ISNN 3030-3907

2026
MAY
ISSUE - 5
VOLUME -12

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

MAY 2026
Issue - 5, VOLUME – 12

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ПОЛУЧЕНИЕ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ КОРЫ СОСНЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЁ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Умурзакова М.Г.
Магистр 2 курса национальногопедагогического университета Узбекистана
Махматкулова З.Х.
К.т.н., доцент Национальногопедагогического университета Узбекистана
E-mail: mahmatkulovazuhro@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты оптимизации процесса получения лигноцеллюлозы из коры сосны (Pinus) и оценки физико-химических свойств полученного материала. Использована многостадийная схема обработки, включающая механическую подготовку сырья, удаление экстрактивных веществ, щелочную делигнификацию и organosolv-обработку. Изучено влияние концентрации NaOH, температуры и продолжительности обработки на выход твёрдого лигноцеллюлозного продукта. В качестве оптимального режима выбраны 5% NaOH, температура 80 °C и продолжительность 3 часа; при этих условиях выход продукта составил 55,8%. FTIR-анализ подтвердил сохранение целлюлозного скелета и снижение интенсивности сигналов, характерных для лигнина. По данным SEM сформировалась пористая, неоднородная и волокнистая морфология, а DLS-анализ показал высокую полидисперсность дисперсной системы.

Ключевые слова: лигноцеллюлоза, кора сосны, делигнификация, гидроксид натрия, organosolv-обработка, FTIR, SEM, DLS, биополимерные материалы.

Annotasiya. Mazkur maqolada qarag‘ay (Pinus) po‘stlog‘idan lignosellyuloza olish jarayonini optimallashtirish va olingan mahsulotning fizik-kimyoviy xossalarini baholash natijalari bayon etildi. Xomashyoni mexanik tayyorlash, ekstraktiv moddalarni ajratish, ishqoriy delignifikatsiya va organosolv ishlov bosqichlari ketma-ket qo‘llanildi. NaOH konsentratsiyasi, harorat va ishlov berish vaqtining mahsulot unumiga ta’siri o‘rganildi. Optimal sharoit sifatida 5% NaOH, 80 °C harorat va 3 soatlik ishlov berish rejimi tanlandi; bu sharoitda mahsulot unumi 55,8% ni tashkil etdi. FTIR tahlili sellyuloza skeletining saqlanganini, ligninga xos signallar intensivligining kamayganini ko‘rsatdi. SEM natijalari g‘ovak va tolali morfologiya shakllanganini, DLS tahlili esa dispers tizim yuqori polidispers xususiyatga ega ekanini tasdiqladi.

Kalit so‘zlar: lignosellyuloza, qarag‘ay po‘stlog‘i, delignifikatsiya, NaOH, organosolv ishlov, FTIR, SEM, DLS, biopolimer materiallar.

Abstract. This article presents the results of optimizing lignocellulose production from pine (Pinus) bark and evaluating the physicochemical properties of the obtained material. A multistage processing scheme was applied, including mechanical preparation of the raw material, removal of extractives, alkaline delignification, and organosolv treatment. The effects of NaOH concentration, temperature, and treatment time on the yield of the solid lignocellulosic product were investigated. The optimal conditions were determined as 5% NaOH, 80 °C, and 3 h treatment time; under these conditions, the product yield reached 55.8%. FTIR analysis confirmed the preservation of the cellulose skeleton and a decrease in the intensity of lignin-related signals. SEM observations revealed a porous, irregular, and fibrous morphology, while DLS analysis demonstrated the highly polydisperse nature of the dispersion system.

Keywords: lignocellulose, pine bark, delignification, sodium hydroxide, organosolv treatment, FTIR, SEM, DLS, biopolymer materials.

ВВЕДЕНИЕ.

Рациональное использование растительной биомассы относится к числу актуальных направлений современной химии природных полимеров, материаловедения и «зелёной» химии. Особый интерес представляет лигноцеллюлозное сырьё, поскольку оно формируется в больших объёмах, имеет возобновляемое происхождение и содержит природные полимерные компоненты, способные служить основой для получения сорбентов, наполнителей, биокомпозитов и функциональных материалов. Лигноцеллюлозная биомасса рассматривается не только как источник энергии, но и как химическая платформа для создания продуктов с более высокой добавленной стоимостью [1-3].

Структура лигноцеллюлозы определяется сочетанием целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, экстрактивных веществ и минеральных компонентов. Целлюлоза образует прочный полисахаридный каркас, гемицеллюлозы выполняют роль менее упорядоченной матрицы, а лигнин придаёт растительной клеточной стенке жёсткость и устойчивость к химическому и биологическому разрушению. Именно сложные связи между этими компонентами делают биомассу труднопереработываемой, поэтому предварительная химическая обработка является ключевым этапом выделения лигноцеллюлозной фракции.

Кора сосны является перспективным, но одновременно сложным объектом переработки. В ней присутствуют смолы, воски, фенольные соединения, дубильные вещества и ароматические фрагменты лигнина, которые могут снижать эффективность делигнификации и ухудшать воспроизводимость получаемого материала. Поэтому для такого сырья

ISSN 3030-3907

целесообразно применять не одну операцию, а последовательную схему: механическое измельчение, удаление экстрактивных веществ, щелочную обработку и organosolv-фракционирование.

Актуальность исследования определяется необходимостью подбора таких условий обработки, при которых лигнин и часть гемицеллюлозы удаляются достаточно эффективно, но целлюлозный скелет не подвергается чрезмерной деструкции. В этом отношении концентрация NaOH, температура и продолжительность процесса являются основными управляемыми факторами. Их оптимизация позволяет регулировать выход продукта, степень раскрытия поверхности и потенциальную реакционную способность получаемой лигноцеллюлозы.

Цель настоящей работы оптимизировать процесс получения лигноцеллюлозы из коры сосны, определить влияние концентрации NaOH, температуры и времени обработки на выход продукта, а также охарактеризовать химическую структуру и морфологию полученного материала методами FTIR, SEM и DLS.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.

В научной литературе лигноцеллюлозная биомасса рассматривается как один из наиболее доступных возобновляемых ресурсов для получения биотоплива, биоосновanных химических веществ, сорбентов и полимерных материалов. F.Isikgor и C.Becer показывает, что из лигноцеллюлозного сырья может быть получен широкий спектр мономеров, химических платформ и полимерных продуктов [3]. Более поздние исследования подчёркивают, что практическая ценность лигноцеллюлозы зависит не только от её состава, но и от выбранной схемы фракционирования, поскольку разные виды сырья требуют различной глубины предварительной обработки [6].

Одним из наиболее распространённых подходов к деструкции лигноуглеводного комплекса является щелочная обработка. Согласно данным J.Kim и соавторов, щелочная предварительная обработка способствует селективному удалению части лигнина, увеличению пористости и повышению доступности полисахаридной фазы [4]. Механизм действия NaOH связан с омылением сложных эфирных связей, разрушением части связей между лигнином и гемицеллюлозой, набуханием клеточной стенки и увеличением доступности внутренних слоёв биомассы. Однако чрезмерная концентрация щёлочи или повышение температуры могут приводить к потере полисахаридов и снижению качества твёрдого продукта.

Обработка органическим растворителем, как указывается в работе I.Nair и др. занимает особое место среди методов фракционирования,

ISSN 3030-3907

поскольку сочетает органический растворитель, воду и, при необходимости, кислотный или щелочной катализатор. По литературным данным, обработка органическим растворителем способствует растворению фрагментов лигнина, ослаблению лигноуглеводных связей и получению более чистых целлюлозосодержащих фракций [5]. Для древесного и корового сырья важным преимуществом organosolv-систем является возможность удаления гидрофобных и ароматических компонентов, которые плохо устраняются только водной обработкой.

Кора хвойных пород отличается повышенным содержанием экстрактивных веществ и ароматических компонентов. В работе D.Barros и соавторов показано, что кора морской сосны содержит лигнин, целлюлозу, гемицеллюлозу, зольные и экстрактивные компоненты, что подтверждает необходимость комплексной химической характеристики такого вида сырья [7]. Следовательно, предварительное удаление липофильных и фенольных компонентов перед щелочной делигнификацией является технологически оправданным этапом.

Для контроля изменений структуры лигноцеллюлозы широко применяются спектральные и микроскопические методы. FTIR-спектроскопия позволяет оценить наличие гидроксильных групп, C-H-связей, гликозидных фрагментов, ароматических структур лигнина и изменений в полисахаридном скелете [8]. SEM используется для визуализации поверхности и выявления пористости, трещин, расслоения и волокнистой структуры. DLS-анализ, в свою очередь, даёт информацию о гидродинамических размерах частиц в суспензии и степени полидисперсности системы; при интерпретации таких данных необходимо учитывать, что крупные агрегаты могут давать значительный вклад в интенсивность рассеяния [9].

Таким образом, литературные данные подтверждают целесообразность комбинированного подхода к переработке коры сосны. Наиболее обоснованной является схема, объединяющая удаление экстрактивных веществ, контролируемую щелочную делигнификацию и organosolv-обработку с последующей оценкой структуры методами FTIR, SEM и DLS.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Объектом исследования служила кора сосны рода Pinus. Сырьё предварительно очищали от механических примесей, высушивали и измельчали до частиц размером 0,5-2,0 мм. Уменьшение размера частиц повышает площадь контакта сырья с реагентами и облегчает проникновение раствора в объём биомассы. После измельчения образцы дополнительно

ISSN 3030-3907

выдерживали до стабилизации влажности, поскольку избыток воды может изменять фактическую концентрацию реагентов и снижать воспроизводимость процесса.

Удаление экстрактивных веществ проводили в два этапа. На первом этапе сырьё обрабатывали гексаном для извлечения липофильных компонентов, включая смолы и восковые вещества. На втором этапе использовали смесь этанол:вода в соотношении 75:25 для частичного удаления гидрофильных, фенольных и низкомолекулярных компонентов. Такая предварительная обработка снижает влияние экстрактивных веществ на последующую делигнификацию и способствует более равномерному взаимодействию щёлочи с лигноуглеводным комплексом.

Щелочную делигнификацию проводили растворами NaOH концентрацией 3, 5 и 7%. Температурный интервал составлял 70, 80 и 90 °C, продолжительность обработки - 120-240 мин. Процесс осуществляли в водяной бане при постоянном перемешивании. После завершения обработки реакционную массу охлаждали, твёрдую фазу отделяли фильтрованием и многократно промывали дистиллированной водой до достижения pH 7-8.

На следующем этапе проводили organosolv-обработку в системе ацетон:вода 80:20 в присутствии серной кислоты при 120 °C. Данный этап был направлен на дополнительное удаление фрагментов лигнина и ослабление связей между ароматической и полисахаридной частью исходной биомассы. После обработки твёрдую и жидкую фазы разделяли фильтрованием. Твёрдый остаток рассматривали как лигноцеллюлозо-содержащую фракцию, затем высушивали методом лиофилизации. Выход продукта рассчитывали как отношение массы высушенного твёрдого остатка к массе исходного сухого сырья.

Химическую структуру полученного материала исследовали методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR). Морфологию поверхности оценивали методом сканирующей электронной микроскопии (SEM). Гидродинамические размеры частиц и характер распределения в суспензии определяли методом динамического светорассеяния (DLS).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

Результаты оптимизации показали, что концентрация NaOH и температура являются определяющими факторами выделения лигноцеллюлозной фракции из коры сосны. При увеличении концентрации щёлочи и температуры выход твёрдого продукта закономерно снижался. Такое снижение связано с переходом части лигнина, гемицеллюлозы и

ISSN 3030-3907

низкомолекулярных компонентов в жидкую фазу. Однако слишком высокий выход не является признаком эффективного процесса: при мягких условиях в твёрдом остатке может сохраняться значительное количество лигнина и экстрактивных веществ.

Таблица-1.

Влияние концентрации NaOH и температуры на выход лигноцеллюлозного продукта

NaOH, %	Температура, °C	Время, ч	Выход продукта, %	Характеристика процесса
3	70	3	68,4	Делигнификация выражена слабо
3	80	3	64,7	Отделение лигнина улучшается
3	90	3	60,2	Селективность недостаточна
5	70	3	61,5	Процесс неполный
5	80	3	55,8	Оптимальное состояние
5	90	3	49,6	Начало избыточного разрушения
7	70	3	54,3	Лигнин удаляется интенсивнее
7	80	3	47,9	Потери полисахаридов возрастают
7	90	3	41,2	Высокий риск деструкции

При 3% NaOH и 70 °C выход продукта составил 68,4%, однако такой режим нельзя считать оптимальным, поскольку высокая масса твёрдого остатка обусловлена недостаточным удалением лигнина. При повышении температуры до 80 и 90 °C выход снижался до 64,7 и 60,2% соответственно, что указывает на усиление делигнификации, но при 3% NaOH процесс всё ещё остаётся недостаточно глубоким.

ISSN 3030-3907

Использование 5% раствора NaOH обеспечило более сбалансированное течение процесса. При 70 °C выход составил 61,5%, что указывает на неполное удаление лигнина. При 80 °C выход снизился до 55,8%, и этот режим был выбран как оптимальный, поскольку обеспечивал разумный компромисс между удалением лигнин-гемицеллюлозной части и сохранением целлюлозного каркаса. При 90 °C выход уменьшался до 49,6%, что может свидетельствовать о начале нежелательных потерь полисахаридной фракции.

Наиболее жёсткие условия - 7% NaOH и 90 °C - приводили к выходу 41,2%. Такой результат показывает интенсивное удаление компонентов, однако одновременно возрастает вероятность разрушения гемицеллюлозы и частичной деструкции целлюлозы. Следовательно, увеличение концентрации щёлочи сверх оптимального значения не повышает качество процесса, а может снижать ценность конечного материала.

Таблица-2.

Влияние продолжительности обработки на выход продукта при 5% NaOH и 80 °C

Время обработки, мин.	Выход продукта, %	Интерпретация результата
120	61,2	Делигнификация неполная, твёрдый остаток содержит больше примесей
180	55,8	Оптимальное соотношение между выходом и степенью обработки
240	50,3	Увеличиваются потери гемицеллюлозы и риск деструкции

Изучение продолжительности обработки показало, что 120 минут недостаточно для полного раскрытия структуры коры сосны. При этом выход продукта остаётся высоким, но высокая масса твёрдого остатка не всегда означает высокую степень очистки. Увеличение времени до 180 минут позволяет усилить удаление лигнина и гемицеллюлозных фрагментов без выраженной деструкции целлюлозного скелета.

При продолжительности 240 минут выход продукта снижается до 50,3%. Такое снижение может быть связано не только с дополнительным

ISSN 3030-3907

удалением лигнина, но и с частичным разрушением менее устойчивых полисахаридных компонентов. Поэтому дальнейшее увеличение времени обработки не является рациональным: оно снижает выход и может ухудшать функциональные свойства материала.

FTIR-анализ подтвердил, что полученный материал сохраняет признаки целлюлозного скелета. Широкая полоса в области 3419 $см^{-1}$ соответствует валентным колебаниям O-H-групп и указывает на наличие развитой системы водородных связей. Полоса около 2903 $см^{-1}$ связана с C-H-колебаниями алифатических фрагментов. Сигналы в области 1281-1031 $см^{-1}$ относятся к C-O-C и C-O-колебаниям полисахаридного скелета, а полоса 899 $см^{-1}$ подтверждает сохранение β-1,4-гликозидных связей целлюлозной цепи.

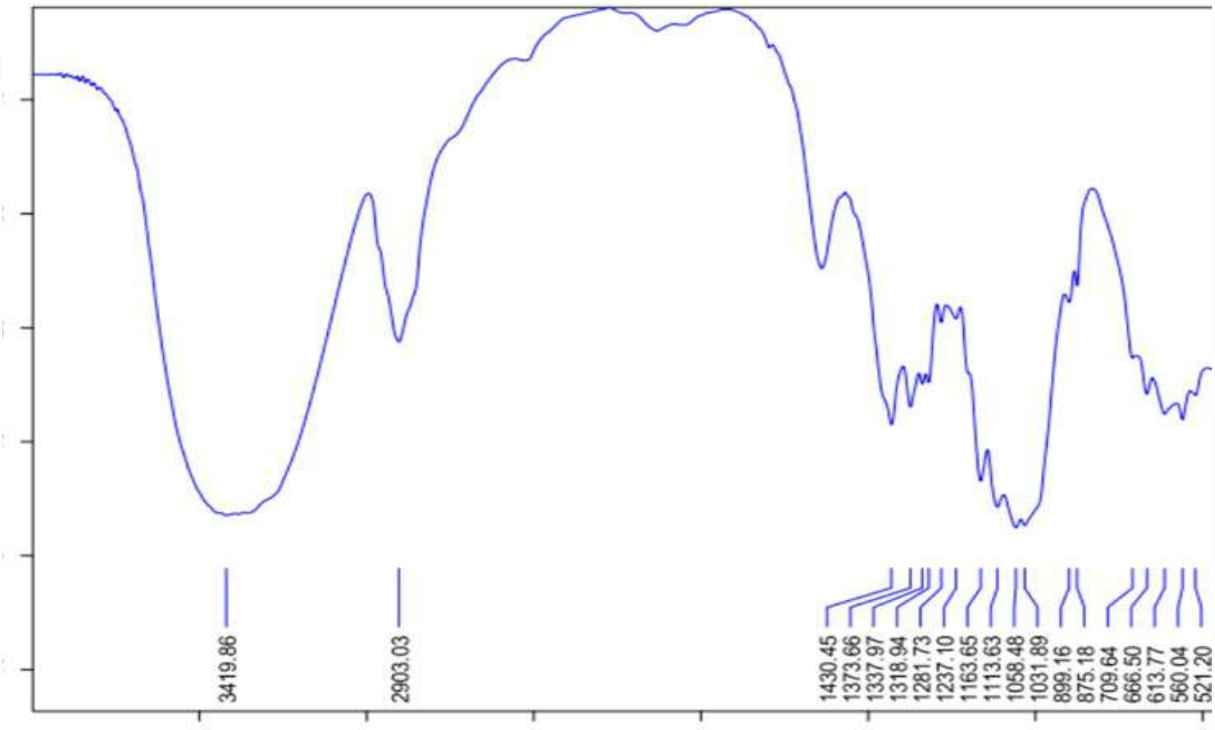


Рисунок-1. FTIR-спектр образца лигноцеллюлозы, полученного из коры сосны.

Таблица 3.

Основные полосы поглощения FTIR-спектра лигноцеллюлозы.

Диапазон, $см^{-1}$	Группа/связь	Аналитическое значение
3419	O-H-колебания	Гидроксильные группы и водородные связи
2903	C-H-колебания	Полисахаридные и лигниновые боковые фрагменты

ISSN 3030-3907

1430	Деформационные колебания CH_2	Сохранение целлюлозной структурной фазы
1281-1031	C-O-C, C-O	Полисахаридный скелет и гликозидные связи
899	β-1,4-гликозидная связь	Сохранение целлюлозной цепи
<800	Ароматические колебания	Остаточные фрагменты лигнина и модифицированная структура

Снижение интенсивности сигналов, связанных с ароматическими структурами лигнина, указывает на эффективность щелочной и organosolv-обработки. При этом сохранение полос в области 1030-1100 $см^{-1}$ и 899 $см^{-1}$ свидетельствует о том, что целлюлозная макромолекулярная основа не разрушена полностью. Такой результат особенно важен, поскольку целлюлозный каркас определяет дальнейшую возможность использования материала в качестве наполнителя, сорбента или структурообразующего компонента биокомпозитов.

SEM-анализ показал выраженное изменение морфологии материала после обработки. При меньшем увеличении частицы имеют неправильную форму, представлены вытянутыми, волокнистыми и пластинчатыми фрагментами. Их размеры находятся в широком интервале, что объясняется природной неоднородностью коры сосны и механическим измельчением сырья. При большем увеличении на поверхности видны трещины, углубления, расслоение и участки деламинации. Формирование шероховатой и пористой поверхности связано с удалением экстрактивных веществ, частичным растворением гемицеллюлозы и разрушением части лигниновой матрицы. Увеличение пористости является положительным признаком для материалов сорбционного назначения, поскольку развитая поверхность создаёт больше потенциальных активных центров. Одновременно SEM-изображения показывают склонность отдельных частиц к агломерации, что может быть связано с водородными связями между гидроксильными группами и межмолекулярным взаимодействием остаточных лигниновых фрагментов.

ISSN 3030-3907

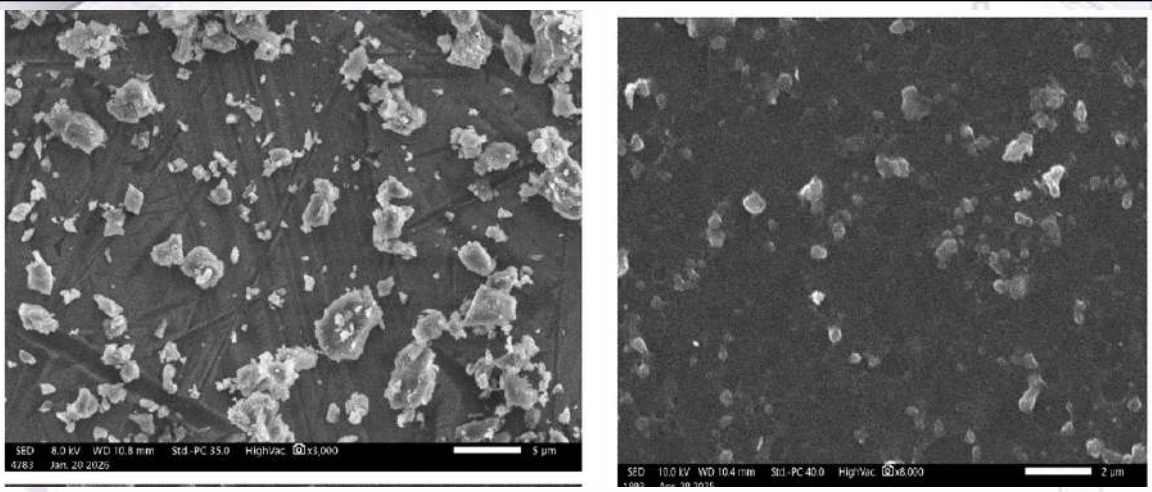


Рисунок-2. SEM-изображения частиц лигноцеллюлозы при увеличениях ×3000 и ×8000.

DLS-анализ водной суспензии лигноцеллюлозы выявил высокую полидисперсность системы. По интенсивности рассеяния были определены несколько фракций: 0,214 нм, 57,36 нм, 425,2 нм и $8{,}9\times10^4$ нм. Наличие пиков в нано- и субмикронной области может быть связано с мелкими коллоидными частицами и фрагментами волокнистой структуры. Основной вклад в интенсивность рассеяния крупных агрегатов объясняется тем, что DLS чувствителен к частицам большего размера; поэтому даже относительно небольшое количество агрегатов может заметно влиять на распределение по интенсивности. Крупная фракция около $8{,}9\times10^4$ нм, то есть примерно 89 мкм, подтверждает, что полученный материал в водной среде не образует истинный раствор, а существует как дисперсная система с выраженной склонностью к агрегации. Значение $\chi^2=0{,}019$ указывает на удовлетворительное соответствие расчётной модели экспериментальным данным. Следовательно, DLS-результаты необходимо рассматривать совместно с SEM-наблюдениями, поскольку микроскопия даёт прямое представление о форме частиц, а светорассеяние отражает их гидродинамическое поведение в суспензии.

Полученные данные позволяют заключить, что лигноцеллюлоза из коры сосны представляет собой неоднородный природный полимерный материал с развитой поверхностью, остаточными ароматическими фрагментами и сохранённым полисахаридным скелетом. Такая комбинация признаков делает материал перспективным для дальнейшего использования при создании сорбентов, биокомпозитов, наполнителей и функциональных биополимерных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ.

В результате исследования разработана многостадийная схема получения лигноцеллюлозы из коры сосны, включающая механическую

ISSN 3030-3907

подготовку сырья, удаление экстрактивных веществ, щелочную делигнификацию и organosolv-обработку. Такой подход обеспечил частичное удаление лигнина и экстрактивных компонентов при сохранении целлюлозного скелета материала.

Установлено, что концентрация NaOH, температура и продолжительность обработки существенно влияют на выход лигноцеллюлозного продукта. Оптимальным режимом выбран процесс при 5% NaOH, 80 °C и продолжительности 180 минут. При этих условиях выход продукта составил 55,8%, что соответствует балансу между эффективностью делигнификации и сохранением полисахаридной основы.

FTIR-анализ показал наличие O-H, C-H, C-O-C и β-1,4-гликозидных связей, характерных для целлюлозосодержащих материалов. Уменьшение интенсивности сигналов, связанных с лигнином, свидетельствует об эффективности химической обработки. SEM-анализ подтвердил формирование пористой, шероховатой и волокнистой морфологии, благоприятной для последующего использования материала в сорбционных и композиционных системах. DLS-анализ показал, что суспензия лигноцеллюлозы является высокополидисперсной и содержит частицы различного размерного уровня, от нано- и субмикронных фрагментов до крупных агрегатов. Это необходимо учитывать при разработке композитов, гидрогелей и сорбентов на основе данного материала.

В качестве практического предложения целесообразно продолжить исследования по определению сорбционной активности полученной лигноцеллюлозы по отношению к органическим красителям, ионам металлов и другим загрязнителям. Дополнительно рекомендуется провести сравнительный анализ образцов, полученных при разных соотношениях растворителя и воды в organosolv-системе, а также оценить термическую устойчивость и удельную поверхность материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumar P., Barrett D.M., Delwiche M.J., Stroeve P. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2009. Vol. 48, No. 8. P. 3713-3729.
2. Sun Y., Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review // Bioresource Technology. 2002. Vol. 83, No. 1. P. 1-11.
3. Isikgor F.H., Becer C.R. Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers // Polymer Chemistry. 2015. Vol. 6. P. 4497-4559.

ISSN 3030-3907

4. Kim J.S., Lee Y.Y., Kim T.H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass // Bioresource Technology. 2016. Vol. 199. P. 42-48.
5. Nair L.G., Agrawal K., Verma P. Organosolv pretreatment: an in-depth purview of mechanics of the system // Bioresources and Bioprocessing. 2023.
6. Segers B., Nimmegeers P., Spiller M., Tofani G., Jasiukaityte E., Dace E., Kikas T., Marchetti J.M. Lignocellulosic biomass valorisation: a review of feedstocks, processes and potential value chains and their implications for the decision-making process // RSC Sustainability. 2024.
7. Barros D., Sousa S., Ferreira I.C.F.R., et al. The chemical characterisation of the maritime pine bark (Pinus pinaster Aiton subsp. atlantica) // Plants. 2023. Vol. 12, No. 23. Article 3940.
8. Md Salim R., Asik J., Sarjadi M.S. Chemical functional groups of extractives, cellulose and lignin extracted from native Leucaena leucocephala bark // Wood Science and Technology. 2021.
9. Tarrés Q., Aguado R., Zoppe J.O., Mutjé P., Fiol N., Delgado-Aguilar M. Dynamic Light Scattering Plus Scanning Electron Microscopy: usefulness and limitations of a simplified estimation of nanocellulose dimensions // Nanomaterials. 2022. Vol. 12, No. 23. Article 4288.
10. Segal L., Creely J.J., Martin A.E., Conrad C.M. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer // Textile Research Journal. 1959. Vol. 29, No. 10. P. 786-794.

ISSN 3030-3907