

УДК 633.584.1(047.31)

**Л. А. Сергеенко<sup>1</sup>, А. С. Логвинова<sup>2</sup>, В. С. Болтовский<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет  
<sup>2</sup>ООО «Фермент»

### ПОДГОТОВКА СОЛОМЫ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР К БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ

Приведены результаты исследований по предварительной обработке соломы зерновых культур (пшеницы яровой и тритикале) гидротермическим, термокаталитическим, автокаталитическим методами и под воздействием электромагнитного поля СВЧ. Полученные результаты свидетельствуют о возможности их применения для предварительной подготовки соломы перед дальнейшей биотехнологической переработкой.

Для практической реализации в кормопроизводстве и при микробиологической переработке соломы в этанол целесообразно использование предварительной гидротермической обработки пропариванием. При переработке с целью получения этилового спирта гидротермическая предобработка соломы может быть проведена аналогично стадии разваривания зернового сырья перед «осахариванием». Предварительная обработка соломы повышает ее перевариваемость и эффективность применения при силосовании, например, смесей зеленой массы растений и соломы.

**Ключевые слова:** солома зерновых культур, гидротермическая предобработка, термокаталитическая предобработка, автогидролиз, СВЧ-обработка.

**L. A. Sergeenko<sup>1</sup>, A. S. Logvinova<sup>2</sup>, V. S. Boltovskiy<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>Belarusian State Technological University  
<sup>2</sup>ООО “Ferment”

### GRAIN CROPS STRAW PREPARING FOR BIOTECHNOLOGICAL PROCESSING

The results of studies on pretreatment of grain crops straw (spring wheat and triticale) by the following methods: hydrothermal, thermocatalytic, autocatalytic and under the influence of electromagnetic field of microwave are presented. The obtained results indicate the possibility of using these methods for the preliminary preparation of straw before further biotechnological processing.

For practical implementation in feed production and for microbiological processing of straw into ethanol, it is advisable to use hydrothermal treatment by evaporation. When processing to obtain ethyl alcohol, hydrothermal pretreatment of straw can be carried out similarly to the stage of boiling of grain raw materials before “saccharification”. Pretreatment of straw can improve the efficiency of its use in fodder production in silage, for example, mixtures of green mass of plants and straw.

**Key words:** grain straw, hydrothermal pretreatment, thermocatalytic pretreatment, autohydrolysis, microwave treatment.

**Введение.** В мировом земледелии зерновые и зернобобовые культуры занимают ведущее место среди сельскохозяйственной продукции. Ежегодно в мире в процессе сбора и переработки сельскохозяйственных культур образуется 4–5 млрд т растительных отходов, которые являются уникальным источником высокомолекулярных углеводов [1].

В Республике Беларусь после сбора урожая в среднем образуется 10,0–10,5 млн т отходов, значительную часть которых (около 7 млн т) составляет солома зерновых культур [2]. На подстилку и корм для животных, утепление ферм и укрытие буртов, на производство удобрений и топлива ориентировочно используется от 20 до 25% от всего объема производства соломы пшеницы [3, 4]. Таким образом, создается сырьевая база в объемах, достаточных для развития технологии

глубокой переработки биополимеров растительной биомассы для получения ценной продукции с высокой добавленной стоимостью [5].

Основными компонентами растительных клеток являются целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин. Компонентный состав соломы обуславливает производство из нее разнообразных ценных продуктов, что в последние десятилетия стало одним из основных направлений интенсивных исследований и разработок [5–10].

Химический состав соломы неоднороден и изменяется в зависимости от вида культуры (пшеница, рожь, овес, рапс и т. д.), климатической зоны, времени посева (яровая, озимая, яровая, озимая-стерновка), способов уборки, обмолота, хранения и других факторов [9].

Солома является ценным сырьем для получения при ее биотехнологической переработке

белоксодержащих кормовых добавок, биоэтанола и других ценных продуктов.

**Основная часть.** Наиболее ценной для кормления животных является солома яровых культур благодаря высокому содержанию сырого протеина и жира. Однако прочный лигноуглеводный комплекс соломы и высокое содержание лигнина (13,9–14,8%) определяют ее низкую перевариваемость (целлюлоза переваривается менее чем на 50%, протеин – на 15–25% [11]) и реакционную способность [12–17].

Вследствие этого скармливание соломы в неподготовленном виде малоэффективно, а

переработка химическими и микробиологическими методами затруднена, поэтому для повышения их эффективности проводят предварительную обработку различными *методами*: физическими, химическими, биологическими и комбинированными. Они обеспечивают разрушение кристаллической структуры целлюлозы, гидролиз гемицеллюлозы и (или) удаление лигнина, увеличение поверхности целлюлозы [6, 18].

Сравнительная оценка наиболее эффективных способов предварительной обработки растительных отходов сельскохозяйственного производства представлена в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристика различных методов предварительной обработки соломы и других видов растительного сырья**

Метод обработки, параметры	Эффективность	Преимущества	Недостатки	Источник
Ультразвуковое излучение (20 кГц, 40 с)	Разрушение надмолекулярной структуры целлюлозы, олигомеризация полисахаридов, частичное превращение олигомеров в мономеры (в зависимости от мощности воздействия)	Нет загрязнения окружающей среды, высокая эффективность, интенсификация процесса	Необходимо специальное оборудование	[19]
γ-Облучение (доза облучения, МГр: 0,6–2,0)	Повышение содержания легкогидролизуемых полисахаридов; превращение полисахаридов в олигомеры	Нет загрязнения окружающей среды, удовлетворительная эффективность	Необходимо специальное оборудование, энергоёмкость	[20, 21]
СВЧ-обработка (2450 ± 50 МГц, 3%-ный раствор H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Превращение полисахаридов в олигомеры; увеличение количества редуцирующих веществ в растворе	Высокая эффективность, интенсификация процесса	То же	[22, 23]
Термообработка (160–200°C; 5–9 ч)	Повышение реакционной поверхности целлюлозы	Доступность в реализации	Невысокая эффективность	[24, 25]
«Паровый взрыв», автогидролиз-взрыв (220–230°C; 2,5–3,0 мин; давление 6,6 МПа; быстрое снижение до атмосферного)	Изменение физической структуры сырья, гидролиз гемицеллюлозы и образование водорастворимых олиго- и моносахаридов, отделение лигнина	Высокая эффективность	Эффективен не во всем видам лигноцеллюлозных материалов, необходимо специальное оборудование	[26–29]
Различные виды измельчения (сдвиговые деформации – размол в шаровых мельницах, молотковых дробилках, на вибромельнице; экструдирование; истирание – вальцевание)	Нарушение физической структуры растительной ткани	Удовлетворительные эффективность и производительность	Высокая энергоёмкость, рекристаллизация целлюлозы при увлажнении, недостаточная производительность	[30–34]
Измельчение и истирание в процессе ферментализации (с обработкой целлюлазами)	Повышение выхода моносахаридов при ферментативном гидролизе	Высокая эффективность	Недостаточно высокая производительность, инактивация ферментов	
Обработка концентрированными минеральными кислотами (20–60°C): H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (65–75%) и HCl (40–42%)	Набухание и гидролитическое растворение целлюлозы	То же	Загрязнение среды, низкая плотность целлюлозы, ее деструкция, необходимость нейтрализации и регенерации кислот, коррозия оборудования	[34–40]

Окончание табл. 1

**Характеристика различных методов предварительной обработки соломы и других видов растительного сырья**

Метод обработки, параметры	Эффективность	Преимущества	Недостатки	Источник
Обработка разбавленными минеральными кислотами (60–150°C; 0,5%-ный раствор H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Гидролиз гемицеллюлоз	Не нужна регенерация, быстрота, высокая производительность	Недостаточная эффективность, коррозия оборудования	
Обработка кадоксеном (20–60°C) и другими растворителями	Растворение целлюлозы	Высокая эффективность	Высокая стоимость, вредность, загрязнение среды, необходимость регенерации, пожаро- и взрывоопасность	[41–44]
Щелочная обработка (20–23%-ный раствор щелочи; 0,5–23%-ный раствор щелочи; 120°C; 30 мин)	Набухание и увеличение поверхности целлюлозы. Разрыв лигноуглеводных связей, делигнификация	То же	Эффективна не ко всем видам лигноцеллюлозных материалов, загрязнение окружающей среды, необходимость нейтрализации	[41, 45]

Среди физических методов подготовки соломы широкое распространение получили измельчение, гранулирование, брикетирование, запаривание, которые привлекательны простотой в исполнении и не предполагают больших затрат.

Лучший эффект по сравнению с физическими достигается при химических способах обработки кислотами и щелочами различной концентрации, известью, кальцинированной содой, аммиаком и другими, а также органическими растворителями, что приводит к структурным изменениям целлюлозы и нарушению связей в лигноцеллюлозном комплексе, а также позволяет повысить гидролизуемость и усвояемость соломы в 1,5–2 раза.

Однако применяемые для осуществления этих способов химические реагенты, как правило, токсичны, взрывопожароопасны, требуют достаточно сложного аппаратного оформления, необходимости регенерации или нейтрализации реагентов, вызывают коррозию оборудования и имеют другие недостатки, затрудняющие их широкое использование.

Биологическую предобработку целесообразно применять для биodeградации лигнина ферментными препаратами, содержащими лакказы, или культурами микроорганизмов (мицелиальных грибов), продуцирующих лакказы и ксиланазы. Однако значительная длительность биологической обработки (10–14 сут) и отсутствие высокопроизводительного технологического оборудования ограничивает ее применение для промышленной реализации [46].

В то же время биологическая обработка соломы методами силосования, ферментации

и биоконверсии способствует улучшению вкусовых качеств соломы, а соответственно и повышению поедаемости и сопровождается обогащением полноценным белком и витаминами [9].

Комплексный подход по переработке соломы реализован в работе [48] и позволяет получить корм с высокой биологической ценностью благодаря сочетанию механического, барометрического и химического воздействия.

В данной статье приведены результаты выполненных нами исследований по подготовке соломы зерновых культур различными методами (гидротермическим, термokatалитическим, автокаталитическим и под воздействием электромагнитного поля СВЧ) к последующей биотехнологической переработке. Исследования проводили на образцах соломы пшеницы и тритикале. Содержание полисахаридов в соломе этих видов отличается несущественно (табл. 2).

Таблица 2

**Компонентный состав исходной соломы**

Наименование показателя	Содержание, % от массы а. с. с.	
	солома пшеницы яровой	солома тритикале
Сумма полисахаридов	56,6	54,0
В т. ч.:		
ЛГПС	25,4	17,0
ТГПС	31,2	37,0
целлюлоза	37,2	37,6
пентозаны	21,6	12,9
Лигнин	17,8	19,2
Зольность	3,1	5,5

В исходной соломе и после ее предобработки различными методами определяли содержание легко- и трудногидролизуемых полисахаридов (ЛГПС и ТГПС), в обработанной соломе – содержание редуцирующих веществ (РВ) общепринятыми методами анализа, применяемыми в химии и химической технологии растительного сырья [40].

Гидротермическую обработку осуществляли пропариванием соломы в течение 6–8 ч, термокаталитическую – с использованием 0,5%-ного раствора серной кислоты при 100, 120 и 140°C в течение 2–16 ч, обработку методом автогидролиза – при температуре 160, 170 и 180°C в течение 1 ч. Для интенсификации процесса термокаталитическую обработку проводили в присутствии 2,5%-ного раствора серной кислоты с использованием СВЧ-энергии (частота 2400 МГц) при продолжительности 6–9 с (температура соответственно 95–140°C).

Установлено, что при гидротермической обработке соломы пшеницы пропариванием в течение 6 и 8 ч содержание ЛГПС составило 19,5 и 17,1% от массы абсолютно сухого сырья (а. с. с.), ТГПС – 26,9 и 24,6%, соответственно. Произошло уменьшение содержания ЛГПС на 33% (с повышением количества моносахаридов) и ТГПС – на 21% по сравнению с исходной. Предварительная гидротермическая обработка соломы пропариванием не приводит к существенному изменению соотношения ЛГПС к ТГПС, однако уменьшение содержания ТГПС повышает эффективность ее последующей переработки.

Термокаталитическую предварительную обработку соломы на примере тритикале и пшеницы озимой проводили с использованием в качестве катализатора 0,5%-ного раствора серной кислоты при атмосферном давлении и температуре 100°C.

В фильтрате после термокаталитической обработки при продолжительности 2–16 ч определяли концентрацию РВ до и после инверсии. Повышение концентрации РВ в гидролизате после его инверсии только на 0,1% свидетельствует о том, что при указанных условиях происходит гидролитическая деструкция полисахаридов соломы с преимущественным содержанием

в растворе моносахаридов при незначительном образовании олигосахаридов.

Максимальный выход РВ (19,1%) достигается при продолжительности термокаталитической обработки соломы в течение 8 ч, при увеличении продолжительности процесса содержание РВ уменьшается вследствие вторичных превращений моносахаридов.

В то же время в соломе после термокаталитической обработки при оптимальных условиях содержание ЛГПС (16,9%), ТГПС (27,8%), суммарное содержание полисахаридов (44,7%) и относительное увеличение содержания ЛГПС по отношению к ТГПС после обработки свидетельствуют о возможности использования такого способа для повышения эффективности дальнейшей переработки.

Повышение реакционной способности соломы тритикале с одновременным увеличением выхода РВ происходит при повышении температуры термокаталитической предобработки под давлением. Например, при температуре процесса 120°C выход РВ составляет 12,5% от а. с. с. при продолжительности 120 мин, а максимальный выход моносахаридов достигается при температуре 140°C при такой же продолжительности (15,2%).

При увеличении продолжительности процесса происходит снижение выхода РВ вследствие вторичных превращений моносахаридов.

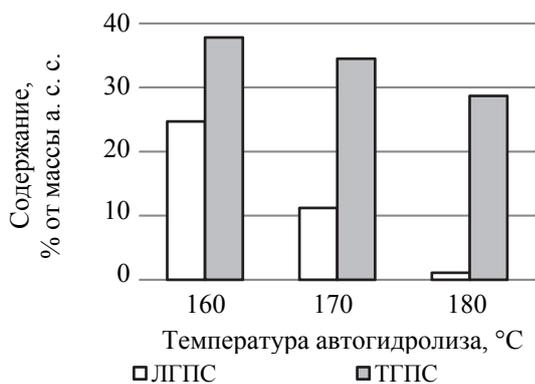
Термокаталитическая обработка соломы тритикале при повышенных температурах приводит к повышению эффективности процесса гидролиза полисахаридов с образованием максимального содержания РВ и уменьшению содержания ЛГПС и ТГПС по сравнению с исходным (табл. 3). При этом суммарное остаточное содержание полисахаридов после термокаталитической обработки достаточно для последующей переработки. Предварительную обработку соломы тритикале для гидролиза легкогидролизуемых полисахаридов гемицеллюлоз и повышения реакционной способности целлюлозы проводили методом автогидролиза при продолжительности процесса 1 ч, варьируя значения температуры 160, 170, 180°C.

Таблица 3

**Содержание полисахаридов соломы тритикале до и после термокаталитической обработки при температуре 120 и 140°C**

Продолжительность, мин	Температура гидролиза, °C	Содержание, % от массы а. с. с.		
		ЛГПС	ТГПС	сумма полисахаридов
в исходном сырье				
30	120	17,0	37,0	54,0
60		16,4	31,2	47,6
120		10,3	28,7	39,0
30	140	4,5	29,5	34,0
60		10,3	27,2	37,5
120		5,3	25,3	30,6
		0,3	17,8	18,2

Содержания ЛГПС и ТГПС в целлюлигнине после автогидролиза соломы пшеницы приведено на диаграмме (рисунок). При температуре 180°C в наибольшей степени происходит гидролиз ЛГПС (гемицеллюлоз), что позволяет рассматривать его как метод предварительной обработки для деструкции гемицеллюлоз и последующего ферментативного гидролиза ТГПС целлюлигнина сырья.



Содержание ЛГПС и ТГПС в целлюлигнине соломы пшеницы после автогидролиза

Для интенсификации процесса гидролиза и повышения выхода РВ проводили СВЧ-обработку соломы тритикале в присутствии раствора серной кислоты. Предварительные эксперименты показали, что использование серной кислоты концентрацией 0,5% не обеспечивает получения высокого выхода редуцирующих веществ при применяемых условиях обработки, поэтому исследования проводили в присутствии 2,5%-ного раствора серной кислоты.

Результаты гидролиза соломы тритикале при различных условиях СВЧ-обработки приведены в табл. 4. Максимальный выход РВ (24,6% от массы а. с. с.) из соломы, пропитанной 2,5%-ным раствором серной кислоты, достигается при продолжительности СВЧ-обработки 9 с (температура 140°C). При этом в целлюлигнине сохраня-

ется достаточно высокое содержание полисахаридов (26,92%) для дальнейшей переработки. Применение СВЧ-нагрева для осуществления процесса гидролиза полисахаридов обеспечивает максимальный выход моносахаридов при существенной интенсификации процесса.

Таблица 4

**Влияние СВЧ-обработки на гидролитическую деструкцию полисахаридов соломы тритикале**

Условия СВЧ-гидролиза		Выход РВ, % от массы а. с. навески		Содержание углеводов в остатке после гидролиза, % от массы а. с. с.
продолжительность, с	температура, °C	до инверсии	после инверсии	
6	95	10,01	12,81	37,65
7	120	16,80	19,02	32,82
8	130	19,95	23,20	29,60
9	140	21,08	24,60	26,92

**Заключение.** Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения исследованных методов предварительной подготовки соломы (гидротермического, термокаталитического, автокаталитического, под воздействием СВЧ-энергии) перед ее дальнейшей биотехнологической переработкой.

В то же время для практической реализации в кормопроизводстве и для микробиологической переработки соломы в этанол наиболее целесообразно использование гидротермической обработки пропариванием. При переработке с целью получения этилового спирта гидротермическая предобработка соломы может быть проведена аналогично стадии разваривания зернового сырья перед «осахариванием». Предварительная обработка соломы повышает ее перевариваемость и эффективность применения при силосовании, например, смесей зеленой массы растений и соломы.

**Литература**

1. Сеницын А. П., Гусакова А. В., Черноглазов В. М. Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов. М.: Изд. Моск. ун-та, 1995. 217 с.
2. Шишенок М. В. Высокмолекулярные соединения. Минск: Выш. шк., 2012. 535 с.
3. Заяц Е. М. Основы электротехнических методов обработки влажных кормов. Минск: Ураджай, 1977. 216 с.
4. Родькин О. И. Экологическая оценка и потенциал использования соломы зерновых культур в качестве биотоплива // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Экономика и экологический менеджмент. 2013. № 3 (14). URL: <http://economics.ihbt.ifmo.ru/file/article/11347.pdf>. (дата обращения: 25.10.2019).
5. Новый справочник химика и технолога. В 12 томах. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ: в 2 ч. Ч. II / под ред. В. А. Столяровой. СПб.: АНОНПО «Профессионал», 2007. 1142 с.
6. Глубокая переработка биомассы и отходов сельскохозяйственного производства: научный аналитический обзор / В. С. Тихонравов [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 252 с.

7. Перспективы использования биотехнологий в аграрной сфере Единого Экономического Пространства / Э. Ф. Мустафина [и др.]. М.: ООО «Угрешская типография», 2014. 136 с.
8. Lynd L. R., Wyman C. E., Gerngross T. U. Biocommodity Engineering // *Biotechnology Progress*. N. Y.: American Institute of Chemical Engineers. 1999. No. 15. P. 777–793.
9. The realm of cellulases in biorefinery development / A. K. Chandel [et al.] // *Critical Reviews in Biotechnology*. BPCA Raton, Fla.: CRC Press. 2012. No. 32 (3). P. 187–202.
10. Применение соломы зерновых культур на удобрение в Томской области / И. Б. Сорокин [и др.] // *Рекомендации / ГНУ СибНИИТ СО РАСХН. Департамент социально-экономического развития села Томской области*. Томск, 2004. 10 с.
11. Малков М. Солома – один из резервов в условиях недостатка кормов // *Белорусское сельское хозяйство*. 2015. № 8 (160). URL: <http://agriculture.by/articles/zivotnovodstvo/soloma-odin-iz-rezervov-v-usloviyah-nedostatka-kormov> (дата обращения: 25.10.2019).
12. Каткевич Р. Г., Каткевич Ю. Ю., Лиепиня Д. Э. Ферментативный гидролиз полисахаридов древесины и соломы. 5. Сравнение ферментативной гидролизуемости соломы, предварительно обработанной водяным паром и растворами щелочей // *Химия древесины*. 1980. № 4. С. 47–56.
13. Xylan derivatives from steam exploded lignocellulosic resources – structure and properties / N. Raushenberg [et al.] // *Polym. Prepr. Amer. Chem. Soc.* 1990. Vol. 31, no. 1. P. 650–652.
14. Коваленко В. И. Кристаллическая целлюлоза: структура и водородные связи // *Успехи химии*. 2010. Т. 79, № 3. С. 261–272.
15. Enhanced enzymatic hydrolysis of poplar bark by combined use of gamma ray and dilute acid for bioethanol / Chung Byung Yeoup [et al.] // *Radiat. Phys. And Chem.* 2012. Vol. 81, no. 8. P. 1003–1007.
16. Ультрамикростроение и надмолекулярная структура древесной матрицы / К. Г. Боголицын [и др.] // *Химия растительного сырья*. 2012. № 3. С. 37–44.
17. Харина М. В., Терехова Л. М., Емельянов В. М. Состав, структура и перспективы энергоресурсосберегающей переработки соломы злаковых культур // *Вестник технологического университета*. 2014. № 12. С. 170.
18. Калунянц К. А., Шаненко Е. Ф., Зайцев Л. В. Современные способы ферментативного гидролиза целлюлозосодержащих материалов // *Итоги науки и техники*. 1981. Т. 1. 185 с.
19. SubhedarPreeti B., GogateParag R. Intensification of enzymatic hydrolysis of lignocellulose using ultrasound for efficient bioethanol production: a review // *Ind. and Eng. Chem. Res.* 2013. No. 34. P. 11816–11828.
20. Пономарев А. В., Ершов Б. Г. Фундаментальные аспекты радиационно-термических превращений целлюлозы и растительной биомассы // *Успехи химии*. 2012. № 10 (81). С. 918–935.
21. Коротченко К. А., Шарпатый В. А. Свободнорадикальные механизмы радиационной деструкции соломы // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2007. Т. 50, № 5. С. 97–102.
22. Bussemaker Madeleine J., Mu Xindong, Zhang Dongke. Ultrasonic pretreatment of wheat straw in oxidative and nonoxidative conditions aided with microwave heating // *Ind. and Eng. Chem. Res.* 2013. No. 35. P. 12514–12522.
23. Zhang Sheng-yan, Liu Guo-yin. Study on saccharification of cotton straw by dilute acid hydrolysis assisted with microwave // *Yingyong Huagong = Appl. Chem. Ind.* 2014. Vol. 43, no. 11. P. 2065–2068.
24. Wang X.-j., Feng H., Li Z.-y. Effects of Electrolyzed Water Pretreatment on Hydrolysis of Corn Stove and Switchgrass // *Journal Chem. Eng. Chin. Univ.* 2012. Vol. 26, no. 1. P. 169–174.
25. Optimization of hot-compressed water pretreatment of bagasse and characterization of extracted hemicelluloses / Sukhbaatar Badakhand [et al.] // *Carbohydr. Polym. Scientific and Technological aspects of industrially important Polysaccharides*. 2014. Vol. 101. P. 196–202.
26. Гравитис Я. А. Теоретические и прикладные аспекты метода взрывного автогидролиза растительной биомассы // *Химия древесины*. 1987. № 5. С. 3–21.
27. Ефремов А. А., Кротова И. В. Комплексная переработка древесных отходов с использованием метода взрывного автогидролиза // *Химия растительного сырья*. 1999. № 2. С. 19–39.
28. Putnina A., Kukle S., Gravitis J. Steam explosion as the pretreatment method of lignocellulosic biomass // *Sci. Journal RTU. Ser. Mater. Sci. Textand Cloth. Technol.* 2012. No. 7. P. 80–83.
29. Просвирников, Д. Б. Ахметшин И. Р., Гайнуллина Д. Ш. Способы получения порошковой целлюлозы с использованием паровзрывного метода: доклады Междунар. науч.-техн. конф. «Техника и технологии – мост в будущее», Воронеж 10–12 дек. 2014. № 5, ч. 4. С. 252–256.
30. Сеницын А. П., Ковалев В. Г., Месса-Манресса С. Р. Сравнительное изучение влияния различных видов предобработки на скорость ферментативного гидролиза природных целлюлозосодержащих материалов // *Химия древесины*. 1984. № 5. С. 60–71.
31. Методы подготовки растительного сырья к биоконверсии в кормовые продукты и биоэтанол / В. И. Сушкова [и др.] // *Химия растительного сырья*. 2016. № 1. С. 93–119.

32. Способ ферментативного осахаривания лигноцеллюлозных материалов: пат. 2514408 РФ, МПК 13К 1/02 (2006. 01) / А. Л. Бычков, О. И. Ломовский. Журнал ИХТТМ СО РАН. № 2012136770/13; заявл. 28. 08. 2012; опублик. 27. 04. 2014. Бюл. № 4. 8 с.
33. Key drivers influencing the commercialization of ethanol-based biorefineries / A. K. Chandel [et al.] // Journal Comm Biotechnol. 2010. No. 16. P. 239–257.
34. Харина М. В. Предобработка и ферментативный гидролиз лигноцеллюлозосодержащих отходов сельского хозяйства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05. 21. 03. Казань, 2013. 20 с.
35. Предварительная обработка растительного сырья и отходов сельскохозяйственного производства с целью повышения выхода редуцирующих веществ / Р. М. Нуртдинов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 9. С. 264–267.
36. Низкотемпературный гидролиз растительного сырья / Р. М. Нуртдинов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 15. С. 150–153.
37. Enhancement of cellulose hydrolysis in sugarcane bagasse by the selective removal of lignin with sodium chlorite / Siqueira Germano [et al.] // Appl. Energy. 2013. Vol. 102. P. 399–402.
38. From biomass to feedstock: one-step fractionation of lignocelluloses components by selective organic acid-catalysed depolymerisation of hemicellulose in a biphasic system / Thorsten vom Stein [et al.] // Green Chem.: An International Journal and Green Chemistry Resource. 2011. Vol. 13, no. 7. P. 1772–1777.
39. Способ предварительной обработки целлюлозосодержащего сырья для ферментативного гидролиза: пат. 2533921, РФ, МПК С13К1/02 (2006. 01) / В. В. Буджаева, Е. И. Макарова, Е. А. Скиба, В. Н. Золотухин, Г. В. Сакович. ИПХЭТ СО РАН. № 2013140699 / 13; заявл. 03.09.2013; опублик. 27.11.2014. Бюл. № 5. 6 с.
40. Improved enzyme efficiency of rapeseeds straw through the two-stage fractionation process using sodium hydroxide and sulfuric acid / Choi Chang [et al.] // Appl. Energy. 2013. Vol. 102. P. 640–646.
41. Saccharification of wheat-straw cellulose by enzymatic hydrolysis following fermentative and chemical pretreatment / R. W. Detroy [et al.] // Biotechnol. and Bioeng. 1980. No. 10. P. 135–148.
42. Каткевич Р. Г., Вевере П. Я. Ферментативный гидролиз полисахаридов древесины и соломы // Химия древесины. 1984. № 5. С. 51–59.
43. Исследование влияния предобработки древесных опилок глицерином на их ферментативный гидролиз / Л. Х. Халимова [и др.] // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19, № 4. С. 10–12.
44. Pretreatment of wood by VCT-solvent for the enzymatic hydrolysis / H. Ooshima [et al.] // Appl. Biochem. and Biotechnol. 1992. Vol. 37, no. 2. P. 165–176.
45. Будаева В. В., Митрофанов Р. Ю., Золотухин В. Н. Исследование ферментативного гидролиза отходов переработки злаков // Ползуновский вестник. 2008. № 3. С. 322–327.
46. Болтовский В. С. Теория и технология комплексной гидролитической переработки растительной биомассы. Минск: БГТУ, 2014. 267 с.
47. Тимофеев М. М., Козакевич С. В., Зарудняк И. Н. Перспективы широкомасштабной рециркуляции биофильных элементов // Аграрная наука. 2010. № 6. С. 12–14.
48. Солома – отход агропромышленного комплекса как перспективное сырье для получения кормовых и белковых препаратов / Р. Т. Валеева [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 9. № 6. С. 137–140.
49. Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леонович А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.

### References

1. Sinityn A. P., Gusakova A. V., Chernoglazov V. M. *Biokonversiya lignocellyuloznykh materialov*. [Bioconversion of lignocellulosic materials]. Moscow, Izd-vo Moskov. universiteta Publ., 1995. 217 p.
2. Shishonok M. V. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya* [High molecular weight compounds]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 2012. 535 p.
3. Zayats E. M. *Osnovy elektrotekhnicheskikh metodov obrabotki vlazhnykh kormov* [Fundamentals of Electrotechnical Methods for Processing Wet Feed]. Minsk, Uradzhay Publ., 1977. 216 p.
4. Rod'kin O. I. Environmental Assessment and Potential Use of Cereal Straw as Biofuel. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO* [Science magazine NIU ITMO], ser. Economics and Ekological Management, 2013, no. 3 (14). Available at: <http://economics.ihbt.ifmo.ru/file/article/11347.pdf> (accessed 25.10.2019).
5. Stolyarova V. A. *Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Syr'yo i produkty promyshlennosti organicheskikh i neorganicheskikh veshchestv* [New reference chemist and technologist. Raw materials and

products of the industry of organic and inorganic substances. Part II]. St. Petersburg, ANONPO "Professional" Publ., 2007. 1142 p.

6. Tikhonravov V. S., Fedorenko V. F., Buklagin D. S., Mishurov N. P. *Glubokaya pererabotka biomassy i otkhodov sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: nauchnyy analiticheskiy obzor* [Deep processing of biomass and agricultural waste: a scientific analytical review]. Moscow, FGBNU "Rosinformaagrotekh" Publ., 2014. 252 p.

7. Mustafina E. F., Ablav A. R., Tarasova E. V., Kharina M. V. *Perspektivy ispol'zovaniya biotekhnologii v agrarnoy sfere Edinogo Ekonomicheskogo Prostranstva* [Prospects for the use of biotechnology in the agricultural sector of the Common Economic Space]. Moscow, OOO "Ugreshskaya tipografiya" Publ., 2014. 136 p.

8. Lynd L. R., Wyman C. E., Gerngross T. U. Biocommodity Engineering. *Biotechnology Progress*, 1999, no. 15, pp. 777–793.

9. Chandel A. K., Chandrasekhar G., Silva M. B., S. da Silva The realm of cellulases in biorefinery development. *Critical Reviews in Biotechnology*. Boca Raton, Fla.: CRC Press Publ. 2012, no. 32 (3), pp. 187–202.

10. Sorokin I. B., Titova E. V., Kasimova L. V., Kravets A. V., Shchedrukhina N. A., Tereshchenko N. N. *Primeneniye solomy zernovykh kul'tur na udobreniye v Tomskoy oblasti. Rekomendatsii* [The use of straw crops for fertilizer in the Tomsk region. Recommendation]. Tomsk, GNU SibNIIT SO RASKhN. Departament sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya sela Tomskoy oblasti Publ., 2004. 10 p.

11. Malkov M. Straw – one of the reserves in conditions of lack of feed. *Belorusskoye sel'skoye khozyaystvo* [Belarusian agriculture], 2015, no. 8 (160). Available at: <http://agriculture.by/articles/zhivotnovodstvo/soloma-odin-iz-rezervov-v-usloviyah-nedostatka-kormov> (accessed 25.10.2019).

12. Katkevich R. G., Katkevich Yu. Yu., Liepinya D. E. Enzymatic hydrolysis of polysaccharides of wood and straw. 5. Comparison of the enzymatic hydrolysis of straw pre-treated with water vapor and alkali solutions. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of Wood], 1980, no. 4, pp. 47–56 (In Russian).

13. Raushenberg N., Dhara K., Palmer J., Glasser W. Xylan derivatives from steam exploded lignocellulosic resources-structure and properties. *Polym. Prepr. (Amer. Chem. Soc. Div. Polym. Chem.)*. 1990, vol. 31, pp. 650–652.

14. Kovalenko V. I. Crystalline cellulose: structure and hydrogen bonds. *Uspekhi khimii* [Success of Chemistry], 2010, vol. 79, no. 3, pp. 261–272 (In Russian).

15. Byung Yeoup Chung, Jae Taek Leea, Hyoung-Woo Baia, Ung-Jin Kim, Hyeun-Jong Bae, Jae-Young Chod. Enhanced enzymatic hydrolysis of poplar bark by combined use of gamma ray and dilute acid for bioethanol. *Radiat. Phys. And Chem.* Netherlands: Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2012, vol. 81, no. 8, pp. 1003–1007.

16. Bogolitsyn K. G., Chukhchin D. G., Zubov I. N., Gusakova M. A. Ultramicrostructure and supramolecular structure of wood matrix. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2012, no. 3, pp. 37–44 (In Russian).

17. Kharina M. V., Terezova L. M., Emel'yanov V. M. Composition, structure and prospects of energy-efficient processing of straw of cereal crops. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2014, no. 12. P. 170 (In Russian).

18. Kalunyants K. A., Shanenko E. F., Zaytsev L. V. *Sovremennyye sposoby fermentativnogo gidroliza tsellyulozsoderzhashchikh materialov. Itogi nauki i tekhniki* [Modern methods of enzymatic hydrolysis of cellulose-containing materials. Results of science and technology], 1981, vol. 1. P. 185.

19. Subhedar Preeti B., Gogate Parag R. Intensification of enzymatic hydrolysis of lignocellulose using ultrasound for efficient bioethanol production: a review. *Ind. and Eng. Chem. Res.* 2013, no. 34, pp. 11816–11828.

20. Ponomarev A. V., Ershov B. G. Fundamental aspects of radiation-thermal transformations of cellulose and plant biomass. *Uspekhi khimii* [Success of Chemistry], 2012, no. 10 (81), pp. 918–935 (In Russian).

21. Korotchenko K. A., Sharpatyy V. A. Free radical mechanisms of radiation destruction of straw. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [University News. Chemistry and chemical technology], 2007, vol. 50, no. 5, pp. 97–102 (In Russian).

22. Bussemaker Madeleine J., Mu Xindong, Zhang Dongke. Ultrasonic pretreatment of wheat straw in oxidative and nonoxidative conditions aided with microwave heating. *Ind. and Eng. Chem. Res.* 2103, no. 35, pp. 12514–12522.

23. Zhang Sheng-yan, Liu Guo-yin. Study on saccharification of cotton straw by dilute acid hydrolysis assisted with microwave. *Yingyong Huagong* [Appl. Chem. Ind.], 2014, vol. 43, no. 11, pp. 2065–2068.

24. Wang Xiao-juan; FENG Hao; LI Zhi-yi. Effects of Electrolyzed Water Pretreatment on Hydrolysis of Corn Stove and Switchgrass. *Journal Chem. Eng. Chin. Univ.* 2012, no. 1 (26), pp. 169–174.
25. Sukhbaatar Badakhand, Hassa El Barbary, Kim Moon, Steele Philip. Ingram Leonard. Optimization of hot-compressed water pretreatment of bagasse and characterization of extracted hemicelluloses. *Carbohydr. Polym. Scientific and Technological aspects of industrially important Polysaccharides*. 2014, no. 101, pp. 196–202.
26. Gravitis Ya. A. Theoretical and applied aspects of the method of explosive autohydrolysis of plant biomass. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of Wood], 1987, no. 5, pp. 3–21 (In Russian).
27. Efrmeov A. A., Krotova I. V. Integrated processing of wood waste using explosive autohydrolysis. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 1999, no. 2, pp. 19–39 (In Russian).
28. Putnina Anna, Kukle Silvija, Gravitis Janis. Steam explosion as the pretreatment method of lignocellulosic biomass. *Scientific Journal of RTU. Ser. Mater. Scu. Text and Cloth. Technol.* 2012, no. 7, pp. 80–83.
29. Prosvirnikov D. B., Akhmetshin I. R., Gaynullina D. Sh. [Methods for producing powder pulp using the vapor blasting method]. *Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Tekhnika i tekhnologii – most v budushcheye"* [International scientific and technical conference "Engineering and technology – a bridge to the future"]. Voronezh, 2014, pp. 252–256 (In Russian).
30. Sinitsyn A. P., Kovalev G. V., Messa-Manresa C. P. Comparative study of the effect of various types of pre-treatment on the rate of enzymatic hydrolysis of natural cellulose-containing materials. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of Wood], 1984, no. 5, pp. 60–71 (In Russian).
31. Sushkova V. I., Ustyuzhaninova L. V. Berezina O. V. Yarotskiy S. V. Methods of preparing plant materials for bioconversion into feed products and bioethanol. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2016, no. 1, pp. 93–119 (In Russian).
32. Bychkov A. L., Lomovskiy O. I. Zh. *Sposob fermentativnogo osakharivaniya lignotsellyuloznykh materialov* [Methods of enzymatic sacchfrification of lignocellulosic materials]. Patent RF, no. 2514408, 2012.
33. Chandel A. K., Singh O. V., Chandrasekhar G., Rao L. V., Narasu M. L. Key drivers influencing the commercialization of ethanol-based biorefineries. *Journal Comm Biotechnol.* 2010, no. 16, pp. 239–257.
34. Kharina M. V. *Predobrabotka i fermentativnyy gidroliz lignotsellyulozosoderzhashchikh otkhodov sel'skogo khozyaystva. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Processing and enzymatic hydrolysis of legnino-cellulose-containing agricultural waste. Abstract of thesis cand. of techn. sci.]. Kazan', 2013. 20 p.
35. Nurtdinov R. M., Valeeva R. T., Mukhachev S. G., Kharina M. V. Preliminary processing of vegetable raw materials and waste of agricultural production in order to increase the yield of reducing substances. *Vestnik KNITU* [Bulletin of the Kazan National Research Technological University], 2011, no. 9, pp. 264–267 (In Russian).
36. Nurtdinov R. M., Valeeva R. T., Mukhachev S. G., Emel'yanov V. M., Gadel'shina G. A. Low-temperature hydrolysis of vegetable raw materials. *Vestnik KNITU* [Bulletin of the Kazan National Research Technological University], 2011, no. 15, pp. 150–153 (In Russian).
37. Germano Siqueira, Anikó Várnai, André Ferraz Adriane M. F. Milagres. Enhancement of cellulose hydrolysis in sugarcane bagasse by the selective removal of lignin with sodium chlorite. *Applied Energy*. 2013, vol. 102, pp. 399–402.
38. Thorsten vom Stein, Grande P. M., Kayser H., Sibilla F., Leitner W., Domnguez de Mara P. From biomass to feedstock: one-step fractionation of lignocelluloses components by selective organic acid-catalysed depolymerisation of hemicellulose in a biphasic system. *Green Chem.: An International Journal and Green Chemistry Resource*. 2011, vol. 13, no. 7, pp. 1772–1777.
39. Budzhaeva V. V., Makarova E. I., Skiba E. A., Zolotuzin V. N., Sakovich G. V. *Sposob predvaritel'noy obrabotki tsellyulozosoderzhashchego syr'ya dlya fermentativnogo gidroliza* [The method of pre-processing cellulose-containing raw materials for enzymatic hydrolysis]. Patent RF, no. 2533921, 2014.
40. Chang Ho Choi, Byung Hwan Um, Young Soo Kim, Kyeong Keun Oh. Improved enzyme efficiency of rapeseeds raw through the two-stage fractionation process using sodium hydroxide and sulfuric acid. *Applied Energy*. 2013, vol. 102, pp. 640–646.
41. Detroy R. W., Lindenfelser L. A., Julian Jr. G. S., Orton W. L. Saccharification of wheat-straw cellulose by enzymatic hydrolysis following fermentativ and chemical pretreatment. *Biotechnol. and Bioeng.* 1980, no. 10, pp. 135–148.
42. Katkevich R. G., Vevere P. Ya. Enzymatic hydrolysis of wood and straw polysaccharides. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of Wood], 1984, no. 5, pp. 51–59 (In Russian).
43. Khalimova L. Kh., Shakirov A. N., Skorniyakov A. N., Petukhova N. I., Zorin V. V. Research of the influence of preparation of wood sawing by glycerin on their enzymatic hydrolysis. *Bashkirskiy khimicheskii*

*zhurnal* [Bashkir Chemistry Journal], 2012, vol. 19, no. 4, pp. 10–12 (In Russian).

44. Ooshima H., Kurakake M., Kato J., Harano Y. Pretreatment of wood by VCT-solvent for the enzymatic hydrolysis. *Appl. Biochem. and Biotechnol.* 1992, vol. 37, no. 2, pp. 165–176.

45. Budaeva V. V., Mitrofanov R. Yu., Zolotukhin V. N. Research of enzymatic hydrolysis of cereal processing waste. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Bulletin], 2008, no. 3, pp. 322–327 (In Russian).

46. Boltovskiy V. S. *Teoriya i tekhnologiya kompleksnoy gidroliticheskoy pererabotki rastitel'noy biomassy* [Theory and technology of complex hydrolytic processing of plant biomass]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 267 p.

47. Timofeev M. M., Kozakevich S. V., Zarudnyak I. N. Prospects for large-scale recycling of biophilic elements. *Agrarnaya nauka* [The Journal of Agricultural Science], 2010, no. 6, pp. 12–14 (In Russian).

48. Valeeva R. T., Krasil'nikova O. V., Shurbina M. Yu., Nuretdinova E. I. Straw – waste of the agricultural complex as a perspective raw material for producing fodder and protein products. *Vestnik KNRTU* [Bulletin of the Kazan National Research Technological University], 2016, vol. 9, no. 6, pp. 137–140 (In Russian).

49. Obolenskaya A. V., El'nitskaya Z. P., Leonovich A. A. *Laboratornyye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose]. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 320 p.

### Информация об авторах

**Сергеенко Лидия Александровна** – магистр технических наук кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sjargejenka.lidziya@yandex.by

**Логвинова Анна Сергеевна** – магистр технических наук, инженер-технолог. ООО «Фермент» (220140, г. Минск, ул. Матусевича, 35, п. 4). E-mail: irulent@tut.by

**Болтовский Валерий Станиславович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v-boltovsky@rambler.ru

### Information about the authors

**Sergeyenko Lidiya Aleksandrovna** – Master of Engineering, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kanapelka.lidziya@gmail.com

**Logvinova Anna Sergeevna** – Master of Engineering, Process Engineer. LLC “Ferment” (4, 35, Matusevicha str., 220140, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irulent@tut.by

**Boltovskiy Valeriy Stanislavovich** – DSc (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v-boltovsky@rambler.ru

Поступила 11. 11. 2019