

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES



<https://doi.org/10.15507/2311-2468.013.202504.401-410>

eISSN 2311-2468

EDN: <https://elibrary.ru/opzffn>

<https://ogarev-online.ru>

УДК / UDC 663.534-037.12(076.5)

Оригинальная статья / Original article

Лабораторный синтез гидроксипропилметилцеллюлозы технического качества из пеньки (технической конопли)

А. Ю. Асфандеев , С. Г. Кострюков, А. А. Бурмистрова, А. А. Кузьмичева

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,

Саранск, Россия

asfandeev.a.yu@gmail.com

Аннотация

Введение. Гидроксипропилметилцеллюлоза (ГПМЦ) является важной производной целлюлозы, широко применяемой в различных отраслях промышленности. Цель исследования – разработка метода синтеза ГПМЦ из целлюлозы технической конопля, выступающей возобновляемым и экономичным сырьем.

Материалы и методы. В работе использованы образцы целлюлозосодержащей пеньки и химические реагенты промышленного производства без дополнительной очистки. Синтез проводили в гетерогенной среде толуол/изопропанол. Для характеристики продукта применяли инфракрасную спектроскопию (ИК) с преобразованием Фурье, а также спектроскопию ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядрах ^1H и ^{13}C . Вязкость 2 %-ных водных растворов определяли с помощью вискозиметра Брукфильда (Brookfield).

Результаты исследования. Успешно осуществлен синтез ГПМЦ из предварительно высушенной пеньки. Степень метилирования (DS) и гидроксипропилирования (MS) определена методом ЯМР-спектроскопии на ядрах ^{13}C . Данные ИК-спектроскопии подтвердили образование эфира целлюлозы. Динамическая вязкость полученных образцов для 2 %-ных водных растворов составила от 35 до 58 Па · с.

Обсуждение и заключение. Разработанный метод демонстрирует возможность эффективного получения ГПМЦ из возобновляемого конопляного сырья в лабораторных условиях. Процесс воспроизводимый и управляемый; выход целевого продукта составляет 76–81 %.

Ключевые слова: гидроксипропилметилцеллюлоза (ГПМЦ), техническая конопля, пенька, диметилсульфат, окись пропилена, степень замещения, вязкость, ИК-спектроскопия, ЯМР-спектроскопия

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке внутривузовского научного гранта в области гуманитарных, естественных и инженерно-технических наук ФГБОУ ВО "МГУ им. Н.П. Огарёва" 2025 года (Приоритет 2030).

Для цитирования: Лабораторный синтез гидроксипропилметилцеллюлозы технического качества из пеньки (технической конопля) / Асфандеев А. Ю. [и др.] // Огарёв-online. 2025. Т. 13, № 4. С. 401–410. <https://doi.org/10.15507/2311-2468.013.202504.401-410>

© Асфандеев А. Ю., Кострюков С. Г., Бурмистрова А. А., Кузьмичева А. А., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Laboratory Synthesis of Technical-Grade Hydroxypropyl Methylcellulose from Hemp Shive (Industrial Hemp)

A. Yu. Asfandeev, S. G. Kostryukov, A. A. Burmistrova, A. A. Kuzmicheva

National Research Mordovia State University,

Saransk, Russia

asfandeev.a.yu@gmail.com

Abstract

Introduction. Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) is an important cellulose derivative widely used in various industries. The aim of the study is to develop a method for synthesizing HPMC from industrial hemp cellulose, which is a renewable and cost-effective raw material.

Materials and Methods. The study used samples of cellulose-containing hemp shive and industrially produced chemical reagents without additional purification. The synthesis was carried out in a heterogeneous medium of toluene/isopropanol. The product was characterized using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy on nuclei ^1H and ^{13}C . The viscosity of 2 % aqueous solutions was determined using a Brookfield viscometer.

Results. The synthesis of HPMC from pre-dried hemp shive was successfully accomplished. The degree of methylation (DS) and hydroxypropylation (MS) was determined by ^{13}C NMR spectroscopy. FTIR spectroscopy data confirmed the formation of cellulose ether. The dynamic viscosity of the obtained samples for 2 % aqueous solutions ranged from 35 to 58 Pa · s.

Discussion and Conclusion. The developed method demonstrates the possibility of efficiently producing HPMC from renewable hemp raw material under laboratory conditions. The process is reproducible and controllable, with the yield of the target product ranging from 76 to 81 %.

Keywords: hydroxypropyl methylcellulose (HPMC), industrial hemp, hemp fiber, dimethyl sulfate, propylene oxide, degree of substitution, viscosity, FTIR spectroscopy, NMR spectroscopy

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The research was carried out with the financial support of the intra-university scientific grant in the field of humanities, natural, and engineering sciences of the Mordovia State University 2025 (Priority 2030).

For citation: Asfandeev A.Yu., Kostryukov S.G., Burmistrova A.A., Kuzmicheva A.A. Laboratory Synthesis of Technical-Grade Hydroxypropyl Methylcellulose from Hemp Shive (Industrial Hemp). *Ogarev-online*. 2025;13(4):401–410. <https://doi.org/10.15507/2311-2468.013.202504.401-410>

ВВЕДЕНИЕ

Гидроксипропилметилцеллюлоза (ГПМЦ) является одной из наиболее широко применяемых производных целлюлозы благодаря уникальным свойствам, таким как способности к набуханию, образованию прозрачного термообратимого геля, а также способности выступать в качестве загустителя, стабилизатора и пленкообразователя [1]. Область ее применения охватывает пищевую, фармацевтическую, косметическую, лакокрасочную и строительную промышленность. Традиционно основным сырьем для производства ГПМЦ служит хлопковая или древесная целлюлоза высокой степени очистки¹ [2].

¹ Бытенский В. Я., Кузнецов Е. П. Производство эфиров целлюлозы. Л.: Химия, 1974. 208 с.

В последние годы акцент в исследованиях смещается в сторону поиска альтернативных, возобновляемых и экономически эффективных источников целлюлозы. В таком контексте техническая конопля (пенька) представляет значительный интерес [3; 4]. Волокна конопли характеризуются высоким содержанием целлюлозы и при этом являются быстро возобновляемым ресурсом, требующим минимальных затрат пестицидов и воды при культивировании [5; 6]. Использование пеньки в качестве сырья для синтеза химических производных позволяет не только диверсифицировать сырьевую базу, но и повысить экономическую целесообразность переработки данного сельскохозяйственного растения [7].

Цель настоящего исследования – разработка метода синтеза ГПМЦ технического качества из целлюлозы, выделенной из пеньки, с использованием диметилсульфата и окиси пропилена в качестве алкилирующих агентов.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи: подобрать оптимальные условия проведения реакции в гетерогенной среде (толуол/изопропанол); получить образец гидроксипропилметилцеллюлозы и составить его комплексную характеристику с применением методов ЯМР-спектроскопии на ядрах ^1H и ^{13}C для подтверждения химической структуры; определить основные технические параметры полученного эфира, включая степень замещения, молярную степень замещения и динамическую вязкость 2 %-ного водного раствора (по Брукфильду).

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Классический промышленный синтез ГПМЦ заключается в последовательном алкилировании щелочной целлюлозы хлорметаном и окисью пропилена. Этот процесс, как правило, проводится в автоклавах под давлением, что требует специализированного и дорогостоящего оборудования [8]. Разработка лабораторных методик синтеза, воспроизводимых в стандартных условиях при атмосферном давлении, выступает важной задачей, так как это упрощает и удешевляет реализацию исследований по модификации целлюлозы и оптимизации процессов, особенно на этапе опытно-лабораторных испытаний новых видов сырья.

В лабораторной практике для осуществления реакции этерификации в мягких условиях нередко применяют активные алкилирующие агенты, в частности диметилсульфат². Реакцию часто проводят в гетерогенной среде, используя смеси органических растворителей (например, толуола и изопропанола), которые обеспечивают эффективное набухание целлюлозной матрицы и доступ реагентов к гидроксильным группам без растворения самого полимера [9].

Таким образом, разработка лабораторной методики синтеза ГПМЦ из альтернативного сырья в условиях атмосферного давления представляет собой актуальную научную и практическую задачу, решение которой откроет новые перспективы для исследований в области модификации целлюлозы и будет способствовать созданию более экономичных промышленных технологий.

² Vogel A. I., Furniss B. S. Vogel's Textbook of Practical Organic Chemistry. Harlow: Longman, 1989. 1514 p.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходные материалы и реактивы. Образцы пеньки (технической конопли), содержащие целлюлозу, были предоставлены ООО «Мордовские пенькозаводы» (Мордовия, г. Инсар), оксид пропилена – ПАО «Нижнекамскнефтехим» (Татарстан, г. Нижнекамск). Диметилсульфат, гидроксид натрия, изопропиловый спирт, уксусная кислота приобретались в АО «ВЕКТОН» (г. Санкт-Петербург).

Все химические реактивы использовались в исходном состоянии (без дополнительной очистки).

Инструментальные методы анализа. Спектра регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре «Инфра ЛЮМ ФТ-08» в диапазоне $400\text{--}4\,000\text{ см}^{-1}$ с разрешением 4 см^{-1} . Для повышения качества данных использовалась аподизация функций Бесселя. Время накопления – 60 с. Температура окружающей среды при нормальном атмосферном давлении и относительной влажности воздуха не выше 80 % составляла $20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Обработка спектров осуществлялась с помощью программного обеспечения «СпектраЛЮМ» (версии 2.0.1.295).

Спектра ЯМР ^1H и ^{13}C получали на спектрометре JEOL JNM ECX-400 (9,39 Т, 100,5 МГц) для растворов в $\text{D}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$ на частоте 100,5 МГц с использованием стандартной импульсной последовательности с увеличением времени релаксации (T_1) до 5 с без использования эффекта NOE.

Обработка спектров проводилась с помощью программы ACD/NMR Processor Academic Edition (версии 12.01).

Подготовка образцов для ЯМР-анализа. Перед регистрацией спектров ЯМР образцы ГПМЦ подвергали гидролизу для снижения вязкости растворов.

Методика гидролиза: 0,10 г эфира целлюлозы растворяли в 2 мл 4 %-ного раствора трифторметансульфоновой кислоты в D_2O и нагревали в запаянной стеклянной ампуле при $100\text{--}110\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 90 мин. После окончания реакции смесь центрифугировали и отбирали пробу 0,9 мл для ЯМР-спектроскопии ^1H и ^{13}C .

Измерение динамической вязкости. Динамическую вязкость определяли на ротационном вискозиметре Brookfield DV-II+PRO (Brookfield Engineering Laboratories, Inc., США) для 1 %-ных водных растворов ГПМЦ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получение гидроксипропилметилцеллюлозы. Грубоизмельченные волокна пеньки выдержали в сушильном шкафу при $100\text{--}105\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 6 ч, затем – измельчали до фракции 0,1–0,2 мм на дробилке для зерна «Фермер» (Уралспецмаш, г. Миасс).

Полученный порошок пеньки обрабатывали 30 %-ным раствором гидроксида натрия. Для этого 30 г растительного материала в течение 24 ч замачивали при комнатной температуре в растворе щелочи, приготовленном из 40 г сухого NaOH и 80 мл воды.

Осадок растительного материала отфильтровывали на воронке Бюхнера под вакуумом и подсушивали в сушильном шкафу при $100\text{--}110\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3 ч. Полученную массу помещали в круглодонную трехгорлую колбу объемом 1 л, снабженную механической мешалкой, и заливали 20 мл 40 %-ного раствора гидроксида натрия, а также смесью 210 мл толуола и 80 мл пропанола-2.



Реакционную смесь интенсивно перемешивали при нагревании до 40–45 °С на протяжении 1 ч. Затем к ней добавляли диметилсульфат (0,35 моль; 44,15 г; 33,2 мл) и окись пропилена (0,11 моль; 6,4 г; 7,5 мл), после чего вновь интенсивно перемешивали при той же температуре в течение 6 ч. По окончании реакции продукт отфильтровывали под вакуумом.

Полученный осадок подсушивали на воздухе в течение 1–2 ч, затем помещали в химический стакан и нейтрализовали раствором уксусной кислоты (массовая доля кислоты 40 %) до pH 3–4 (требуется 50–60 мл). Сразу после нейтрализации продукт отфильтровывали под вакуумом. Осадок на фильтре промывали изопропиловым спиртом.

Окончательная сушка проводилась в два этапа: на воздухе – в течение 24 ч; в сушильном шкафу при 100–105 °С – еще 6 ч. В результате получили 35 г светло-коричневого порошка. На рисунке 1 приведена схема получения ГПМЦ.

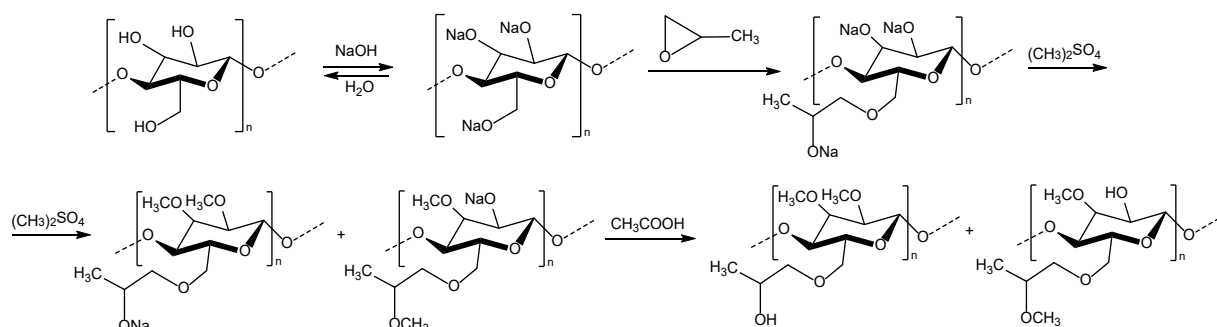


Рис. 1. Схема получения гидроксипропилметилцеллюлозы с использованием окиси пропилена и диметилсульфата, созданная в программе ChemDraw

Fig. 1. Scheme for obtaining hydroxypropylmethylcellulose using propylene oxide and dimethyl sulfate, created in ChemDraw software

Источник: здесь и далее рисунки составлены авторами
Source: here and further, tables are compiled by the authors

Для изучения влияния алкилирующих реагентов на процесс синтеза было проведено пять экспериментов, в которых варьировали количество диметилсульфата и окиси пропилена. В таблице приведены сетка экспериментов, а также параметры замещения и вязкости полученных образцов ГПМЦ.

Таблица. Параметры замещения и вязкости экспериментальных образцов
Table. Substitution and viscosity parameters of experimental samples

Масса диметилсульфата (C ₂ H ₆ O ₄ S), г / Dimethyl sulfate mass, g	Масса окиси пропилена (C ₃ H ₆ O), г / Propylene oxide mass, g	Параметры замещения / Substitution parameters				Вязкость 1 %-ного водного раствора, Па · с / Viscosity of 1 % aqueous solution, Pa · s	Выход, % / Yield, %
		DS (метил) / DS (methyl)	X _{MeO} , % / X _{MeO} , %	MS (2-гидроксипропил) / MS (2-hydroxypropyl)	X _{ГПО} , % / X _{ГПО} , %		
1	2	3	4	5	6	7	8
Эксперимент № 1 / Experiment no. 1							
30,00	5,00	1,41	21,76	0,21	8,12	35	81
Эксперимент № 2 / Experiment no. 2							
40,00	6,00	1,65	24,62	0,24	9,04	40	78
Эксперимент № 3 / Experiment no. 3							
44,15	6,40	1,75	25,52	0,31	11,37	44	77

Окончание таблицы / End of table

1	2	3	4	5	6	7	8
Эксперимент № 4 / Experiment no. 4							
50,00	7,00	1,85	26,44	0,41	14,53	49	79
Эксперимент № 5 / Experiment no. 5							
55,00	7,50	2,18	30,19	0,48	16,34	58	76

Примечания / Notes:

1. Вязкость измерялась на ротационном вискозиметре Brookfield при температуре 20 °С для 1 %-ных водных растворов / Viscosity was measured using a Brookfield rotational viscometer at 20 °C for 1 % aqueous solutions.
2. Все массы реагентов указаны в расчете на 30 г исходного растительного материала / All reagent masses are given per 30 g of initial plant material.
3. Данные представлены с округлением до двух десятичных знаков / Data are rounded to two decimal places.

Источник: таблица составлена авторами

Source: table is compiled by the authors

Параметры замещения ГПМЦ метильными (DS) и гидроксипропильными (MS) заместителями определяли в соответствии с ранее разработанной методикой³ на основе данных ЯМР ¹³С-спектроскопии продуктов кислотного гидролиза ГПМЦ.

Полученные значения степени замещения гидроксипропильными (MS) и метильными (DS) заместителями пересчитывали в процентное содержание метоксильных (X_{MeO}) и гидроксипропоксильных ($X_{гпо}$) групп по формулам, приведенным в работе⁴.

Вязкость полученных эфиров целлюлозы по Брукфильду измеряли с помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV-II+PRO. Для этого готовили 1 %-ные растворы образцов ГПМЦ путем растворения 2 г эфира целлюлозы в 98 г дистиллированной воды при перемешивании магнитной мешалкой в герметично закрытом сосуде в течение 24 ч.

Полученные образцы ГПМЦ были охарактеризованы методом ИК-Фурье-спектроскопии. На рисунке 2 приведены ИК-спектры исходной пеньки и полученного образца ГПМЦ. Как видно из рисунка, ИК-спектр ГПМЦ имеет много общего со спектром исходного растительного сырья, поскольку основные полосы поглощения обусловлены одними и теми же функциональными группами:

- в диапазоне 3 350–3 450 см⁻¹ наблюдалась широкая и интенсивная полоса, обусловленная валентными колебаниями $\nu(O-H)$, которые связаны водородными связями – как в целлюлозном остове, так и в гидроксипропильных заместителях;

- в области 2 900–2 800 см⁻¹ проявлялись валентные колебания $\nu(C-H)$ в метильных (CH_3), метиленовых (CH_2) и метиновых (CH) группах;

- полоса 1 630–1 660 см⁻¹ соответствовала деформационным колебаниям абсорбированной воды;

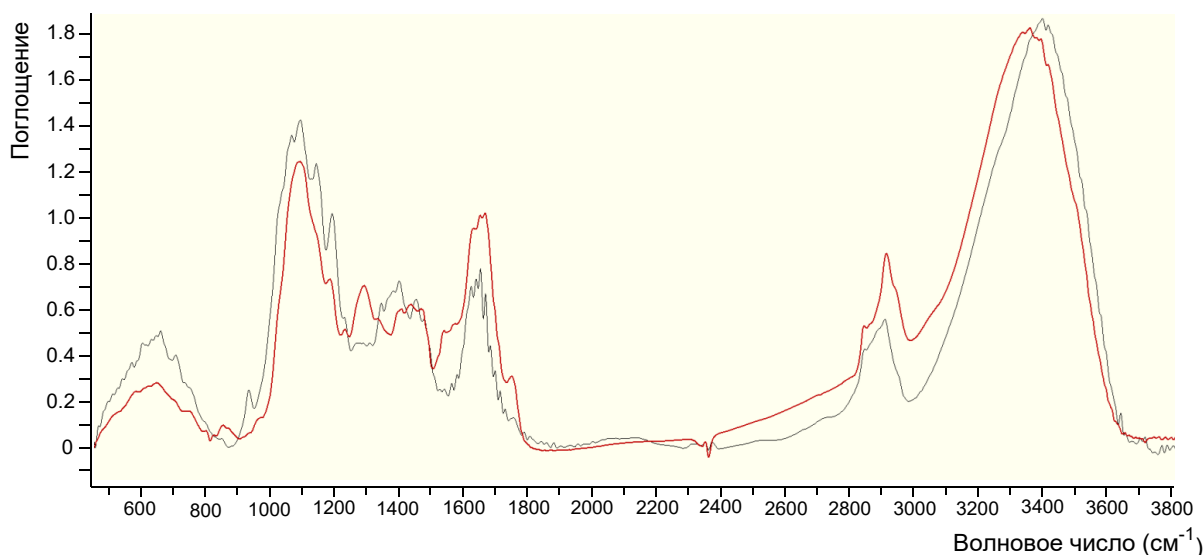
- приблизительно на 1 450 см⁻¹ фиксировались деформационные колебания $\delta(CH_2)$ и $\delta_{as}(CH_3)$, а около 1 375 см⁻¹ – симметричные деформационные колебания $\delta_s(CH_3)$ в метильных группах метильного и гидроксипропилового фрагмента;

³ Кострюков С. Г., Асфандеев А. Ю., Калязин В. А. Разработка методики определения содержания заместителей в эфирах целлюлозы с помощью ЯМР спектроскопии // LII Огарёвские чтения: материалы научной конф.: в 3 ч., Саранск, 06–10 декабря 2023 г. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2024. С. 84–89. <https://elibrary.ru/jztcka>; Асфандеев А. Ю., Калязин В. А., Яшина Е. Е., Кострюков С. Г. Методика определения содержания заместителей в гидроксипропилметилцеллюлозе с помощью ЯМР ¹H спектроскопии // Достижения молодых ученых: химические науки: сб. тез. IX Всерос. молодежной конф., Уфа, 23–24 мая 2024 г. Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. С. 252–253. <https://elibrary.ru/uilecj>

⁴ Кострюков С. Г., Асфандеев А. Ю., Калязин В. А. Разработка методики определения содержания заместителей в эфирах целлюлозы с помощью ЯМР спектроскопии...



- в интервале $1\ 100\text{--}1\ 000\text{ см}^{-1}$ наблюдались валентные колебания $\nu(\text{C--O--C})$ в гликозидных связях (скелет целлюлозы) и простых эфирных связях заместителей;
- полоса $\sim 1\ 055\text{ см}^{-1}$ представляет собой характерное поглощение для $\nu(\text{C--O})$ вторичных спиртов целлюлозного остова, а полоса $\sim 950\text{ см}^{-1}$ соответствует валентным колебаниям $\nu(\text{C--O})$ в структуре метоксигруппы.



Р и с . 2 . ИК-Фурье-спектры пеньки (красная линия) и ГПМЦ (черная линия), зарегистрированные на спектрометре «ИнфраЛЮМ ФТ-08» с обработкой данных в программе «СпектраЛЮМ»

Fig . 2 . FTIR spectra of hemp (red line) and HPMC (black line), recorded on the «InfraLYUM FT-08» spectrometer with data processing in «SpektralYUM» software

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты подтвердили эффективность разработанного метода синтеза гидроксипропилметилцеллюлозы из технической конопли с применением диметилсульфата и окиси пропилена в гетерогенной среде (толуол/изопропанол). Во всех пяти повторных опытах были получены продукты, однозначно идентифицированные как ГПМЦ по данным ИК- и ЯМР-спектроскопии.

Ключевым результатом исследования стала выявленная зависимость степени замещения от количества алкилирующих реагентов. Согласно сведениям таблицы, увеличение массовой доли диметилсульфата и окиси пропилена закономерно приводит к росту как степени метилирования (DS от 1,41 до 2,18), так и гидроксипропилирования (MS от 0,21 до 0,48), что свидетельствует об управляемости и воспроизводимости предложенного процесса.

Важнейшей эксплуатационной характеристикой ГПМЦ выступает вязкость ее водных растворов. В ходе исследования зафиксирован рост вязкости 2 %-ного водного раствора с 35 до 58 Па · с при увеличении степени замещения. Наблюдаемая зависимость согласуется с литературными данными и обусловлена, во-первых, ростом молекулярной массы полимера за счет введения заместителей, во-вторых, – изменением гидрофильно-гидрофобного баланса макромолекулы, что влияет на ее гидратацию и набухание в воде.

В рамках работы разработана и экспериментально апробирована лабораторная методика синтеза ГПМЦ из целлюлозы технической конопли. Метод основан на исполь-

зовании диметилсульфата и окиси пропилена в качестве алкилирующих агентов в гетерогенной среде толуол/изопропанол при атмосферном давлении и умеренной температуре (40–45 °С), что является его основным преимуществом по сравнению с традиционным промышленным синтезом в автоклавах.

Выход целевого продукта во всех экспериментах составил 76–81 %, что подтверждает высокую эффективность процесса. Установлена прямая зависимость степени замещения и молярной степени замещения, а также, как следствие, изменения вязкости водного раствора от количества введенных реагентов. Это позволяет целенаправленно синтезировать ГПМЦ с заданными техническими характеристиками. Структура полученных продуктов подтверждена методами ИК-спектроскопии и ЯМР-спектроскопии на ядрах ^1H и ^{13}C .

Таким образом, результаты исследования доказывают принципиальную возможность и практическую целесообразность получения ГПМЦ технического качества из альтернативного возобновляемого сырья (технической конопля) с использованием экономически эффективного лабораторного метода, что открывает широкие перспективы для дальнейшей оптимизации процесса и создания на его основе новых материалов.

Практическая значимость работы заключается в разработке конкурентоспособной технологии получения ГПМЦ из возобновляемого сырья – пеньки. Использование данного сырья позволит существенно снизить стоимость конечного продукта для таких отраслей, как производство строительных смесей, красок, пищевая, фармацевтическая и косметическая промышленность.

Основные ограничения разработанного метода связаны с изменчивостью состава и морфологии пеньки, что может привести к колебаниям степени замещения и молярной степени замещения, а также свойств ГПМЦ. Для применения в фармацевтике, косметологии и пищевой промышленности продукт потребует дополнительной стадии очистки.

В дальнейших исследованиях планируется оптимизировать процесс синтеза, изучить влияние последовательности и режимов ввода реагентов на результат, а также разработать щадящие режимы обработки, позволяющие свести к минимуму деградацию целлюлозы и сохранить вязкость конечного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cellulose Ethers / T. G. Majewicz [et al.] // Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 2002. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst044>
2. Демидов М. Л., Гурьев А. В. Разработка и оптимизация режимов варки полуцеллюлозы из осины // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2012. № 5 (329). С. 134–142. <https://elibrary.ru/penzvv>
3. О перспективах переработки конопляной лузги в целлюлозный продукт / И. Э. Миневич [и др.] // Химия растительного сырья. 2023. № 2. С. 345–354. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211359>
4. Пероксидная целлюлоза из стеблей пшеницы и конопля / Р. З. Пен [и др.] // Химия растительного сырья. 2023. № 4. С. 415–422. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230412954>
5. Cellulose Nanocrystals from Agriculture and Forestry Biomass: Synthesis Methods, Characterization and Industrial Applications / S. S. Qureshi [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2024. Vol. 31. P. 58745–58778. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35127-3>
6. Preparation of Hemp Nanocellulose and Its Use to Improve the Properties of Paper for Food Packaging / V. A. Barbash [et al.] // Cellulose. 2022. Vol. 29. P. 8305–8317. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04773-6>
7. Зайцева Л. А., Волкова А. В., Миневич И. Э. Получение целлюлозного продукта из конопляной лузги // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 174–183. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.023>

8. Kamide K. Cellulose and Cellulose Derivatives: Molecular Characterization and Its Applications. Amsterdam: Elsevier Science, 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82254-3.X5000-0>
9. Synthesis and Characterization of Methylcellulose from Sugar Cane Bagasse Cellulose / G. P. Rose [et al.] // Carbohydrate Polymers. 2007. Vol. 67, issue 2. P. 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.05.007>

REFERENCES

1. Majewicz T.G., Erazo-Majewicz P., Podlas T.J. Cellulose Ethers. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. 2002. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst044>
2. Demidov M.L., Guriev A.V. Development and Optimization of Cooking Regimes for Aspen Semicellulose. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2012;(5):134–142. (In Russ.) <https://elibrary.ru/penzv>
3. Minevich I.E., Nechiporenko A.P., Volkova A.V., Zaitseva L.A. On the Prospects of Hemp Husk Processing into Cellulosic Product. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2023;(2):345–354. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211359>
4. Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V., Marchenko R.A. Peroxide Cellulose from Wheat and Hemp Stems. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2023;(4):415–422. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230412954>
5. Qureshi S.S., Sabzoi N., Xu J., Vancov T., Chen C. Cellulose Nanocrystals from Agriculture and Forestry Biomass: Synthesis Methods, Characterization and Industrial Applications. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31:58745–58778. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35127-3>
6. Barbash V.A., Yashchenko O.V., Yakymenko O.S., Zakharko R.M., Myshak V.D. Preparation of Hemp Nanocellulose and Its Use to Improve the Properties of Paper for Food Packaging. *Cellulose*. 2022;29:8305–8317. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04773-6>
7. Zaitseva L.A., Volkova A.V., Minevich I.E. Production of Cellulosic Product from Hemp Husk. *Polzunovsky Vestnik*. 2023;(2):174–183. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.023>
8. Kamide K. Cellulose and Cellulose Derivatives: Molecular Characterization and Its Applications. Amsterdam: Elsevier Science, 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82254-3.X5000-0>
9. Rose G.P., Rodrigues Filho G., de Assunção R.M.N., Meireles C.daS., Vieira J.G., de Oliveira G.S. Synthesis and Characterization of Methylcellulose from Sugar Cane Bagasse Cellulose. *Carbohydrate Polymers*. 2007;67(2):182–189. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.05.007>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Асфандеев Андрей Юрьевич, аспирант Института наукоемких технологий и новых материалов Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3601-1005>, asfandeev.a.yu@gmail.com

Кострюков Сергей Геннадьевич, кандидат химических наук, доцент кафедры фундаментальной химии и химической технологии Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1774-0836>, SPIN-код: 4915-4366, kostryukov_sg@mail.ru

Бурмистрова Анастасия Александровна, студент Института наукоемких технологий и новых материалов Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3612-5959>, nastya.burmistrova1411@mail.ru

Кузьмичева Анастасия Алексеевна, студент Института наукоемких технологий и новых материалов Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5927-0080>, kuzmicheva_nastya04@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

А. Ю. Асфандеев – разработка концепции; курирование данных; формальный анализ; получение финансирования; проведение исследования; административное руководство исследовательским проектом; предоставление ресурсов; научное руководство; визуализация; написание черновика рукописи.

С. Г. Кострюков – разработка концепции; курирование данных; формальный анализ; проведение исследования; разработка методологии; научное руководство; написание рукописи – рецензирование и редактирование.

А. А. Бурмистрова – валидация результатов.

А. А. Кузьмичева – валидация результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 20.10.2025; одобрена после рецензирования 10.11.2025; принята к публикации 18.11.2025.

ABOUT THE AUTHORS

Andrey Yu. Asfandeev, Postgraduate Student at the Institute of High-Tech Technologies and New Materials, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk, 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3601-1005>, asfandeev.a.yu@gmail.com

Sergey G. Kostryukov, Cand.Sci. (Chem.), Associate Professor at the Department of Fundamental Chemistry and Chemical Technology, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk, 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1774-0836>, SPIN-code: 4915-4366, kostryukov_sg@mail.ru

Anastasia A. Burmistrova, Student at the Institute of High-Tech Technologies and New Materials, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk, 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3612-5959>, nastya.burmistrova1411@mail.ru

Anastasia A. Kuzmicheva, Student at the Institute of High-Tech Technologies and New Materials, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk, 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5927-0080>, kuzmicheva_nastya04@mail.ru

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

A. Yu. Asfandeev – conceptualization; data curation; formal analysis; funding acquisition; investigation; project administration; resources; supervision; visualization; writing – original draft preparation.

S. G. Kostryukov – conceptualization; data curation; formal analysis; investigation; methodology; supervision; writing – review and editing.

A. A. Burmistrova – validation.

A. A. Kuzmicheva – validation.

The authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 20.10.2025; revised 10.11.2025; accepted 18.11.2025.