

УДК 66.092

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ДЕЛИГНИФИКАЦИИ СОЛОМЫ ПШЕНИЦЫ В СРЕДЕ ГЛУБОКОГО ЭВТЕКТИЧЕСКОГО РАСТВОРИТЕЛЯ**

© С.С. Шашкина\*, С.Н. Евстафьев

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия, chifff19@mail.ru*

Исследование посвящено изучению эффективности извлечения лигнина при обработке соломы в среде глубокого эвтектического растворителя (DES), состоящего из хлорида холина и щавелевой кислоты с молярным соотношением 0.75 : 1. Эксперимент проводили в интервале температур 80–110 °C при атмосферном давлении. Из продуктов обработки выделяли фракцию, обогащенную целлюлозой (технической целлюлозы), а также фракции лигнина и гемицеллюлоз. Эффективность процесса оценивали по выходу фракции лигнина и степени делигнификации соломы. Установлено, что с повышением температуры обработки до 110 °C степень делигнификации соломы повышается до 83%, а выход фракции лигнина – до 15.5% на абсолютно сухую массу. Наряду с делигнификацией в исследуемом диапазоне температур наблюдается удаление гемицеллюлоз из биомассы соломы и, как следствие, повышение содержания целлюлозы в составе фракции технической целлюлозы. Структурные изменения полученных фракций технической целлюлозы были проанализированы с использованием методов ИК-спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Полученные SEM-изображения позволили наглядно проследить морфологические изменения структуры и сделать выводы об эффективности использования DES для нарушения связей между биополимерами лигноуглеводного комплекса соломы.

**Ключевые слова:** глубокий эвтектический растворитель, делигнификация, лигнин, солома пшеницы, техническая целлюлоза.

**Для цитирования:** Шашкина С.С., Евстафьев С.Н. Эффективность процесса делигнификации соломы пшеницы в среде глубокого эвтектического растворителя // Химия растительного сырья. 2024. №4. С. 64–71. DOI: 10.14258/jcprm.20240414932.

### **Введение**

Объемы отходов лесоперерабатывающего и агропромышленного комплекса ежегодно увеличиваются. В сложившихся в настоящее время условиях хранения и захоронения лигноцеллюлозных отходов все более остро встает вопрос о нанесении значительного ущерба окружающей среде и сопутствующих серьезных экономическим потерям. Решением проблемы рационального, экономически эффективного и экологически безопасного использования ресурсов является разработка способов комплексной переработки лигноцеллюлозного сырья, включающих также переработку отходов. Подобный подход позволит не только решить проблему ухудшения экологической обстановки, но и расширить сырьевую базу, вовлекая в производственный цикл не только древесные отходы, но и отходы сельскохозяйственных производств.

Лигноцеллюлозные отходы сельскохозяйственных производств, в частности, солома, могут использоваться в качестве дешевого возобновляемого ресурса. Основные компоненты – целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин – находят применение в качестве сырья для получения целого набора ценных соединений, производства биотоплива и т.д. [1–3]. Однако сложная структурная организация лигноуглеводного комплекса, присутствие в составе лигнина значительно осложняет процесс переработки. Соответственно, основная задача предварительной обработки состоит в эффективном нарушении связей лигноуглеводного комплекса, что позволит повысить доступность биополимеров для последующей переработки.

Известные технологии, как правило, предполагают большие экономические затраты, проведение процесса в жестких условиях (высокие температуры, давление), а также использования токсичных реагентов, наносящих серьезный ущерб окружающей среде [4, 5]. В последние годы большое внимание уделяется

\* Автор, с которым следует вести переписку.

применению «зеленых» растворителей. В качестве альтернативы летучим органическим растворителям рассматриваются ионные жидкости (ИЖ), отличающиеся высокой стабильностью и растворяющей способностью. В работах [6–8] показано, что их применение позволяет эффективно перерабатывать растительную биомассу в сравнительно более мягких условиях. Несмотря на это, ИЖ имеют ряд недостатков: высокая стоимость и трудоемкий, многостадийный процесс синтеза [9, 10].

Глубокие эвтектические растворители (DES) являются перспективной альтернативой применяемым в настоящее время растворителям. В отличие от ИЖ [11, 12] они просты в получении и не требуют высоких затрат. DES представляют собой смеси из двух или более компонентов: доноров и акцепторов водородных связей, взаимодействие которых обеспечивает значительно более низкую – в отличие от отдельных компонентов – температуру плавления полученной смеси [13]. Соотношение акцептора и донора, а также условия получения определяют свойства растворителя (вязкость, растворяющую способность и т.д.). В ряде работ [14–18] показана высокая эффективность конверсии различных видов растительной биомассы, извлечения отдельных ее компонентов. В зависимости от цели применения необходимо подобрать оптимальный состав и условия получения глубокого эвтектического растворителя. Механизм растворения сырья в среде DES обусловлен конкурентным связыванием полярных групп биополимера (гидроксильных, карбоксильных и т.д.) молекулами растворителя [19]. Хлорид холина является одним из наиболее часто применяемых при получении DES-реактивов – акцепторов водородной связи. Присутствие органической кислоты не только обуславливает увеличение силы водородных связей, но и создает кислую среду, что оказывает наиболее эффективное воздействие как на межмолекулярные связи лигноуглеводного комплекса, так и на внутримолекулярные связи присутствующих биополимеров (в частности, лигнина). Большая часть целлюлозы не подвергается воздействию и может быть извлечена из смеси продуктов при последующем фракционировании. Для наиболее эффективного протекания процесса делигнификации требуется определить оптимальные условия обработки выбранного лигноцеллюлозного сырья в среде DES.

Целью работы явилось изучение влияния температуры обработки на степень делигнификации соломы пшеницы в системе хлорид холина/щавелевая кислота.

### Экспериментальная часть

*Получение глубокого эвтектического растворителя.* Хлорид холина и щавелевую кислоту предварительно сушили под вакуумом при температуре 70 °C в течение 5 ч. Смесь реагентов (молярное соотношение 0.75 : 1) выдерживали при температуре 80 °C и постоянном перемешивании в течение 1 ч. Полученную прозрачную жидкость медленно охлаждали и хранили в эксикаторе.

*Объект исследования.* В работе использовали солому пшеницы с опытного участка Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского. Компонентный состав соломы, % на абсолютно сухую массу (а.с.м.): целлюлоза – 49.3; лигнин – 18.7; гемицеллюлозы – 21.3. Предварительно обессмоленную спирто-толуольной смесью солому измельчали до крупности 0.2 мм и высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы.

*Обработка соломы в среде DES.* Основные параметры процесса обработки приняты в соответствии с работами [17, 18]. К навеске соломы (около 1 г) добавляли DES (гидромодуль 1 : 20). Эксперимент проводили при температурах 80, 90, 100 и 110 °C при постоянном перемешивании. Продолжительность – 3 ч. По окончании обработки смесь продуктов центрифугировали. Твердые продукты промывали водой до нейтральной реакции и последовательно фракционировали согласно схеме, приведенной на рисунке 1. Для выделения DES промывные воды объединяли с супернатантом и концентрировали на роторном испарителе. В результате фракционирования твердых продуктов были выделены фракции технической целлюлозы (ТЦ), гемицеллюлоз (ГЦ) и лигнина. Все эксперименты выполнены в трех повторностях. Компонентный состав исходной соломы и фракции ТЦ определяли по стандартным методикам [20].

Степень гидролиза целлюлозы рассчитывали как отношение массы удаленной при обработке целлюлозы к массе целлюлозы в исходной навеске, в процентах.

Степень делигнификации рассчитывали как отношение массы удаленного при обработке лигнина к массе лигнина в исходной навеске соломы, в процентах.

Полученные фракции анализировали на ИК-Фурье-спектрофотометре Agilent 4350. Интервал сканирования – 400–4000 см<sup>3</sup>. Образцы для исследования готовили в виде спрессованных таблеток. Соотношение образец / KBr – 1–2 мг / 200 мг.

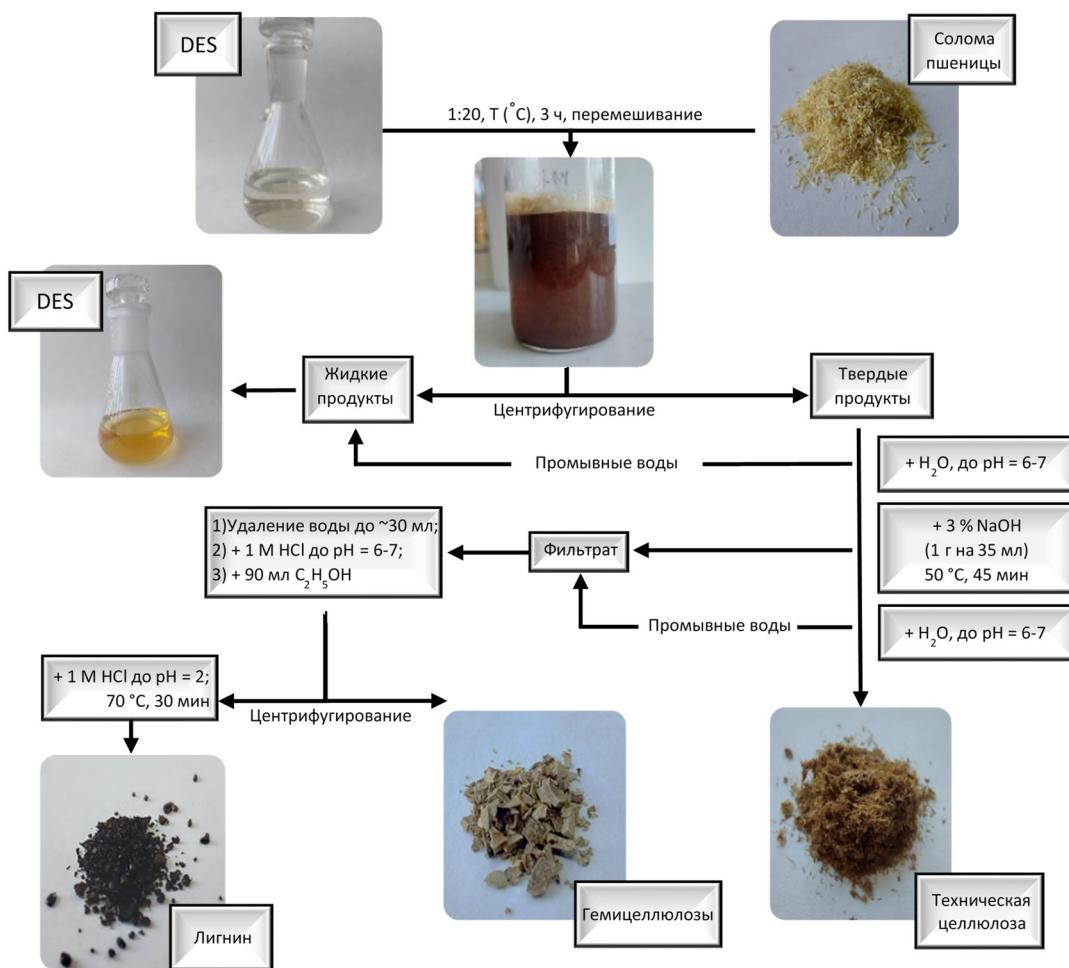


Рис. 1. Схема фракционирования продуктов обработки соломы пшеницы в среде глубокого эвтектического растворителя

Изучение морфологических изменений фракций ТЦ проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JEB-Z4500.

#### Обсуждение результатов

Согласно данным, приведенным на рисунке 2, степень делигнификации биомассы соломы с увеличением температуры обработки повышается. Выход фракции лигнина при 80 °C составил 4.5% а.с.м. и с повышением температуры до 110 °C увеличился в 3.5 раза. В этих условиях из биомассы соломы было извлечено около 83% исходного лигнина (рис. 3). Наряду с лигнином в условиях обработки происходит извлечение гемицеллюлоз. Причем этот процесс протекает более эффективно, чем делигнификация. При 80 °C было выделено 72%, а при 110 °C – более 95% исходных гемицеллюлоз. Полученные данные свидетельствуют о том, что повышение температуры в исследуемом интервале способствует разрушению химических связей между компонентами и растворению лигнина и гемицеллюлоз в DES.

Выход фракции ТЦ в интервале 80–90 °C изменился незначительно. При последующем повышении температуры он снижался и при 110 °C составил 39.3%, что ниже на 7.5% выхода ТЦ при 80 °C. Степень гидролиза целлюлозы при этой температуре составила 25.9%, а при повышении температуры до 110 °C увеличилась до 33.8%. Исходя из полученных данных повышение температуры обработки, наряду с удалением лигнина и гемицеллюлоз, способствует протеканию термохимических превращений целлюлозы.

Эффективность процессов делигнификации и удаления гемицеллюлоз также подтверждается данными компонентного состава фракций технической целлюлозы. Во фракции, полученной после обработки при 80 °C, содержание гемицеллюлоз снизилось на 11.6%, а лигнина – на 8.9% от исходных значений в соломе. При этом содержание целлюлозы возросло на 28.8% (табл.). Наибольшее значение зафиксировано для фракции, полученной после обработки при 100 °C – содержание целлюлозы увеличилось в 1.7 раза.

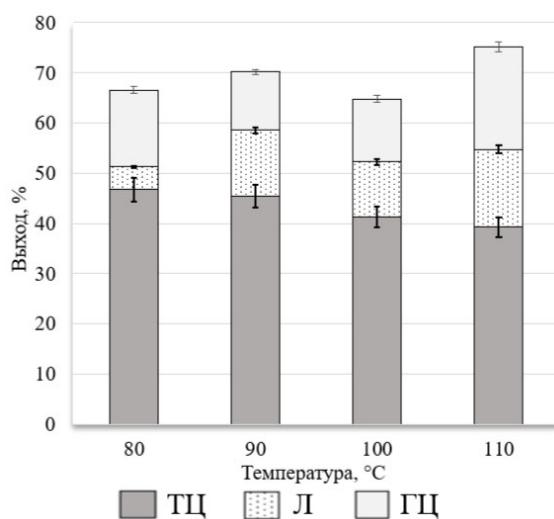


Рис. 2. Зависимость выхода фракций от температуры обработки в среде глубокого эвтектического растворителя

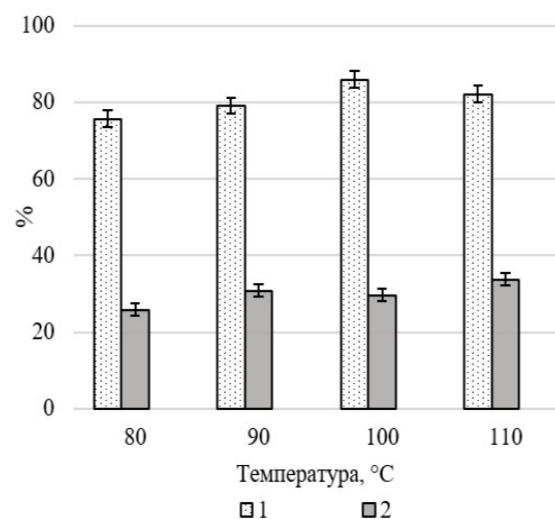


Рис. 3. Зависимость степени делигнификации (1) и степени гидролиза целлюлозы (2) от температуры

#### Компонентный состав фракций технической целлюлозы

Образец	Компонентный состав, % на а.с.м. соломы		
	Целлюлоза, %	Лигнин, %	Гемицеллюлозы, %
Исходная солома	49.3	18.7	21.3
ТЦ/80*	78.1	9.7	9.7
ТЦ/90	75.2	8.6	8.4
ТЦ/100	83.8	6.4	4.1
ТЦ/110	83.1	8.5	1.6

\* – температура эксперимента, °С.

При повышении температуры обработки в исследуемом интервале температур эффективность процесса извлечения гемицеллюлоз и лигнина из биомассы возрастает. В результате обработки при 110 °С удалось практически полностью извлечь гемицеллюлозы из соломы (92.3% от исходного содержания). Максимальная эффективность процесса делигнификации отмечена для опыта при 100 °С – содержание лигнина снизилось на 66%. Повышение содержания лигнина во фракции ТЦ при 110 °С может являться следствием образования псевдолигнина, поэтому происходит снижение степени делигнификации.

Протекание процесса делигнификации при обработке в среде DES также подтверждается изменениями на ИК-спектрах фракций технической целлюлозы (рис. 4). На ИК-спектре исходной соломы присутствуют полосы поглощения, характерные для основных компонентов исследуемого сырья (целлюлозы, лигнина и гемицеллюлоз). С повышением температуры обработки снижается интенсивность полос поглощения, отражающих колебания карбонильных групп ( $1631 \text{ см}^{-1}$ ), деформационные колебания  $\text{CH}_3$ - и  $\text{CH}_2$ -групп ( $1453 \text{ см}^{-1}$ ), а также характерных для структурных фрагментов лигнина полос поглощения при  $1512$  и  $1246 \text{ см}^{-1}$  (валентные колебания ароматического кольца).

С повышением температуры также отмечается снижение интенсивности характерных для гемицеллюлоз полос при  $1373 \text{ см}^{-1}$  (колебания C-H связей) и  $1050 \text{ см}^{-1}$  (валентные колебания C-O в спиртовых группах).

В отличие от спектра исходной соломы в спектрах ТЦ отсутствует полоса поглощения при  $1731 \text{ см}^{-1}$ , отражающая присутствие сложноэфирных групп, что свидетельствует о разрушении этих связей в биомассе соломы. Нарушение водородных связей лигноуглеводного комплекса отражается в снижении интенсивности полос поглощения валентных колебаний гидроксильных групп при  $3426 \text{ см}^{-1}$ . Можно заключить, что обработка в среде DES в исследуемом интервале позволяет эффективно разрушать межмолекулярные взаимодействия между биополимерами.

Для оценки изменений структуры биомассы после обработки в среде DES были проанализированы SEM-изображения. В исходной структуре соломы присутствуют волокна целлюлозы и гемицеллюлоз в окружении лигнина (рис. 5а).

Плотная упорядоченная структура необработанной соломы ограничивает доступ непосредственно к целлюлозе, тем самым препятствуя воздействию ферментов. На снимках хорошо видно, что даже при невысокой температуре обработки в структуре возникают разрывы (рис. 5б).

Подобные полости являются следствием нарушений макромолекулярной структуры лигноуглеводного комплекса, благодаря которым доступность биомассы для последующей обработки повышается.

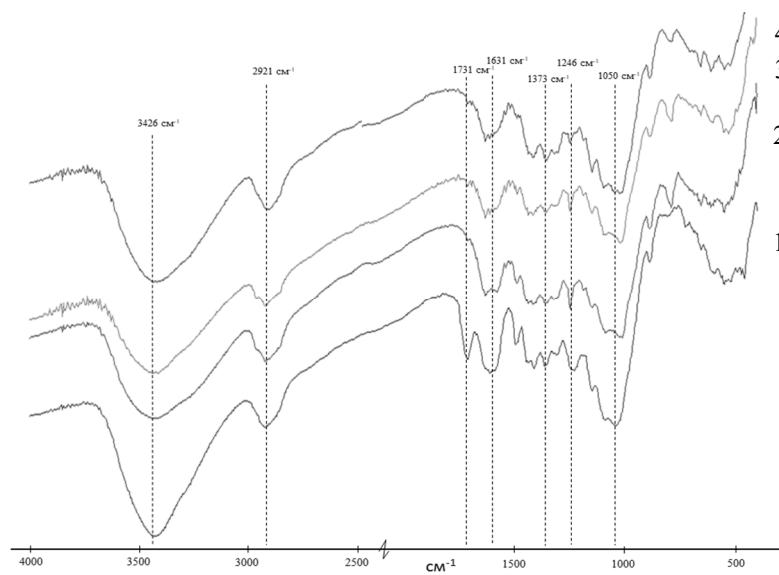


Рис. 4. ИК-спектры исходной соломы (1) и фракций ТЦ, полученных при температуре 80 °C (2), 100 °C (3), 110 °C (4)

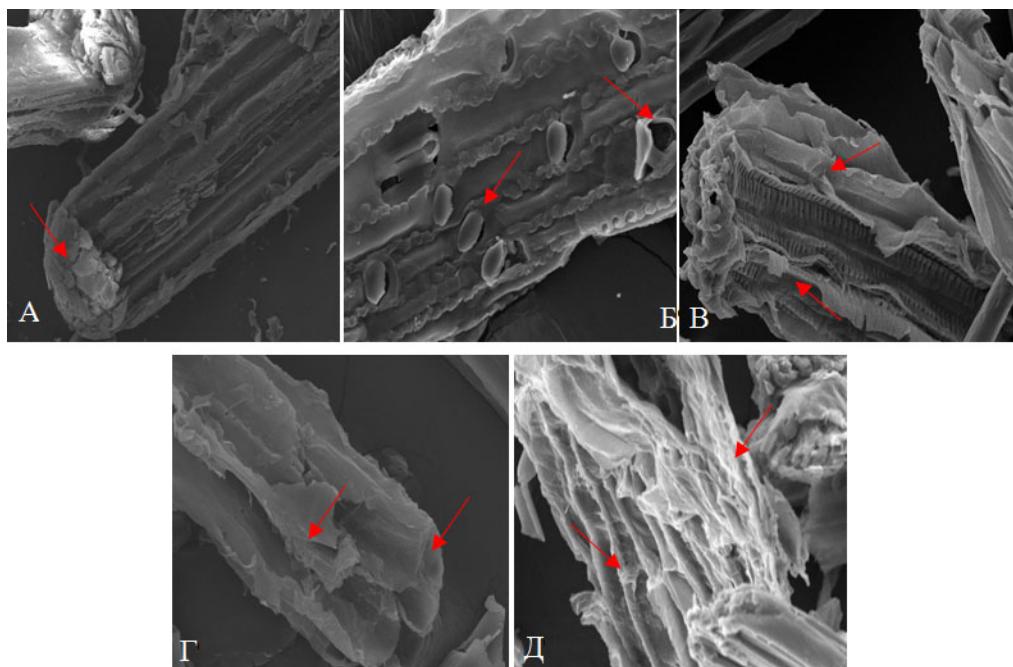


Рис. 5. SEM-изображения: а) исходная солома; фракции ТЦ, полученные при температуре: б) 80 °C; в) 90 °C; г) 100 °C; д) 110 °C

По мере повышения температуры в структуре биомассы наблюдаются более выраженные нарушения. Во фракции ТЦ, полученной при температуре 90 °C (рис. 5в), отмечаются нарушения связей лигноуглеводного комплекса. Гидролиз и частичное удаление гемицеллюз и лигнина привело к проявлению внутренней волокнистой каркасной структуры с заметными полостями между отдельными волокнами. Снимки фракции ТЦ (рис. 5г), полученной при обработке в среде DES при 100 °C, свидетельствуют о глубокой деструкции сырья. Рыхлая структура свидетельствует о высокой эффективности нарушения межмолекулярных связей между биополимерами сырья и удалении лигнина. Однако с повышением температуры обработки (рис. 5г, д) в структуре отмечается присутствие большего числа отдельных мелких фрагментов. В сочетании с неровными краями и общей деструкцией можно заключить, что при повышенных температурах наряду с делигнификацией происходит разрушение остальных биополимеров, входящих в состав (целлюлозы, гемицеллюз).

### Выходы

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения DES-состава хлорид холина/щавелевая кислота (0.75 : 1) для делигнификации соломы пшеницы. Анализ структурных изменений подтверждает, что с повышением температуры в интервале 80–100 °C активно протекает нарушение межмолекулярных связей лигноуглеводного комплекса. Оптимальной температурой обработки является 100 °C, так как полученная фракция ТЦ характеризуется наибольшим содержанием целлюлозы (83.8%) и наименьшим – лигнина (6.4%). Установлено, что повышение температуры в исследуемом интервале способствует извлечению лигнина и гемицеллюз. Полученная фракция ТЦ обогащена целлюлозой и может быть использована для получения ценных продуктов с добавленной стоимостью, а усовершенствование процесса обработки возможно путем применения физических методов воздействия (ультразвук, СВЧ и т.д.).

### Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Иркутского национального исследовательского технического университета. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

### Конфликт интересов

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

### Открытый доступ

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

### Список литературы

1. Singh A., Prajapati P., Vyas S., Gaur V.K., Sindhu R., Binod P., Kumar V., Singhania R.R., Awasthi M.K., Zhang Z., Varjani S. A Comprehensive Review of Feedstocks as Sustainable Substrates for Next-Generation Biofuels // Bioenergy Research. 2023. Vol. 16. Pp. 105–122. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10440-2>.
2. Zhang J., Yang J., Zhang H., Zhang Z., Zhang Y. Research status and future development of biomass liquid fuels // BioResources. 2021. Vol. 16(2). Pp. 4523–4543. <https://doi.org/10.1537/biores.16.2.Zhang>.
3. Ayodele B.V., Alsaffar M.A., Mustapa S.I. An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first- and second-generation sugar-based feedstocks // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 245. 118857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118857>.
4. Kumar B., Bhardwaj N., Agrawal K., Chaturvedi V., Verma P. Current perspective on pretreatment technologies using lignocellulosic biomass: An emerging biorefinery concept // Fuel Processing Technology. 2020. Vol. 199. 106244. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106244>.
5. Den W., Sharma V.K., Lee M., Nadadur G., Varma R.S. Lignocellulosic biomass transformations via greener oxidative pretreatment processes: Access to energy and value-added chemicals // Frontiers in Chemistry. 2018. Vol. 6. Pp. 1–23. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00141>.
6. Евстафьев С.Н., Хоанг К.К. Влияние условий обработки на выход и состав продуктов фракционирования соломы пшеницы в среде хлорида 1-бутил-3-метилимидазолия // Химия растительного сырья. 2016. №4. С. 27–34. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2016041308>.
7. Cristino A.F., Logan D., Bordado J.C., Galhano dos Santos R. The Role of Ionic Liquids on Biomass Liquefaction – A Short Review of the Recent Advances // Processes. 2021. Vol. 9. 1214. <https://doi.org/10.3390/pr9071214>.

8. Ocreto J.B., Chen W.-H., Rollon A., Ong H.C., Petrisans A., Petrisans M., De Luna M.D.G. Ionic liquid dissolution utilized for biomass conversion into biofuels, value-added chemicals and advanced materials: A comprehensive review // *Chemical Engineering Journal*. 2022. Vol. 445. 136733. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136733>.
9. Vigier K.D.O., Chatel G., Jérôme F. Contribution of Deep Eutectic Solvents for Biomass Processing: Opportunities, Challenges, and Limitations // *Chem. Cat. Chem.* 2015. Vol. 7. Pp. 1250–1260. <https://doi.org/10.1002/cctc.201500134>.
10. Chen Y., Mu T. Application of deep eutectic solvent in biomass pretreatment and conversion // *Green Energy & Environment*. 2019. Vol. 4. Pp. 95–115. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2019.01.012>.
11. Vanda H., Dai Y., Wilson E.G., Verpoorte R., Choi Y.H. Green solvents from ionic liquids and deep eutectic solvents to natural deep eutectic solvents // *Comptes Rendus Chimie*. 2018. Vol. 21. Pp. 628–638. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.04.002>.
12. Plotka-Wasylka J., de la Guardia M., Andruch V., Vilkova M. Deep eutectic solvents vs ionic liquids: Similarities and differences // *Microchemical Journal*. 2020. Vol. 159. 105539. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105539>.
13. Abbott A.P., Capper G., Davies D.L., Rasheed R.K., Tambyrajah V. Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures // *Chemical Communication*. 2003. Pp. 70–71.
14. Liu Y., Guo B., Xia Q., Meng J., Chen W., Liu S., Wang Q., Liu Y., Li J., Yu H. Efficient Cleavage of Strong Hydrogen Bonds in Cotton by Deep Eutectic Solvents and Facile Fabrication of Cellulose Nanocrystals in High Yields // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2017. Pp. 7623–7631. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00954>.
15. Lee K.M., Hong J.Y., Tey W.Y. Combination of ultrasonication and deep eutectic solvent in pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced enzymatic saccharification // *Cellulose*. 2021. Vol. 28. Pp. 1513–1526. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03598-5>.
16. Li W., Amos K., Li M., Pu Y., Debolt S., Ragauskas A.J., Shi J. Fractionation and characterization of lignin streams from unique high-lignin content endocarp feedstocks // *Biotechnology for Biofuels*. 2018. Vol. 11. 304. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1305-7>.
17. Ci Y.-H., Yu F., Zhou C.-X., Mo H., Li Z.-Y., Ma Y.-Q., Zang L.-H. New ternary deep eutectic solvents for effective wheat straw deconstruction into its high-value utilization under near-neutral conditions // *Green Chemistry*. 2020. Vol. 22. Pp. 8713–8720. <https://doi.org/10.1039/D0GC03240A>.
18. Malaek H., Housaindokht M.R., Monhemi H., Izadyar M. Deep eutectic solvent as an efficient molecular liquid for lignin solubilization and wood delignification // *Journal of Molecular Liquids*. 2018. Pp. 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.001>.
19. Hakkinen R., Abbott A. Solvation of carbohydrates in five choline chloride-based deep eutectic solvents and the implication for cellulose solubility // *Green Chemistry*. 2019. Vol. 21. Pp. 4673–4682. <https://doi.org/10.1039/C9GC00559E>.
20. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учебное пособие для вузов. М., 1991. 320 с.

Поступила в редакцию 27 марта 2024 г.

После переработки 20 мая 2024 г.

Принята к публикации 18 июня 2024 г.

Shashkina S.S.\*<sup>1</sup>, Evstafiev S.N. THE EFFECTIVENESS OF USING DEEP EUTECTIC SOLVENT ON DELIGNIFICATION OF WHEAT STRAW

*1Irkutsk National Research Technical University, Lermontova st., 83, Irkutsk, 664074, Russia, chiffa19@mail.ru*

The research is dedicated to study the efficiency of lignin extraction using deep eutectic solvent (DES) composed of choline chloride and oxalic acid (0.75 : 1). The experiment was conducted in the temperature range 80–110 °C. The cellulose-enriched fraction (technical cellulose), as well as lignin and hemicellulose fractions were isolated from the treatment products. Evaluation of the effectiveness was carried out by the yield of lignin fraction and degree of delignification. It was found that increasing the temperature up to 110 °C caused the increase of delignification of wheat straw degree to 83%, and yield of lignin fraction up to 15.5% dry mass. Along with delignification, removal of hemicellulose from straw biomass in this temperature range and, as a consequence, an increase in the cellulose content of the technical cellulose fraction was observed. The structural changes of the technical cellulose were analyzed using IR-spectroscopy and scanning electron microscopy methods. The obtained SEM-images allowed to clearly trace morphological changes of structure and to draw conclusions about the effectiveness using DES on breaking the bonds between the biopolymers of the lignocarbohydrate complex of wheat straw.

**Keywords:** deep eutectic solvent, delignification, lignin, wheat straw, technical cellulose.

**For citing:** Shashkina S.S., Evstafiev S.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 4, pp. 64–71. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240414932.

\* Corresponding author.

**References**

1. Singh A., Prajapati P., Vyas S., Gaur V.K., Sindhu R., Binod P., Kumar V., Singhania R.R., Awasthi M.K., Zhang Z., Varjani S. *Bioenergy Research*, 2023, vol. 16, pp. 105–122. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10440-2>.
2. Zhang J., Yang J., Zhang H., Zhang Z., Zhang Y. *BioResources*, 2021, vol. 16(2), pp. 4523–4543. <https://doi.org/10.15376/biores.16.2.Zhang>.
3. Ayodele B.V., Alsaffar M.A., Mustapa S.I. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 245, 118857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118857>.
4. Kumar B., Bhardwaj N., Agrawal K., Chaturvedi V., Verma P. *Fuel Processing Technology*, 2020, vol. 199, 106244. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106244>.
5. Den W., Sharma V.K., Lee M., Nadadur G., Varma R.S. *Frontiers in Chemistry*, 2018, vol. 6, pp. 1–23. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00141>.
6. Yevstafyev S.N., Khoang K.K. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2016, no. 4, pp. 27–34. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2016041308>. (in Russ.).
7. Cristino A.F., Logan D., Bordado J.C., Galhano dos Santos R. *Processes*, 2021, vol. 9, 1214. <https://doi.org/10.3390/pr9071214>.
8. Ocreto J.B., Chen W.-H., Rollon A., Ong H.C., Petrisans A., Petrisans M., De Luna M.D.G. *Chemical Engineering Journal*, 2022, vol. 445, 136733. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136733>.
9. Vigier K.D.O., Chatel G., Jérôme F. *Chem. Cat. Chem.*, 2015, vol. 7, pp. 1250–1260. <https://doi.org/10.1002/cctc.201500134>.
10. Chen Y., Mu T. *Green Energy & Environment*, 2019, vol. 4, pp. 95–115. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2019.01.012>.
11. Vanda H., Dai Y., Wilson E.G., Verpoorte R., Choi Y.H. *Comptes Rendus Chimie*, 2018, vol. 21, pp. 628–638. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.04.002>.
12. Plotka-Wasylka J., de la Guardia M., Andruch V., Vilkova M. *Microchemical Journal*, 2020, vol. 159, 105539. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105539>.
13. Abbott A.P., Capper G., Davies D.L., Rasheed R.K., Tambyrajah V. *Chemical Communication*, 2003, pp. 70–71.
14. Liu Y., Guo B., Xia Q., Meng J., Chen W., Liu S., Wang Q., Liu Y., Li J., Yu H. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, pp. 7623–7631. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00954>.
15. Lee K.M., Hong J.Y., Tey W.Y. *Cellulose*, 2021, vol. 28, pp. 1513–1526. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03598-5>.
16. Li W., Amos K., Li M., Pu Y., Debolt S., Ragauskas A.J., Shi J. *Biotechnology for Biofuels*, 2018, vol. 11, 304. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1305-7>.
17. Ci Y.-H., Yu F., Zhou C.-X., Mo H., Li Z.-Y., Ma Y.-Q., Zang L.-H. *Green Chemistry*, 2020, vol. 22, pp. 8713–8720. <https://doi.org/10.1039/D0GC03240A>.
18. Malaek H., Housaindokht M.R., Monhemi H., Izadyar M. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, pp. 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.001>.
19. Hakkinen R., Abbott A. *Green Chemistry*, 2019, vol. 21, pp. 4673–4682. <https://doi.org/10.1039/C9GC00559E>.
20. Obolenskaya A.V., Yel'nitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratornyye raboty po khimii drevesiny i tselyulozy: uchebnoye posobiye dlya vuzov*. [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose: a textbook for universities]. Moscow, 1991, 320 p.

*Received March 27, 2024**Revised May 20, 2024**Accepted June 18, 2024***Сведения об авторах**

Шашкина Софья Сергеевна – аспирант,  
chiffa19@mail.ru

Евстафьев Сергей Николаевич – доктор химических  
наук, профессор, заведующий кафедрой химии  
и биотехнологии им. В.В. Тутуриной, esn@istu.edu

**Information about authors**

Shashkina Sophie Sergeevna – postgraduate student,  
chiffa19@mail.ru

Evstafiev Sergey Nikolaevich – Doctor of Chemical  
Sciences, Professor, Head of the Department of Chemistry  
and Biotechnology named after V.V. Tuturina, esn@istu.edu