биотехнологии применяют различные виды, как правило, наиболее дешевых отходов. Например, используют продукты переработки кукурузы, различных зерновых и кормовых культур. То есть негодное на пищевые цели вторичное сырье. Питательная ценность такого сырья для микроорганизмов определяется содержащимися в нем биоэлементами, прежде всего углеродом и азотом. Наличие минорных примесей серы и фосфора в питательной среде также повышает их ценность для микроорганизмов, но только в случае реальных концентраций не превышающих порога токсичности.

В качестве источников углерода чаще всего используют простые высокопитательные моноуглеводы (глюкоза, сахароза, лактоза), сложные углеводы, легко деградирующие до моноуглеводов (крахмал, альгинаты) или богатые углеводами натуральные продукты (меласса, кукурузная мука, гидроль и др.), а также жиры и даже вещества, содержащие углеводороды (нефть, парафин, керосин, природный газ, метан и др.).

Источником азота обычно выступают неорганические соли — сульфат аммония, двузамещенный фосфат аммония, аммиак, нитраты, а также мочевины или натуральные продукты — кукурузный экстракт, соевая мука, дрожжевой автолизат и тому подобные виды сельхозсырья [10, 39].

Если необходимо использовать сложные природные вещества или промышленные побочные продукты, они должны быть тщательно

проверены биохимически на пригодность в качестве исходных веществ на ферментационных стендах или в лабораторных условиях. Практика показывает, что технологические свойства, например, мелассы и кукурузного экстракта при хранении улучшаются в результате протекающих в них биохимических и микробиологических процессах. То есть выдержка сырья при определенной, как правило, комнатной температуре приводит к условному гидролитическому распаду компонентов с появлением в сырье дополнительных веществ высокой биологической ценности. Однако слишком длительное хранение, особенно при возможности разбавления (дождевая вода, конденсат пара), ведет к порче исходных продуктов [36, 38, 44, 45].

В научной литературе недостаточно сведений об использовании в биотехнологии лигнина и его производных в качестве субстратов. Наличие доступных и хорошо изученных дрожжевых культур позволяет рассматривать потенциальную возможность их культивирования с использованием отходов целлюлозно-бумажной промышленности, в частности лигносульфонатов.

Цель работы

Цель работы — разработка методологии осуществления биотехнологического процесса переработки бросовых растительных отходов — лигносульфонатов с использованием метода культивирования доступных дрожжевых культур.

Материалы и методы

В качестве основного объекта исследования были использованы отходы целлюлозно-бумажной промышленности — лигносульфонаты по ТУ 13–0281036-029–94, а также дрожжи пекарские вида *Saccharomyces cerevisiae* по ГОСТ 54845.

Лигносульфонатное сырье имеет следующие характеристики: массовая доля сухих веществ 48 %; плотность 0,4 г/см³; массовая доля влаги 3 %; pH 1%-го раствора 4,5; массовая доля сахаров по антрону 8,5 % [34].

Состав углеводов с использованием стандартов сахаров: арабинозы (Ara), галактозы (Gal), глюкозы (Glc), ксилозы (Xyl), маннозы (Man), фруктозы (Fru), рибозы (Rib), сахарозы (Sug) и лактозы (Lac) определяли методом высокоэффективной анионообменной хроматографии [35] на хроматографической системе BioLC

производства Dionex (Германия), включающей в себя: градиентный насос GS50, электрохимический детектор ED50, генератор элюента EG50 Generator с 10 mN NaOH, хроматографический термостат LC25 с колонкой CarboPac PA20 производства Dionex [34].

Аминокислотный анализ, состав жирных кислот и другие физико-химические показатели определяли стандартными методами [34, 36].

Для получения необходимой биомассы дрожжей процесс культивирования осуществляли в лабораторном ферментере при pH 4,5...5,0 и температуре 35...45 °C в питательной среде, содержащей 10 г/л лигносульфоната, 1 г/л сульфата магния и 2 г/л хлорида калия. Поддерживали pH добавлением 10%-го раствора глюкозы и 25%-го раствора гидроксида аммония. Контроль процесса осуществляли спектрофотометрически при длине волны $\lambda = 546$ нм. Пенoгашение обеспечивалось олеиновой кислотой. Необходимую стерилизацию сред с лигносульфонатом осуществляли прогреванием при температуре 105 °C в течение 30 мин.

Результаты и обсуждение

Суть осуществления эксперимента заключалась в установлении возможности эффективного накопления дрожжевой биомассы на бросовом субстрате, т. е. утилизации лигносульфоната в дрожжевой белок, который можно использовать в качестве питательной кормовой добавки.

Для эффективного культивирования дрожжей необходимо наличие в питательной среде достаточного количества ассимилируемых углеводов. При гидролитическом расщеплении древесного сырья из 100 г древесины можно получить до 45 г сахаров, 5 г ксилоолигосахаров и 25 г лигносульфонатов [37].

Практически в результате любого процесса химической переработки древесного или иного растительного сырья происходит образование большого количества лигносульфонатов. Их формирование приводит к получению продукта с достаточно высоким содержанием свободных углеводов. В частности, мы использовали сухой промышленный лигносульфонат, содержащий более 8 % углеводов. Изучение состава свободных углеводов показало, что соотношение основных углеводов Ara : Gal : Glc : Man : Xyl : Rib : Lac было равным 1 : 1,6 : 1,8 : 6,4 : 12,5 : 0,1 : 0,02, что потенциально представляет хорошую основу для использования в качестве питательного компонента при культивировании любых видов дрожжей.

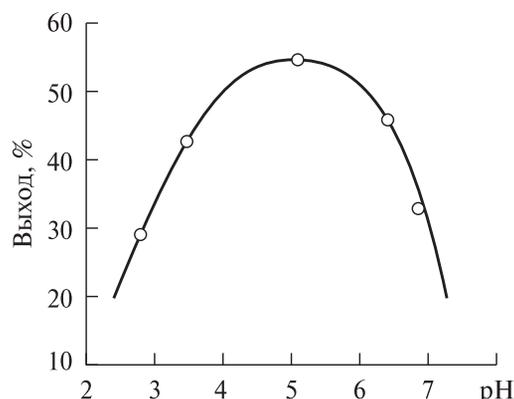


Рис. 1. Зависимость выхода клеточной биомассы пекарских дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* от величины pH (время 6 ч, температура 40 °C)

Fig. 1. Yield dependence of *Saccharomyces cerevisiae* cell biomass on the pH value (time 6 h, temperature 40 °C)

В литературе имеются данные об использовании лигносульфоната для активизации образования активного ила [38]. Было показано, что при культивировании вторичного микробиологического ила в ходе биологической очистки сточных вод на очистных сооружениях, максимальный выход липидных продуктов на уровне 200 мг/г сухих веществ (СВ) достигался в среде, содержащей около 60 мг лигносульфоната на 1 г СВ на четвертые сутки ферментации, против контроля без применения лигносульфонатов на уровне 90 мг/г СВ, т. е. использование незначительного количества лигносульфоната в качестве добавки в питательную среду позволило более чем в 2 раза увеличить выход биомассы и содержащихся в ней целевых веществ [38].

На основании литературных данных было принято решение вводить в питательную среду лигносульфонаты в количестве 2,5 г/л.

Для выращивания культуры *S. cerevisiae* применяли питательную среду с использованием воды водопроводной, содержащую следующие компоненты, г/л: $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ — 1; KH_2PO_4 — 2; K_2HPO_4 — 0,1; KCl — 1,5; MgSO_4 — 0,5; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ — 3; лигносульфонат — 2,5.

Культивирование проводилось в течение 8 ч при поддержке уровня pH, которое понижали с первоначального значения pH = 6,2 до pH = 5,0. Необходимый уровень pH поддерживали путем дробного добавления раствора глюкозы и аммиака.

На рис. 1 показана зависимость выхода биомассы, оцениваемая по изменению величины оптической плотности культуральной жидкости. Из данных рис. 1 видно, что культивирование дрожжей в присутствии лигносульфонатов происходит с оптимумом pH в районе $5,0 \pm 0,1$, что соответствует литературным данным.

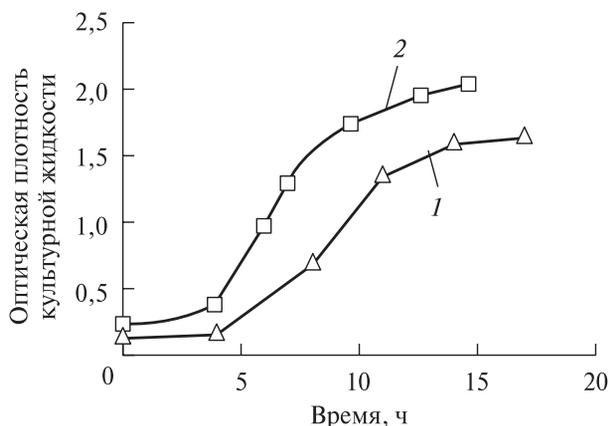


Рис. 2. Выход дрожжевой биомассы в культуральной жидкости (КЖ) во времени в присутствии лигносульфонатов при температуре 40 °С: 1 — эксперимент 1; 2 — повторный эксперимент 2

Fig. 2. Yeast biomass yield in culture liquid (CL) over time in the presence of lignosulfonates at a temperature of 40 °С: 1 — experiment 1; 2 — repeated experiment 2

Температуру ферментации поддерживали на уровне 45 °С, поскольку известно, что снижение температуры роста дрожжей приводит к увеличению выхода в продукте не только белка, но и рибонуклеиновых кислот (РНК) [39]. Увеличение температуры ведет к снижению активности дрожжевых клеток и их гибели. Рост содержания белка можно рассматривать как положительный фактор в случае использования биомассы в кормовых целях, а наличие избыточной РНК может неоднозначно влиять на качество получаемого в дальнейшем корма [40].

На рис. 2 показана зависимость выхода биомассы для двух независимых экспериментов от времени ведения процесса, оцениваемая по превышению оптической плотности среды культуральной жидкости (КЖ) по отношению к исходному состоянию.

Для увеличения выхода биомассы использовали также известный метод подпитки через 6...8 ч путем добавления 10 % по объему свежей среды, содержащей только 2,5 г/л лигносульфонатов и 10 г/л глюкозы. Трехкратное повторение операции позволяло увеличивать выход дрожжевой биомассы более чем в 3,5 раза. В табл. 1 представлены результаты оценки превышения значений оптической плотности среды при $\lambda = 546$ нм по сравнению с началом культивирования дрожжей. Процесс ферментации стимулировали подпиткой через 8 и 16 ч от начала, что позволяло, несмотря на исчерпание питательности культуральной жидкости, обеспечивать относительно равномерное увеличение накопления биомассы. Индекс превышения 3,5 примерно соответствует

Таблица 1

Изменение превышения оптической плотности среды по отношению к исходной культуральной жидкости во времени, усл. ед.
Change in the excess of optical density of the medium in relation to the initial culture liquid over time, conventional units

Эксперимент	Время, ч						
	0	4	8	12	16	20	24
Ферментация в присутствии лигносульфонатов	1,0	0,8	1,7	2,1	2,4	3,3	3,6
Контроль процесса без лигносульфонатов	1,0	0,5	1,3	1,6	1,8	2,2	2,7

Таблица 2

Аминокислотный состав дрожжей, выращенных с использованием лигносульфонатов, в граммах на 100 г белка

Amino acid composition of yeast grown using lignosulfonates, g/100 g protein

Аминокислота	Содержание
Незаменимые	
Валин	5,9
Изолейцин	3,8
Лейцин	6,3
Лизин	5,5
Метионин	1,3
Тирозин	4,6
Треонин	4,6
Триптофан	1,7
Фенилаланин	5,9
Цистин	1,1
Заменимые	
Аланин	7,3
Аргинин	6,2
Аспагагин	9,4
Гистидин	3,7
Глицин	4,9
Глутамин	13,5
Пролин	4,2
Серин	5,7

концентрации сырых клеток 12 г/л. В контрольном варианте осуществляли подпитку путем добавления стерильного раствора глюкозы.

По данным из табл. 1 видно, что использованный режим культивирования пекарских дрожжей *S. cerevisiae* на среде с лигносуль-

Т а б л и ц а 3

**Жи́рно́кислотный состав дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*,
выращенных с использованием лигносульфонатов, % от суммы**
**Fatty acid composition of yeast *Saccharomyces cerevisiae* grown using
lignosulfonates, % of the total**

Наименование жирных кислот	Дрожжи, выращенные на среде, содержащей лигносульфонаты	Дрожжи, выращенные на питательной среде без лигносульфонатов
Капроновая C6:0	0,06	0,07
Каприловая C8:0	0,17	0,21
Каприновая C10:0	0,28	0,18
Ундециловая C11:0	0,06	0,06
Лауриновая C12:0	0,31	0,34
Тридекановая C13:0	0,22	0,22
Миристиновая C14:0	1,26	1,31
Миристолеиновая C14:1	0,27	0,25
Пентадекановая C15:0	0,08	0,11
Цис-10-пентадеценовая C15:1	0,37	0,36
Пальмитиновая C16:0	15,24	16,11
Пальмитолеиновая C16:1	3,42	3,42
Маргариновая C17:0	0,61	0,62
Гептадеценовая C17:1	0,53	0,49
Стеариновая C18:0	7,7	9,33
Олеиновая C18:1	27,1	28,2
Линолевая C18:2 ω6	23,2	21,2
α-Линоленовая C18:3 ω3	1,56	0,47
Нондекановая C19:0	0,45	0,43
Арахидиновая C20:0	0,32	0,33
Арахидононовая C20:4 ω6	0,08	1,13
Тимнодононовая C20:5 ω3	2,23	1,07
Эйкозодиеновая C20:2 ω6	0,35	0,42
Эйкозатриеновая C20:3 ω3	0,18	0,13
Гондоиноновая C20:1 ω9	0,35	0,29
Бегеновая C22:0	0,56	0,63
Докозодиеновая C22:2 ω6	0,09	1,72
Докозагексаеновая C22:6 ω3	0,28	0,14
Эруковая C22:1 ω9	0,32	0,3
Нервоновая C24:1 ω9	0,15	0,22
Лигноцериновая C24:0	0,38	0,77

фонатами позволяет получать культуральную жидкость, содержащую 12...15 г/л клеток дрожжей, а присутствие лигносульфонатов, по-видимому, обеспечивает достаточную питательность среды.

Выполнен аминокислотный анализ белковой части продукта (табл. 2), который практически соответствует описанному в литературе аминокислотному составу дрожжей рода *Saccharomyces cerevisiae* [36]. Использование лигносульфонатов, содержащих ароматические структуры, в качестве компонента питательной среды, очевидно, привело к несколько повышенному содержанию в дрожжевом белке незаменимых ароматических аминокислот:

тирозина, триптофана и фенилаланина, что потенциально увеличило питательную ценность белкового продукта при его использовании в составе кормов для животноводства.

Анализ жирнокислотного состава липидов дрожжей, представленный в табл. 3, показал, что в полученной дрожжевой биомассе содержатся все необходимые жирные кислоты, характерные для дрожжевых культур [41, 42]. В литературе неоднократно отмечался факт зависимости содержания жирных кислот в дрожжевых липидах в зависимости от состава питательной среды, в которой происходит культивирование дрожжей. В данном случае следует отметить, что добавление в питательную

среду лигносульфонатов как отхода целлюлозно-бумажного производства привело к тому, что в жирнокислотном составе дрожжей, массовая доля омега-3 жирных кислот оказалась несколько выше, чем их содержание в биомассе *S. cerevisiae*, выращенной на среде без лигносульфонатов.

В современной теории питания фактор наличия омега-3 жирных кислот отмечается как благоприятный для развития и функционирования живых организмов, особенно к возрастному концу своего существования [43]. Добавление в питательную среду лигносульфонатов, по-видимому, сказалось на характере биосинтеза в дрожжевых клетках в направлении преимущественного образования омега-3 жирных кислот, что может рассматриваться как положительный фактор с точки зрения последующего использования дрожжевого продукта в составе питательных систем.

Полученную культуральную жидкость можно использовать в качестве жидкого кормового продукта. Для получения целевого продукта в твердом состоянии выращенную дрожжевую суспензию подвергали распылительной сушке и получали порошок плотностью 0,6 г/см³ с содержанием белка по Кьельдалю более 65 %.

Основные свойства сухого дрожжевого продукта, полученного с использованием лигносульфонатов могут быть представлены:

Массовая доля белка, %	65,8
Массовая доля липидов, %	8,3
Содержание золы, %	11,2
Содержание влаги, %	12,5.

Достаточно высокая степень содержания белка со сбалансированным наличием всех необходимых для полноценного питания аминокислот, а также благоприятный жирнокислотный состав дрожжевых липидов позволяет оценивать получаемый продукт как достаточно перспективный для дальнейшего получения на его основе питательных композиций.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований было показано, что отходы переработки древесной биомассы, образующиеся в процессе получения щелоков в целлюлозно-бумажном производстве, могут быть эффективно переработаны в дрожжевой белок, представляющий интерес, например, для получения животных кормов.

Разработана методология биотехнологического процесса переработки лигносульфонатов с использованием метода глубинного культиви-

рования доступных дрожжевых культур. Определены оптимальные условия ведения процесса. Получен дрожжевой продукт с удовлетворительными физико-химическими характеристиками.

Список литературы

- [1] Wang Y., Lyu B., Fu H., Li J., Ji L., Gong H., Zhang R., Liu J., Yu H. The development process of plant-based meat alternatives: Raw material formulations and processing strategies // *Food Research International*, 2023, v. 167, no. 5, p. 112689. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112689>
- [2] Zhang J., Meng Z., Cheng Q., Li Q., Zhang Y., Li L., Shi A., Wang Q. Plant-based meat substitutes by high-moisture extrusion: Visualizing the whole process in data systematically from raw material to the products // *J. of Integrative Agriculture*, 2022, v. 21, no. 8, pp. 2435–2444. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63892-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63892-3)
- [3] Леонтович В.П. Растительные отходы и перспективы их использования // *Кормопроизводство*, 2010. № 1. С. 44–46.
- [4] Wang Q., Zhang Y., Ma K. Study of the differences in collection scope of raw materials of biomass CHP plants caused by regional factors // *J. of Environmental Management*, 2024, v. 360, no. 6, p. 121106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121106>
- [5] Zhang K., Zhang W., Xie W., Luo Y., Wei G. Investigation of mechanical properties, chemical composition and microstructure for composite cementitious materials containing waste powder recycled from asphalt mixing plants // *J. of Building Engineering*, 2024, v. 96, no. 11, p. 110362. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110362>
- [6] Кузнецова Т.Г., Иванкин А.Н., Куликовский А.В. Наносенсорный анализ мясного сырья и растительных объектов. Саарбрюккен: LAP LAMBERT, 2012. 232 с.
- [7] Bouzid H.A., Ibourki M., Hamdouch F., Oubannin S., Asbbane A., Hallouch O., Bijla L., Koubachi J., Majourhat K., Gharby S. Moroccan aromatic and medicinal plants: A review of economy, ethnobotany, chemical composition, and biological activities of commonly used plants // *Food and Humanity*, 2024, v. 2, no. 5. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100259>
- [8] Vaglica A., Porrello F., Ilardi V., Bruno M. The essential oil chemical composition of a rare ethnopharmacological plant // *Natural Product Research*. 2024, no. 7. <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2377310>
- [9] Иванкин А.Н., Чернуха И.М., Кузнецова Т.Г. О качестве растительных и животных жиров // *Масложировая промышленность*, 2007. № 2. С. 8–11.
- [10] Puss K.K., Paaver P., Loog M., Salmar S. Ultrasound effect on a biorefinery lignin-cellulose mixture // *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, v. 111, no. 12, p. 107071. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107071>
- [11] Lan H.N., Liu R.Y., Liu Z.H., Li X., Li B.Z., Yuan Y.J. Biological valorization of lignin to flavonoids // *Biotechnology Advances*, 2023, v. 64, no. 5, p. 108107. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108107>

- [12] Pham C.D., Dang M.D.T., Ly T.B., Tran K.D., Vo N.T., Do N.H.N., Mai P.T., Le P.K. A review of the extraction methods and advanced applications of lignin-silica hybrids derived from natural sources // *International J. of Biological Macromolecules*, 2023, v. 230, no. 3, p. 123175. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123175>
- [13] Teo H.L., Wahab R.A., Zainal-Abidin M.H., Mark-Lee W.F., Susanti E. Co-production of cellulose and lignin by Taguchi-optimized one-pot deep eutectic solvent-assisted ball milling pretreatment of raw oil palm leaves // *International J. of Biological Macromolecules*, 2024, v. 280, no. 11, p. 135787. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135787>
- [14] Hou Q., Liu Z., Shi Z., Yang H., Wang D., Yang J. A deep eutectic solvent pretreatment with self-cleaning lignin droplets function to efficiently improve the enzymatic saccharification and ethanol production of bamboo residues // *Industrial Crops and Products*, 2024, v. 216, no. 9, p. 118730. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118730>
- [15] Brienza F., Cannella D., Montesdeoca D., Cybulska I., Debecker D.P. A guide to lignin valorization in biorefineries: traditional, recent, and forthcoming approaches to convert raw lignocellulose into valuable materials and chemicals // *RSC Sustainability*, 2024, v. 2, no. 1, pp. 37–90. <https://doi.org/10.1039/d3su00140g>
- [16] Frias M., Reynoso S., Rambhia S., Noki G., Olson J., Stoeber B., Trajano H.L. Effect of incubation conditions of cellulase hydrolysis on mechanical pulp fibre morphology // *Carbohydrate Polymers*, 2024, v. 344, no. 10, p. 122529. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122529>
- [17] Jia W., Zhou M., Yang C., Zhang H., Niu M., Shi H. Evaluating process of auto-hydrolysis prior to kraft pulping on production of chemical pulp for end used paper-grade products // *J. of Bioresources and Bioproducts*, 2022, v. 7, no. 8, pp. 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.05.002>
- [18] Liu H., Xu S., Li H., He Y. Exploring the dual effect of sodium lignosulfonate-modified LDH treatment and heat processing on elevating corrosion and wear resistance of Ni-W composite coatings // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, v. 702, part 2, no. 12, p. 135076. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135076>
- [19] Demuner I.F., Gomes B.J.B., Gomes J.S., Coura M.R., Borges F.P., Carvalho A.M., Silva C.M. Improving kraft pulp mill sustainability by lignosulfonates production from processes residues // *J. of Cleaner Production*, 2021, v. 317, no. 10, p. 128286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128286>
- [20] Song Y., Zhong S., Li Y., Dong K., Luo Y., Chu G., Zou H., Sun B. Study on the catalytic degradation of sodium lignosulfonate to aromatic aldehydes over nano-CuO: Process optimization and reaction kinetics // *Chinese J. of Chemical Engineering*, 2023, v. 53, no. 1, pp. 300–309. doi.org/10.1016/j.cjche.2021.12.028
- [21] Wang J., Jiao H., Gao S., Wei J., Yu F., Xie C., Yuan B., Yu S. Potential high-energy-density biofuels from α -pinene and lignin-based phenols via alkylation and subsequent hydrodeoxygenation // *Fuel*, 2024, v. 374, no. 10, p. 132513. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132513>
- [22] Liang G., Zhang S., Xian Y., Chen L. Depressing molybdenite using calcium lignosulfonate in Cu-Mo flotation separation: Interaction and desorption insights // *Advanced Powder Technology*, 2024, v. 35, no. 11, p. 104665. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104665>
- [23] Stanisław M., Smulek W., Popielski K., Kłapiszewski L., Kaczorek E., Jesionowski T. Sustainable design of lignin-based spherical particles with the use of green surfactants and its application as sorbents in wastewater treatment // *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, v. 172, no. 8, pp. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.chemd.2021.05.028>
- [24] Xu Y., Ding H., Luo C., Zheng Y., Xu Y., Li X., Zhang Z., Shen S., Zhang L. Effect of lignin, cellulose and hemicellulose on calcium looping behavior of CaO-based sorbents derived from extrusion-spherization method // *Chemical Engineering J.*, 2018, v. 334, no. 2, pp. 2520–2529. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.160>
- [25] Patel R., Babaei-Ghazvini A., Dunlop M.J., Acharya B. Biomaterials-based concrete composites: A review on biochar, cellulose and lignin // *Carbon Capture Science & Technology*, 2024, v. 12, no. 9, p. 100232. <https://doi.org/10.1016/j.ccsst.2024.100232>
- [26] Yang S., Li Y., Yang Y., Liu R., Zhao Y. Behavior of calcium lignosulfonate under oxygen pressure acid leaching condition // *Hydrometallurgy*, 2024, v. 227, no. 8, p. 106317. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106317>
- [27] Feizi Z.H., Kazzaz A.E., Kong F., Fatehi P. Evolving a flocculation process for isolating lignosulfonate from solution // *Separation and Purification Technology*, 2019, v. 222, no. 9, pp. 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.04.042>
- [28] Cave G., Fatehi P. Separation of lignosulfonate from spent liquor of neutral sulphite semichemical pulping process via surfactant treatment // *Separation and Purification Technology*, 2015, v. 151, no. 9, pp. 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.017>
- [29] Yang J., Xing S., Yang W., Zhang A., Wang W. Application potential of modified waste-lignin as microbial immobilization carriers for improve soil fertility // *Reactive and Functional Polymers*, 2024, v. 196, no. 3, p. 105837. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2024.105837>
- [30] Кононов Г.Н. Дендрохимия. Химия, нанохимия и биогеохимия компонентов клеток, тканей и органов древесных растений, в 2 т. М: МГУЛ, 2015. 1112 с.
- [31] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Миронов Д.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть I // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 1. С. 97–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-97-113
- [32] Kiviniemi E., Mikkola A., Mattila H., Wahlsten M., Lundell T. Oxidative stress and culture atmosphere effects on bioactive compounds and laccase activity in the white rot fungus *Phlebia radiata* on birch wood substrate // *Current Research in Microbial Sciences*, 2024, v. 7, p. 100280. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100280>
- [33] Grellet M.A., Dantur K.I., Perera M.F., Ahmed P.M., Castagnaro A., Arroyo-Lopez F.N., Gallego J.B., Welin B., Ruiz M.R. Genotypic and phenotypic characterization of industrial autochthonous *Saccharomyces cerevisiae* for the

- selection of well-adapted bioethanol-producing strains // *Fungal Biology*, 2022, v. 126, no. 10, pp. 658–673. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2022.08.004>
- [34] Иванкин А.Н., Олиференко Г.Л., Куликовский А.В. Аналитическая химия. М.: КНОРУС, 2021. 300 с.
- [35] ГОСТ Р 51880–2002. Определение массовых долей свободных и общих углеводов. Метод высокоэффективной анионной хроматографии. М.: Издательство стандартов, 2002. 12 с.
- [36] Лисицын А.Б., Иванкин А.Н., Неклюдов А.Д. Методы практической биотехнологии. М.: Изд-во ВНИИМП, 2002. 408 с.
- [37] Huang C., Jeuck B., Du J., Yong Q., Chang H., Jameel H., Phillips R. Novel process for the coproduction of xylo-oligosaccharides, fermentable sugars, and lignosulfonates from hardwood // *Bioresource Technology*, 2016, v. 219, no. 11, pp. 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.051>
- [38] Wang Z., Li X., Liu H., Zhou T., Li J., Siddiqui M.A. Enhanced short-chain fatty acids production from anaerobic fermentation of secondary sludge by lignosulfonate addition: Towards circular economy // *J. of Cleaner Production*, 2024, v. 434, no. 1, p. 140252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140252>
- [39] Меледина Т.В., Давыденко С.Г. Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae*. Морфология, химический состав, метаболизм. СПб.: Изд-во Университета ИТМО, 2015. 88 с.
- [40] Косолапов В.М., Чуйков В.А., Худякова Х.К., Косолапова В.Г. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа. М.: Угрешская типография, 2019. 272 с.
- [41] Morales-Palomo S., Tomás-Pejó E., González-Fernández C. Phosphate chelation over calcium impacts yeast growth and lipid production from short-chain fatty acids-rich media // *Environmental Technology & Innovation*, 2024, v. 36, no. 11, p. 103767. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103767>
- [42] Huang H., Xu J., Sheng Z., Xie R., Zhang H., Chen N., Li S. Effects of dietary phospholipids on growth performance, fatty acid composition, and expression of lipid metabolism related genes of juvenile hybrid // *Aquaculture Reports*, 2022, v. 22, no. 2, p. 100993. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100993>
- [43] Veerasamy V., Neethirajan V., Singarayar M.S., Balasundaram D., Dharmar P., Thilagar S. Microalgal biomass and lipid synergy for omega fatty acid enrichment: A sustainable source for food supplements & nutraceuticals // *Algal Research*, v. 80, no. 6, p. 103514. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103514>
- [44] Di Caprio F. Cultivation processes to select microorganisms with high accumulation ability // *Biotechnology Advances*, 2021, v. 49, no. 7, p. 107740. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107740
- [45] Deive F.J., Sanroman M.A. Bioreactor development for the cultivation of extremophilic microorganisms // *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Bioprocesses, Bioreactors and Controls* / Eds. Larroche C. et al. Elsevier, 2017, 816 p. doi.org/10.1016/B978-0-444-63663-8.00014-8
- [46] Xu J., Zhou J., Du B., Li X., Huang Y., Cao Q., Xu S., Wang W. Research progress on the preparation and application of lignin-based Pickering emulsions: A review // *Industrial Crops and Products*, 2024, v. 222, no. 12, p. 119723. doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119723
- [47] Ivankin A.N., Olfierenko G.L. Corrosion inhibition with green polymer systems and natural compounds // *Polymer Science, Series D*, 2024, v. 17, no. 4, pp. 987–994. DOI: 10.1134/S1995421224701697
- [48] Иванкин А.Н., Олиференко Г.Л., Устюгов А.В. Кислотная деградация древесных отходов как способ получения целевых продуктов // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2024. Т. 28. № 4. С. 130–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-130-137
- [49] Wang J., Seidi F., Shi X., Li C., Huang Y., Xiao H. Unveiling the potential of dual-extrinsic/intrinsic self-healing lignin-based coatings for anticorrosion applications // *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, v. 285, no. 1, p. 138073. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138073
- [50] Yin Y., Qin S., Deng S., Li Z., Tang A., Li Q., Liao D., Liu Y. Thermoresponsive lignin-based polyelectrolyte complexes for the preparation of spherical nanoparticles: Application in pesticide encapsulation // *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, v. 288, no. 2, p. 138623. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138623

Сведения об авторах

Иванкин Андрей Николаевич  — д-р хим. наук, академик МАН ВШ, профессор кафедры химии и химических технологий лесного комплекса, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), aivankin@bmstu.ru

Зарубина Анжелла Николаевна — канд. техн. наук, зав. кафедрой химии и химических технологий лесного комплекса, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zarubina@bmstu.ru

Поступила в редакцию 29.10.2024.

Одобрено после рецензирования 19.12.2024.

Принята к публикации 06.02.2025.

LIGNOSULFONATES BIOPROCESSING

A.N. Ivankin[✉], A.N. Zarubina

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institut'skaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

aivankin@inbox.ru

The lignin liquors recycling method to obtain yeast biomass by using the producer of baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae* in the course of biosynthesis on a nutrient medium including waste from the pulp and paper industry such as lignosulfonates is described. It is shown that lignosulfonate, as a product of processing wood biomass, can be utilized in the process of bioprocessing in the presence of yeast into nutritious biomass, which is a protein ingredient for subsequent balancing, for example, of animal feed. Analysis of the carbohydrate composition of free sugars in the lignosulfonate part of the initial nutrient medium showed that the ratio of the main carbohydrates: arabinose, galactose, glucose, mannose, xylose, ribose and lactose was 1 : 1,6 : 1,8 : 6,4 : 12,5 : 0,1 : 0,02, which is likely to be used as a nutrient component in biotechnology. The methodology of biosynthesis was determined, optimal conditions for the process using lignosulfonate culture fluid were found, including (g/l of tap water): ammonium hydrogen phosphate — 1; potassium dihydrogen phosphate — 2; potassium hydrogen phosphate — 0,1; potassium chloride — 1,5; magnesium sulfate — 0,5; ammonium sulfate — 3; lignosulfonate — 2,5. It was shown that the process of yeast cultivation at a temperature of 35...40°C and pH 5,0 allowed obtaining a suspension containing 12...15 g/l of raw yeast cells in 8...10 hours, which can then be separated and used. The study of the amino acid and fatty-acid composition of the biomass confirmed the high biological value of the product, which may be of interest for use in cattle breeding.

Keywords: pulp and paper industry waste, lignosulfonates, baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae*, biorefining

Suggested citation: Ivankin A.N., Zarubina A.N. *Biopererabotka lignosul'fonatov* [Lignosulfonates bioprocessing]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 2, pp. 94–106.

DOI: 10.18698/2542-1468-2025-2-94-106

References

- [1] Wang Y., Lyu B., Fu H., Li J., Ji L., Gong H., Zhang R., Liu J., Yu H. The development process of plant-based meat alternatives: Raw material formulations and processing strategies. *Food Research International*, 2023, v. 167, no. 5, p. 112689. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112689>
- [2] Zhang J., Meng Z., Cheng Q., Li Q., Zhang Y., Li L., Shi A., Wang Q. Plant-based meat substitutes by high-moisture extrusion: Visualizing the whole process in data systematically from raw material to the products. *J. of Integrative Agriculture*, 2022, v. 21, no. 8, pp. 2435–2444. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(21\)63892-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63892-3)
- [3] Leontovich V.P. *Rastitel'nye otkhody i perspektiva ikh ispol'zovaniya* [Plant waste and prospects for their use]. *Kormoproizvodstvo* [Feed Production], 2010, no. 1, pp. 44–46.
- [4] Wang Q., Zhang Y., Ma K. Study of the differences in collection scope of raw materials of biomass CHP plants caused by regional factors. *J. of Environmental Management*, 2024, v. 360, no. 6, p. 121106. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121106>
- [5] Zhang K., Zhang W., Xie W., Luo Y., Wei G. Investigation of mechanical properties, chemical composition and microstructure for composite cementitious materials containing waste powder recycled from asphalt mixing plants. *J. of Building Engineering*, 2024, v. 96, no. 11, p. 110362. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.110362>
- [6] Kuznetsova T.G., Ivankin A.N., Kulikovskiy A.V. *Nanosensorny analiz myasnogo syr'ya i rastitel'nykh ob'ektov* [Nanosensory analysis of meat raw materials and plant objects]. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2012, 232 p.
- [7] Bouzid H.A., Ibourki M., Hamdouch F., Oubannin S., Asbbane A., Hallouch O., Bijla L., Koubachi J., Majourhat K., Gharby S. Moroccan aromatic and medicinal plants: A review of economy, ethnobotany, chemical composition, and biological activities of commonly used plants. *Food and Humanity*, 2024, v. 2, no. 5. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100259>
- [8] Vaglica A., Porrello F., Ilardi V., Bruno M. The essential oil chemical composition of a rare ethnopharmacological plant. *Natural Product Research*. 2024, no. 7. <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2377310>
- [9] Ivankin A.N., Chernukha I.M., Kuznetsova T.G. *O kachestve rastitel'nykh i zhivotnykh zhиров* [On the quality of vegetable and animal fats]. *Maslozhirovaya promyshlennost'* [Oil and Fat Industry], 2007, no. 2, pp. 8–11.
- [10] Puss K.K., Paaver P., Loog M., Salmar S. Ultrasound effect on a biorefinery lignin-cellulose mixture. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, v. 111, no. 12, p. 107071. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107071>
- [11] Lan H.N., Liu R.Y., Liu Z.H., Li X., Li B.Z., Yuan Y.J. Biological valorization of lignin to flavonoids. *Biotechnology Advances*, 2023, v. 64, no. 5, p. 108107. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108107>
- [12] Pham C.D., Dang M.D.T., Ly T.B., Tran K.D., Vo N.T., Do N.H.N., Mai P.T., Le P.K. A review of the extraction methods and advanced applications of lignin-silica hybrids derived from natural sources. *International J. of Biological Macromolecules*, 2023, v. 230, no. 3, p. 123175. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123175>
- [13] Teo H.L., Wahab R.A., Zainal-Abidin M.H., Mark-Lee W.F., Susanti E. Co-production of cellulose and lignin by Taguchi-optimized one-pot deep eutectic solvent-assisted ball milling pretreatment of raw oil palm leaves. *International J. of Biological Macromolecules*, 2024, v. 280, no. 11, p. 135787. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135787>

- [14] Hou Q., Liu Z., Shi Z., Yang H., Wang D., Yang J. A deep eutectic solvent pretreatment with self-cleaning lignin droplets function to efficiently improve the enzymatic saccharification and ethanol production of bamboo residues. *Industrial Crops and Products*, 2024, v. 216, no. 9, p. 118730. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118730>
- [15] Brienza F., Cannella D., Montesdeoca D., Cybulska I., Debecker D.P. A guide to lignin valorization in biorefineries: traditional, recent, and forthcoming approaches to convert raw lignocellulose into valuable materials and chemicals. *RSC Sustainability*, 2024, v. 2, no. 1, pp. 37–90. <https://doi.org/10.1039/d3su00140g>
- [16] Frias M., Reynoso S., Rambhia S., Noki G., Olson J., Stoeber B., Trajano H.L. Effect of incubation conditions of cellulase hydrolysis on mechanical pulp fibre morphology. *Carbohydrate Polymers*, 2024, v. 344, no. 10, p. 122529. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122529>
- [17] Jia W., Zhou M., Yang C., Zhang H., Niu M., Shi H. Evaluating process of auto-hydrolysis prior to kraft pulping on production of chemical pulp for end used paper-grade products. *J. of Bioresources and Bioproducts*, 2022, v. 7, no. 8, pp. 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.05.002>
- [18] Liu H., Xu S., Li H., He Y. Exploring the dual effect of sodium lignosulfonate-modified LDH treatment and heat processing on elevating corrosion and wear resistance of Ni-W composite coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, v. 702, part 2, no. 12, p. 135076. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135076>
- [19] Demuner I.F., Gomes B.J.B., Gomes J.S., Coura M.R., Borges F.P., Carvalho A.M., Silva C.M. Improving kraft pulp mill sustainability by lignosulfonates production from processes residues. *J. of Cleaner Production*, 2021, v. 317, no. 10, p. 128286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128286>
- [20] Song Y., Zhong S., Li Y., Dong K., Luo Y., Chu G., Zou H., Sun B. Study on the catalytic degradation of sodium lignosulfonate to aromatic aldehydes over nano-CuO: Process optimization and reaction kinetics. *Chinese J. of Chemical Engineering*, 2023, v. 53, no. 1, pp. 300–309. doi.org/10.1016/j.cjche.2021.12.028
- [21] Wang J., Jiao H., Gao S., Wei J., Yu F., Xie C., Yuan B., Yu S. Potential high-energy-density biofuels from α -pinene and lignin-based phenols via alkylation and subsequent hydrodeoxygenation. *Fuel*, 2024, v. 374, no. 10, p. 132513. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132513>
- [22] Liang G., Zhang S., Xian Y., Chen L. Depressing molybdenite using calcium lignosulfonate in Cu-Mo flotation separation: Interaction and desorption insights. *Advanced Powder Technology*, 2024, v. 35, no. 11, p. 104665. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104665>
- [23] Stanis M., Smulek W., Popielski K., Klapiszewski L., Kaczorek E., Jesionowski T. Sustainable design of lignin-based spherical particles with the use of green surfactants and its application as sorbents in wastewater treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, v. 172, no. 8, pp. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.05.028>
- [24] Xu Y., Ding H., Luo C., Zheng Y., Xu Y., Li X., Zhang Z., Shen S., Zhang L. Effect of lignin, cellulose and hemicellulose on calcium looping behavior of CaO-based sorbents derived from extrusion-spherization method. *Chemical Engineering J.*, 2018, v. 334, no. 2, pp. 2520–2529. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.160>
- [25] Patel R., Babaei-Ghazvini A., Dunlop M.J., Acharya B. Biomaterials-based concrete composites: A review on biochar, cellulose and lignin. *Carbon Capture Science & Technology*, 2024, v. 12, no. 9, p. 100232. <https://doi.org/10.1016/j.cst.2024.100232>
- [26] Yang S., Li Y., Yang Y., Liu R., Zhao Y. Behavior of calcium lignosulfonate under oxygen pressure acid leaching condition. *Hydrometallurgy*, 2024, v. 227, no. 8, p. 106317. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106317>
- [27] Feizi Z.H., Kazzaz A.E., Kong F., Fatehi P. Evolving a flocculation process for isolating lignosulfonate from solution. *Separation and Purification Technology*, 2019, v. 222, no. 9, pp. 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.04.042>
- [28] Cave G., Fatehi P. Separation of lignosulfonate from spent liquor of neutral sulphite semichemical pulping process via surfactant treatment. *Separation and Purification Technology*, 2015, v. 151, no. 9, pp. 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.017>
- [29] Yang J., Xing S., Yang W., Zhang A., Wang W. Application potential of modified waste-lignin as microbial immobilization carriers for improve soil fertility. *Reactive and Functional Polymers*, 2024, v. 196, no. 3, p. 105837. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2024.105837>
- [30] Kononov G.N. *Dendrokimiya. Khimiya, nanokhimiya i biogeokhimiya komponentov kletok, tkaney i organov drevesnykh rasteniy* [Dendrochemistry. Chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of components of cells, tissues and organs of woody plants]. In 2 vol. Moscow: MSFU, 2015, 1112 p.
- [31] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Ju.V., Mironov D.A. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. IV. Delignifikatsiya drevesiny kak put' polucheniya tsellyulozy. Chast' I* [Wood as chemical raw material. History and modernity. IV. Wood delignification to produce cellulose. Part I]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 1, pp. 97–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-1-97-113
- [32] Kiviniemi E., Mikkola A., Mattila H., Wahlsten M., Lundell T. Oxidative stress and culture atmosphere effects on bioactive compounds and laccase activity in the white rot fungus *Phlebia radiata* on birch wood substrate. *Current Research in Microbial Sciences*, 2024, v. 7, p. 100280. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100280>
- [33] Grellet M.A., Dantur K.I., Perera M.F., Ahmed P.M., Castagnaro A., Arroyo-Lopez F.N., Gallego J.B., Welin B., Ruiz M.R. Genotypic and phenotypic characterization of industrial autochthonous *Saccharomyces cerevisiae* for the selection of well-adapted bioethanol-producing strains. *Fungal Biology*, 2022, v. 126, no. 10, pp. 658–673. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2022.08.004>
- [34] Ivankin A.N., Oliferenko G.L., Kulikovskiy A.V. *Analiticheskaya himiya* [Analytical chemistry]. Moscow: Knorus, 2021, 300 p.
- [35] GOST R 51880–2002. *Opreделение massovykh doley svobodnykh i obshchikh uglevodov. Metod vysokoeffektivnoy anionnoy khromatografii* [Determination of mass fractions of free and total carbohydrates. High performance anion chromatography method] Moscow: Standards, 2002, 12 p.

- [36] Lisitsyn A.B., Ivankin A.N., Neklyudov A.D. *Metody prakticheskoy biotekhnologii* [Methods of practical biotechnology]. Moscow: VNIIMP, 2002, 408 p.
- [37] Huang C., Jeuck B., Du J., Yong Q., Chang H., Jameel H., Phillips R. Novel process for the coproduction of xylo-oligosaccharides, fermentable sugars, and lignosulfonates from hardwood. *Bioresource Technology*, 2016, v. 219, no. 11, pp. 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.051>
- [38] Wang Z., Li X., Liu H., Zhou T., Li J., Siddiqui M.A. Enhanced short-chain fatty acids production from anaerobic fermentation of secondary sludge by lignosulfonate addition: Towards circular economy. *J. of Cleaner Production*, 2024, v. 434, no. 1, p. 140252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140252>
- [39] Meledina T.V., Davydenko S.G. *Drozhzhi Saccharomyces cerevisiae. Morfologiya, khimicheskiy sostav, metabolizm*. [Yeast *Saccharomyces cerevisiae*. Morphology, chemical composition, metabolism]. St. Petersburg: ITMO University, 2015, 88 p.
- [40] Kosolapov V.M., Chuikov V.A., Khudyakova H.K., Kosolapova V.G. *Mineral'nye elementy v kormakh i metody ikh analiza* [Mineral elements in feed and methods of their analysis]. Moscow: Ugreshskaya Printing House, 2019, 272 p.
- [41] Morales-Palomo S., Tomás-Pejó E., González-Fernández C. Phosphate chelation over calcium impacts yeast growth and lipid production from short-chain fatty acids-rich media. *Environmental Technology & Innovation*, 2024, v. 36, no. 11, p. 103767. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103767>
- [42] Huang H., Xu J., Sheng Z., Xie R., Zhang H., Chen N., Li S. Effects of dietary phospholipids on growth performance, fatty acid composition, and expression of lipid metabolism related genes of juvenile hybrid. *Aquaculture Reports*, 2022, v. 22, no. 2, p. 100993. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100993>
- [43] Veerasamy V., Neethirajan V., Singarayar M.S., Balasundaram D., Dharmar P., Thilagar S. Microalgal biomass and lipid synergy for omega fatty acid enrichment: A sustainable source for food supplements & nutraceuticals. *Algal Research*, v. 80, no. 6, p. 103514. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103514>
- [44] Di Caprio F. Cultivation processes to select microorganisms with high accumulation ability. *Biotechnology Advances*, 2021, v. 49, no. 7, p. 107740. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107740
- [45] Deive F.J., Sanroman M.A. Bioreactor development for the cultivation of extremophilic microorganisms. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Bioprocesses, Bioreactors and Controls*. Eds. Larroche C. et al. Elsevier, 2017, 816 p. doi.org/10.1016/B978-0-444-63663-8.00014-8
- [46] Xu J., Zhou J., Du B., Li X., Huang Y., Cao Q., Xu S., Wang W. Research progress on the preparation and application of lignin-based Pickering emulsions: A review. *Industrial Crops and Products*, 2024, v. 222, no. 12, p. 119723. doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119723
- [47] Ivankin A.N., Oliferenko G.L. Corrosion inhibition with green polymer systems and natural compounds. *Polymer Science, Series D*, 2024, v. 17, no. 4, pp. 987–994. DOI: 10.1134/S1995421224701697
- [48] Oliferenko G.L., Ivankin A.N., Ustyugov A.V. *Kislotnaya degradatsiya drevesnykh otkhodov kak sposob polucheniya tselevykh produktov* [Wood waste acid degradation to obtain target products]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 4, pp. 130–137. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-130-137
- [49] Wang J., Seidi F., Shi X., Li C., Huang Y., Xiao H. Unveiling the potential of dual-extrinsic/intrinsic self-healing lignin-based coatings for anticorrosion applications. *International J. of Biological Macromolecules*, 2025, v. 285, no. 1, p. 138073. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138073
- [50] Yin Y., Qin S., Deng S., Li Z., Tang A., Li Q., Liao D., Liu Y. Thermoresponsive lignin-based polyelectrolyte complexes for the preparation of spherical nanoparticles: Application in pesticide encapsulation. *International J. of Biological Macromolecules*, 2025, v. 288, no. 2, p. 138623. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138623

Authors' information

Ivankin Andrey Nikolayevich  — Dr. Sci. (Chem.), Member of The International Higher Education Academy Of Sciences (IHEAS), Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), aivankin@bmstu.ru

Zarubina Angella Nikolaevna — Cand. Sci. (Tehn.), Associate Professor, Head of the Department of Chemistry and Chemical Technologies of the Forest Complex BMSTU (Mytishchi branch), zarubina@bmstu.ru

Received 29.10.2024.

Approved after review 19.12.2024.

Accepted for publication 06.02.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest