

УДК 544.57:577.151

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА СОЛОМЫ ПШЕНИЦЫ В СРЕДЕ ХЛОРИДА 1-БУТИЛ-3-МЕТИЛИМИДАЗОЛИЯ

© С.Н. Евстафьев\*, К.К. Хоанг

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
ул. Лермонтова, 83, Иркутск, 664074 (Россия), e-mail: esn@istu.edu*

Разработка экологически безопасной технологии переработки лигноцеллюлозного сырья с выделением фракций полисахаридов и лигнина для последующего использования является актуальной проблемой, решение которой возможно при использовании в качестве растворителя ионных жидкостей. Для интенсификации процесса переработки изучена возможность использования ультразвукового облучения в среде хлорида 1-бутил-3-метилимидазолия. Приведены результаты исследования влияния мощности ультразвука, температуры и продолжительности обработки на выход фракций и степень очистки целлюлозы соломы пшеницы от примесей гемицеллюлозы и лигнина. Установлено, что использование ультразвука мощностью 10–50 Вт при обработке соломы в среде хлорида 1-бутил-3-метилимидазолия способствует увеличению степени очистки целлюлозы от примесей, прежде всего гемицеллюлозы, и снижению продолжительности обработки. Максимальная степень очистки целлюлозы составила 68,1% и была получена при облучении ультразвуком мощностью 50 Вт при 140 °С в течение 15 мин. Показано, что ультразвуковая обработка соломы пшеницы в среде хлорида 1-бутил-3-метилимидазолия обеспечивает увеличение общего выхода сахаров ферментализации полисахаридов соломы пшеницы в 4–5 раз. Суммарный выход сахаров ферментализации фракций полисахаридов, выделенных в условиях эксперимента, составил 83% от теоретически возможного.

*Ключевые слова:* солома пшеницы, ионная жидкость, хлорид 1-бутил-3-метилимидазолия, целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин, ультразвук, ИК-спектроскопия.

### **Введение**

Использование большинства органических растворителей для растворения биомассы растительного сырья ограничено их низкой эффективностью, проблемами утилизации, регенерации и токсичности для окружающей среды. Поэтому в последнее время за рубежом широко исследуется возможность использования в качестве растворителя ионных жидкостей (ИЖ), обладающих уникальными физико-химическими свойствами и экологичностью [1, 2].

Настоящая работа является продолжением исследований по изучению влияния условий термообработки в среде ИЖ на выход и состав продуктов фракционирования биомассы соломы пшеницы [3]. Показана возможность использования для фракционирования хлорида 1-бутил-3-метилимидазолия ([Bmim][Cl]) и выявлено повышение реакционной способности выделенной целлюлозы соломы в условиях ферментативного гидролиза. Но в исследованных условиях термообработки не удалось добиться полного разделения основных компонентов соломы и выделения их в составе отдельных фракций. Для повышения эффективности фракционирования предложено на стадии термообработки использовать ультразвуковое облучение, которое в настоящее время широко применяется для повышения эффективности процессов экстракции растительного сырья, а также интенсификации ферментативного гидролиза целлюлозы [4–6]. Эффект обработки ультразвуком обусловлен улучшением контакта между растворителем и взвешенными твердыми частицами и, как следствие, повышением эффективности массообменных процессов [7]. В связи с этим целью настоящей работы являлось изучение влияния условий термообработки с ультразвуковым облучением в среде [Bmim][Cl] на степень очистки целлюлозы соломы пшеницы от примесей гемицеллюлозы и лигнина и ее реакционную способность при ферментативном гидролизе.

---

*Евстафьев Сергей Николаевич* – доктор химических наук, профессор, директор института пищевой инженерии и биотехнологии, e-mail: esn@istu.edu  
*Хоанг Куанг Кыонг* – аспирант, e-mail: hqc9189@gmail.com

\* Автор, с которым следует вести переписку.

### Экспериментальная часть

В работе использована обессмоленная солома пшеницы крупностью менее 0,5 мм, содержащая 42,9% целлюлозы, 25,7% лигнина и 30,1% гемицеллюлоз. Для удаления экстрактивных веществ солому экстрагировали в аппарате Сокслета этанолом в течение 12 ч. Непосредственно перед экспериментом [Bmim][Cl] и обессмоленную солому сушили в вакууме при 40 °С в течение 24 ч.

Образец соломы массой 250 мг и 5 г [Bmim][Cl] помещали в стеклянный стакан емкостью 50 см<sup>3</sup>, который нагревали для плавления ИЖ и равномерного смачивания соломы. Эксперимент выполнен в термостатированной ячейке при температурах 80, 100, 120 и 140 °С. Термообработку совмещали с ультразвуковым облучением, которое осуществляли с помощью диспергатора УЗДН-2Т при рабочей частоте 44 кГц и мощности 10, 30 и 50 Вт. Продолжительность термообработки составляла 5, 10 и 15 мин.

После обработки биомассу соломы фракционировали по схеме, приведенной на рисунке 1. Для осаждения растворенной в ИЖ целлюлозы использовали раствор 0,1 Н NaOH. Твердую часть отделяли центрифугированием, промывали дистиллированной водой до pH = 6–7, а затем обрабатывали 3%-ным раствором NaOH в соотношении 1 : 35 г/см<sup>3</sup> для осаждения примесей гемицеллюлоз и лигнина. После центрифугирования фракцию целлюлозы промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции. Щелочной раствор и промывные воды объединяли с фильтратом. После удаления из фильтрата воды до 30 см<sup>3</sup> и снижения pH до 6,8 раствором 1 М HCl тремя объемами этанола (90 см<sup>3</sup>) осаждали фракцию гемицеллюлоз. После удаления спирта вакуумной дистилляцией, снижали pH полученного раствора до 2,0 раствором 0,1 М HCl и выдерживали при 70 °С в течение 30 мин для осаждения лигнина. Фракции целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина отделяли центрифугированием и сушили на лиофильной сушилке VaCo 2 при -40 °С в течение 12 ч.

Под фракцией целлюлозы следует понимать остаток биомассы соломы после отделения фракций гемицеллюлоз и лигнина. Эффективность обработки оценивали по степени очистки целлюлозы (СОЦ), выраженной в %, которую определяли по формуле:

$$СОЦ = \frac{(a + b) \cdot 100}{55,8}$$

где  $a$  – выход фракции гемицеллюлоз, в % на абсолютно сухую массу соломы (а.с.м.);  $b$  – выход фракции лигнина, в % на а.с.м.; 55,8 – суммарное содержание гемицеллюлоз и лигнина в исходной соломе, в % на а.с.м.

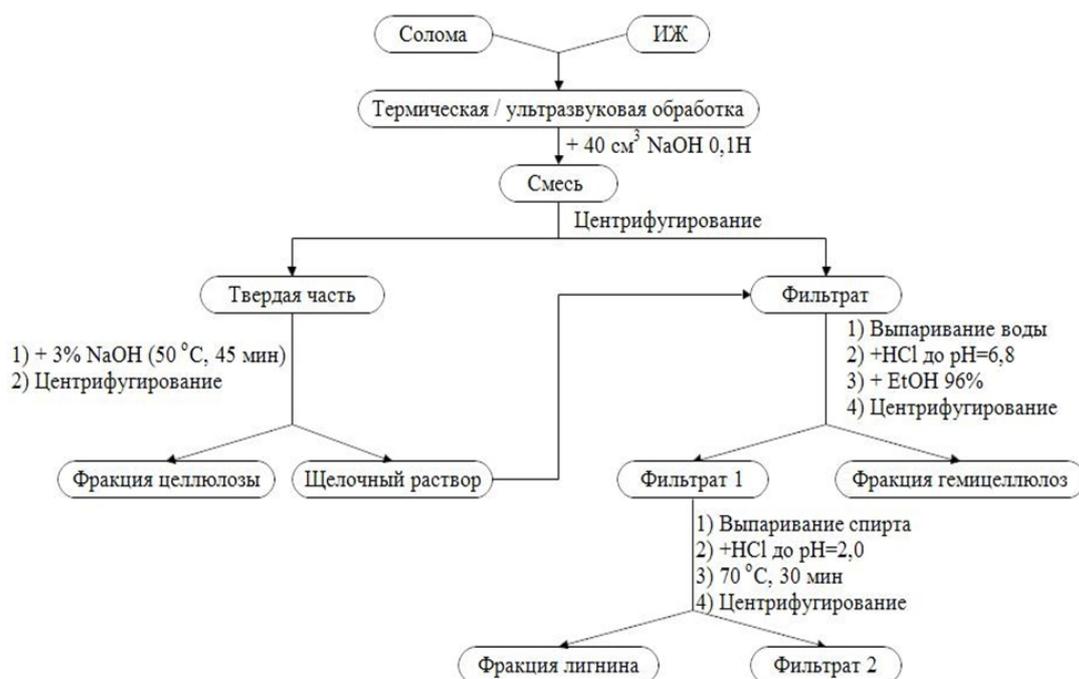


Рис. 1. Схема фракционирования продуктов ультразвуковой обработки соломы пшеницы в среде [Bmim][Cl]

Ферментализ фракций целлюлозы и гемицеллюлоз проводили ферментным комплексом «Целлюлюкс-А» с целлюлазной активностью 2000 ед/г по методике [3]. Выход редуцирующих сахаров определяли фенол-сернокислотным методом [8].

Элементный анализ выполняли на анализаторе «Vario MICRO CUBE».

ИК-спектры фракций снимали на спектрометре Cary 670 FTIR компании «Agilent Technologies» в режиме пропускания в области частот 400–4000 см<sup>-1</sup>. Образцы для спектральных исследований готовили в виде спрессованных таблеток, состоящих из смеси сухого измельченного исследуемого образца и порошка КВг в отношении 1–2 мг/ 200 мг.

### Обсуждение результатов

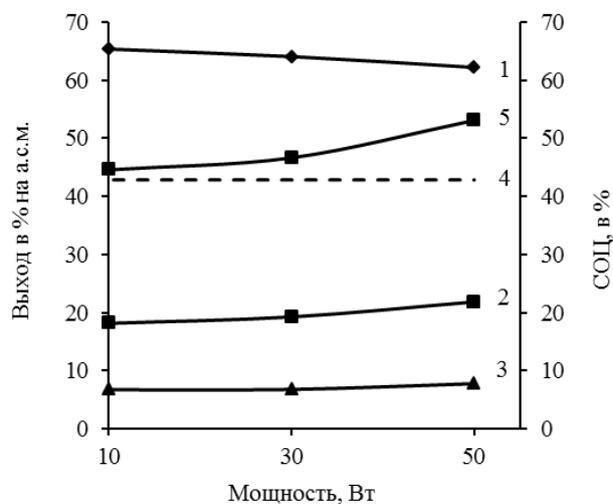
Согласно полученным данным использование ультразвука способствует увеличению СОЦ (рис. 2) и уменьшению продолжительности термообработки. Так, при обработке соломы при 100 °С в течение 15 мин ультразвуком мощностью 10 Вт достигнута СОЦ (44,6%) большая, чем при обработке без ультразвука в течение 60 мин (43,1%) [3]. Полученная после обработки в этих условиях смесь имеет желтый цвет и содержит визуально наблюдаемые нерастворенные частички соломы. При повышении мощности до 50 Вт количество нерастворенных частичек соломы уменьшается, а СОЦ увеличивается до 53,1%. При обработке соломы без ультразвука близкая степень очистки получена при 120 °С в течение 7 ч.

Повышение мощности ультразвука в большей степени способствует удалению примесей из биомассы соломы в составе фракции гемицеллюлоз и в меньшей степени – в составе фракции лигнина (рис. 2). При обработке ультразвуком мощностью 10 Вт выделено около 60% гемицеллюлоз и не менее 30% лигнина от их содержания в исходной соломе соответственно. При повышении мощности до 50 Вт выход фракции гемицеллюлоз увеличивается на 4%, а фракции лигнина – лишь на 1%.

Увеличение продолжительности обработки при 120 °С и мощности ультразвука 30 Вт (рис. 3а) слабо влияет на эффективность процесса. Более выраженное влияние на СОЦ оказывает температура (рис. 3б). Отмечено, что увеличение СОЦ в диапазоне температуры 80–120 °С в равной степени зависит от удаления гемицеллюлоз и лигнина, а при 140 °С вызвано прежде всего удалением гемицеллюлоз.

Согласно полученным данным максимальная степень очистки целлюлозы (68,1%) была получена при облучении ультразвуком мощностью 50 Вт при 140 °С в течение 15 мин. При этом выход фракции составил 47,5% и был близок ее содержанию в исходной соломе. В этих условиях удалось выделить около 90% гемицеллюлоз и не более 41% лигнина от их содержания в исходной соломе соответственно. Относительно низкий выход фракции лигнина, полученный в условиях эксперимента, согласуется с данными, приведенными в работе [9], и может быть обусловлен тем, что около 60% лигнина соломы имеет относительно высокую молекулярную массу и поэтому не растворяется в [Bmim][Cl].

Рис. 2. Зависимость эффективности фракционирования биомассы соломы пшеницы от мощности ультразвука (100 °С, 15 мин): 1 – фракция целлюлозы; 2 – фракция гемицеллюлоз; 3 – фракция лигнина; 4 – содержание целлюлозы в исходной соломе; 5 – СОЦ



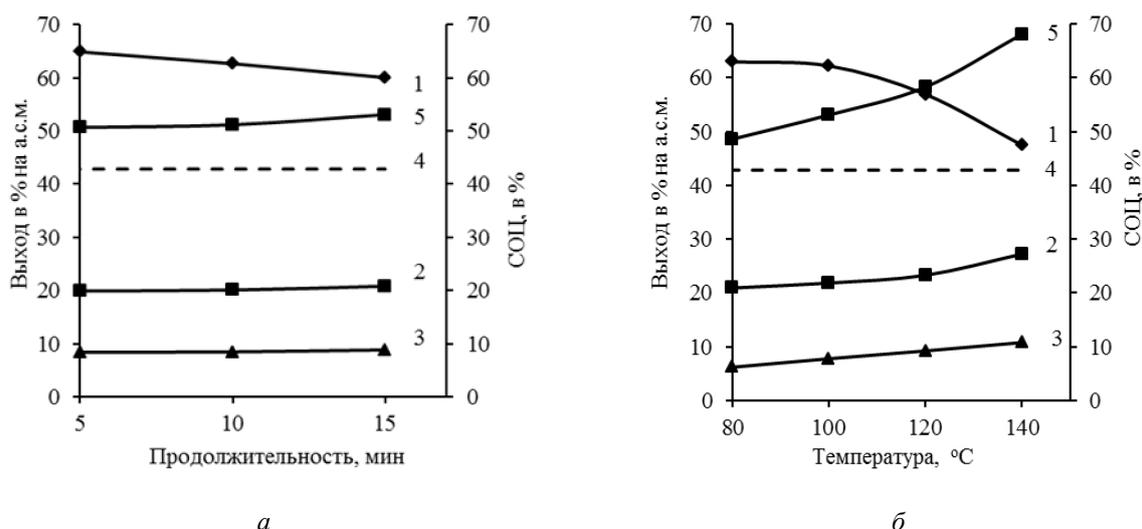


Рис. 3. Зависимость эффективности фракционирования биомассы соломы пшеницы от продолжительности (120 °С, 30 Вт) (*а*) и температуры (15 мин, 50 Вт) (*б*) обработки:

1 – фракция целлюлозы; 2 – фракция гемицеллюлоз; 3 – фракция лигнина;

4 – содержание целлюлозы в исходной соломе; 5 – СО<sub>2</sub>

Присутствие лигнина во фракциях полисахаридов подтверждено методом ИК-спектроскопии (рис. 4). В ИК-спектрах фракции целлюлозы согласно [10] присутствуют все характерные для нее полосы поглощения: широкая полоса поглощения с максимумом при 3400 см<sup>-1</sup> обусловлена валентными колебаниями гидроксильных групп, участвующих в образовании межмолекулярных и внутримолекулярных водородных связей; при 2920 см<sup>-1</sup> – асимметричными валентными колебаниями С-Н связей метиленовых групп; в области 1200–1500 см<sup>-1</sup> – деформационными колебаниями СН-, СН<sub>2</sub>- и ОН-групп. В области 900–1200 см<sup>-1</sup> проявляются валентные колебания С-С-связей и С-О-связей в первичных и вторичных спиртовых группах, а также валентные колебания глюкопиранозного кольца.

Полосу поглощения средней интенсивности с максимумом при 1650 см<sup>-1</sup> связывают с наличием в образце молекул адсорбированной воды, а также остаточных количеств гемицеллюлоз и лигнина. Присутствие лигнина приводит к появлению поглощения при 1551 и 1502 см<sup>-1</sup>, характеризующих скелетные колебания ароматических структурных фрагментов [11].

Аналогичные полосы поглощения присутствуют и в ИК-спектрах фракции гемицеллюлоз (рис. 4). Дополнительно можно отметить, что интенсивную полосу поглощения при 1044 см<sup>-1</sup> связывают с валентными колебаниями связей С-О, С-С (С-ОН) типичных ксиланов [12]. Полоса поглощения при 897 см<sup>-1</sup> характеризует конфигурацию у первого углеродного атома пиранозного кольца и является показателем наличия β-гликозидных связей между структурными звеньями [13]. Отсутствие полосы поглощения при 1735 см<sup>-1</sup> в спектре фракции гемицеллюлоз может быть следствием ультразвуковой обработки, обеспечившей расщепление сложноэфирных связей ацетатов и уроновых эфиров.

Анализ полученных ИК-спектров свидетельствует о нарушении прочности водородных связей в макромолекулах целлюлозы при обработке ультразвуком. Причем это усиливается как при повышении температуры, так и мощности ультразвуковой обработки. О нарушении прочности водородных связей в макромолекулах целлюлозы можно судить по изменению величины отношения относительной интегральной интенсивности полос поглощения при 3400 и 2900 см<sup>-1</sup> [3]. Согласно полученным данным значение соотношения  $A_{3400}/A_{2900}$  для образцов фракции целлюлозы, выделенных при повышении температуры обработки с постоянной мощностью облучения ультразвуком, так и при повышении мощности при постоянной температуре обработки снижается, что является следствием нарушения прочности водородных связей. Это позволяет предположить, что целлюлоза, обработанная ультразвуком в среде [Bmim][Cl] в интервале температур 80–140 °С, характеризуется ослабленной сеткой водородных связей, что может повлиять на ее свойства, в частности, на реакционную способность в процессе ферментализации.

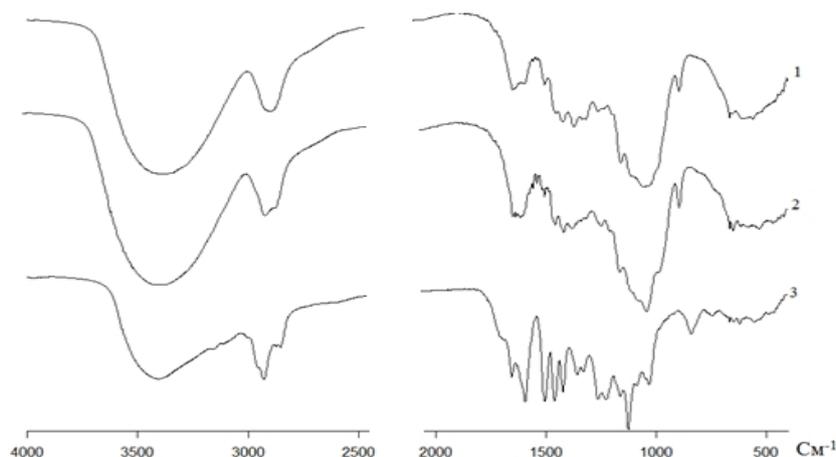


Рис. 4. ИК-спектры фракций целлюлозы (1), гемицеллюлоз (2) и лигнина (3), выделенных из соломы после обработки при 100 °С (15 мин, 50 Вт)

Наблюдаемое повышение СОЦ соломы при увеличении температуры ультразвуковой обработки подтверждается данными элементного анализа выделенных фракций целлюлозы (табл. 1). Установлено, что повышение температуры процесса независимо от используемой мощности ультразвука и продолжительности обработки сопровождается увеличением соотношения  $(\text{H/C})_{\text{ат}}$  и незначительным снижением соотношения  $(\text{O/C})_{\text{ат}}$ , что свидетельствует об уменьшении доли ароматических фрагментов остаточного лигнина в составе фракции целлюлозы.

Характер ИК-спектров фракций лигнина существенно отличается от ИК-спектров полисахаридов. ИК-спектры исследуемых образцов содержат несколько основных полос поглощения, которые относят к определенным структурным группам для лигнинов (рис. 4). Широкая полоса поглощения с максимумом при  $3400 \text{ см}^{-1}$  свидетельствует о наличии ОН-групп, в том числе и фенольных, вовлеченных в водородную связь. Появление полосы в области  $3000\text{--}2800 \text{ см}^{-1}$  характеризует валентные колебания С-Н в метильных и метиленовых группах. На наличие фенольных гидроксильных групп указывают полосы поглощения  $1423\text{--}1358$  и  $1226\text{--}1126 \text{ см}^{-1}$ . Появление полос поглощения в области  $1650 \text{ см}^{-1}$  связано с С=О валентными колебаниями в *para*-замещенных ароматических кетонах в исследуемом образце.

В составе фракций лигнина присутствуют все три типа моноядерных арилпропановых структур: гидроксифенил-, гваяцил- и сирингилпропановых. Наличие ароматических структур *n*-кумарового типа (Н-тип) проявляется интенсивной полосой поглощения при  $1594 \text{ см}^{-1}$ . Полосы поглощения при  $1032$ ,  $1226$  и  $1503 \text{ см}^{-1}$  указывают на присутствие ароматических фрагментов G-типа, а полосы при  $1126$  и  $1358 \text{ см}^{-1}$  – фрагментов S-типа. При этом, соотношение интегральных интенсивностей полос поглощения  $1594 \text{ см}^{-1}$  (Н-тип),  $1226 \text{ см}^{-1}$  (G-тип) и  $1358 \text{ см}^{-1}$  (S-тип) равно  $1,7:1,5:1,0$  свидетельствует о преобладающем содержании единиц Н-типа в макромолекулах лигнина.

Таблица 1. Элементный состав фракций

Условия обработки (°С/мин/Вт)	Элементный состав, %			$(\text{O/C})_{\text{ат}}$	$(\text{H/C})_{\text{ат}}$
	С	Н	О		
Фракции целлюлозы					
80/15/50	43,3	5,52	50,93	0,88	1,53
100/15/50	43,81	5,72	50,29	0,86	1,57
120/15/50	44,40	5,99	49,45	0,84	1,62
140/15/50	44,76	6,09	49,38	0,83	1,65
Фракции лигнина					
80/15/50	61,47	6,58	31,59	0,39	1,28
100/15/50	57,90	6,12	34,29	0,44	1,27
120/15/50	58,80	6,75	33,47	0,43	1,38
140/15/50	56,43	6,64	35,27	0,47	1,41

По элементному составу фракции лигнина характеризуются меньшими значениями  $(H/C)_{ат}$  и  $(O/C)_{ат}$  в сравнении с фракциями целлюлозы, выделенными в аналогичных условиях (табл. 1). Наблюдаемое повышение значения  $(H/C)_{ат}$  в интервале 80–140 °С может быть следствием накопления в составе фракции алкилароматических структур, а значений  $(O/C)_{ат}$  – протекания реакций окисления. Аналогичные изменения этих показателей происходят и при повышении мощности облучения.

Для оценки эффективности процесса термообработки соломы с ультразвуком в среде  $[Bmim][Cl]$  был проведен ферментативный гидролиз исходной соломы и выделенных фракций полисахаридов.

Суммарный выход сахаров после ферментализации исходной соломы составил 11,5% на а.с.м. (табл. 2). Применение ультразвука в сочетании с  $[Bmim][Cl]$  позволило не только сократить продолжительность и температуру обработки соломы пшеницы, но и повысить реакционную способность выделенных фракций полисахаридов в условиях ферментализации.

Независимо от условий обработки повышенной реакционной способностью в условиях ферментализации обладают фракции гемицеллюлоз. Выход сахаров после гидролиза гемицеллюлоз составил более 84% на фракцию и лежит в пределах 16–23% на а.с.м.

Выделенные в условиях эксперимента фракции целлюлозы характеризуются меньшей реакционной способностью в условиях ферментативного гидролиза. Выход сахаров изменяется от 56 до 66% на фракцию. Тем не менее, имея более высокий выход, фракция целлюлозы обеспечивает больший выход сахаров в пересчете на исходную солому, чем фракция гемицеллюлоз.

Таким образом, ультразвуковая обработка соломы пшеницы в среде  $[Bmim][Cl]$  обеспечивает увеличение общего выхода сахаров ферментализации полисахаридов в 4–5 раз. Наибольшей реакционной способностью в условиях ферментализации обладают фракции полисахаридов, выделенные после обработки соломы ультразвуком мощностью 50 Вт при 100 °С в течение 15 мин. При их гидролизе был получен максимальный выход сахаров (60,8% на а.с.м.), что составляет 83% от теоретически возможного.

Таблица 2. Выход сахаров после ферментализации фракций

Условия обработки (°С/мин/Вт)	в % на фракцию		Суммарный выход, % на а.с.м.
	целлюлозы	гемицеллюлоз	
80/15/30	60,3	85,7	56,8
80/15/50	61,8	88,4	57,4
100/15/10	56,1	85,3	52,1
100/15/30	61,5	85,8	55,9
100/15/50	65,8	90,9	60,8
120/5/30	58,5	83,1	54,5
120/10/30	62,5	86,0	56,5
120/15/30	63,2	86,5	56,1
120/15/50	61,1	90,6	55,9
140/15/30	60,8	86,0	54,0
140/15/50	56,0	84,4	49,6

### Выводы

1. Использование ультразвука мощностью 10–50 Вт при термообработке соломы пшеницы в среде  $[Bmim][Cl]$  способствует увеличению степени очистки целлюлозы от примесей гемицеллюлоз и лигнина, а также снижению продолжительности обработки.

2. Максимальная степень очистки целлюлозы (68,1%) была получена при облучении ультразвуком мощностью 50 Вт при 140 °С в течение 15 мин. Установлено, что в условиях эксперимента наиболее эффективно осуществляется удаление примесей в составе фракции гемицеллюлоз.

3. Показано, что ультразвуковая обработка соломы пшеницы в среде  $[Bmim][Cl]$  обеспечивает увеличение общего выхода сахаров ферментализации полисахаридов соломы пшеницы в 4–5 раз. Суммарный выход сахаров ферментализации фракций полисахаридов, выделенных в условиях эксперимента, составил 83% от теоретически возможного.

### Список литературы

1. Turner M.B., Spear S.K., Huddleston J.G., Holbrey J.D., Rogers R.D. Ionic liquid salt-induced inactivation and unfolding of cellulase from *Trichoderma reesei* // *Green Chemistry*. 2003. Vol. 5. Pp. 443–447.

2. Dupont J. Ionic liquids: Structure, properties and major applications in extraction/reaction technology // ChemInform. 2007. Vol. 38. N47. Pp. 229–249.
3. Евстафьев С.Н., Хоанг К.К. Влияние условий обработки на выход и состав продуктов фракционирования соломы пшеницы в среде [Bmim][Cl] // Химия растительного сырья. 2016. №4. С. 27–34.
4. Sulaiman A.Z., Ajit A., Yunus R.M., Chisti Y. Ultrasound-assisted fermentation enhances bioethanol productivity // Biochem. Eng. 2011. Vol. 54. Pp. 141–150.
5. Li Q., Ji G-S., Tang Y-B., Gu X-D., Fei J-J., Jiang H-Q. Ultrasound-assisted compatible in situ hydrolysis of sugarcane bagasse in cellulase-aqueous-N-methylmorpholine-N-oxide system for improved saccharification // Bioresour. Technol. 2012. Vol. 107. Pp. 251–257.
6. Yue F., Lan W., Zhang A., Liu C., Sun R., Ye J. Dissolution of holocellulose in ionic liquid assisted with ball-milling pretreatment and ultrasonic irradiation // BioResources. 2012. Vol. 7. N2. Pp. 2199–2208.
7. Sun R.C., Sun X.F., Ma X.H. Effect of ultrasound on the structural and physicochemical properties of organosolv soluble hemicelluloses from wheat straw // Ultrason. Sonochem. 2002. Vol. 9. Pp. 95–101.
8. Dubois M., Gilles K.A. Colorimetric method for determination of sugars and related substances // Analyt. Chem. 1956. Vol. 28. Pp. 350–356.
9. Yoon L.W., Ang T.N., Ngoh G.C., Chua A.S.M. Regression analysis on ionic liquid pretreatment of sugarcane bagasse and assessment of structural changes // Biomass and bioenergy. 2012. Vol. 36. Pp. 160–169.
10. Базарнова Н.Г., Карпова Е.В., Катраков И.Б., Маркин В.И., Микушина И.В., Ольхов Ю.А., Худенко С.В. Методы исследования древесины и ее производных. Барнаул, 2002. 160 с.
11. Дехант И., Данц Р., Киммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров. М., 1976. 472 с.
12. Kasurakova M., Belton P.S., Wilson R.H., Hirsch J., Ebringerova A. Hydration properties of xylan-type structures: an FTIR study of xylooligosaccharides // J. Sci. Food Agric. 1998. Vol. 77. Pp. 38–44.
13. Sun R., Lawther J.M., Banks W.B. Fractional and structural characterization of wheat straw hemicelluloses // Carbohydr. Polym. 1996. Vol. 29. Pp. 325–331.

*Поступило в редакцию 2 июня 2017 г.*

*После переработки 17 ноября 2017 г.*

*Evstaf'ev S.N.\**, *Khoang K.K.* ULTRASONIC TREATMENT WHEAT STRAW IN THE ENVIRONMENT 1-BUTYL-3-METHYLIMIDAZOLIUM CHLORIDE

*Irkutsk National Research Technical University, ul. Lermontova, 83, Irkutsk, 664074 (Russia), e-mail: esn@istu.edu*

The development of environmentally safe technology for processing lignocellulosic raw materials with the separation of polysaccharide and lignin fractions for subsequent use is an actual problem, a solution of which is possible when using ionic liquids as a solvent. To intensify the processing process, the possibility of using ultrasonic irradiation in the environment of 1-butyl-3-methylimidazolium chloride was studied. The results of the research of the influence of ultrasound power, temperature and processing time on the yield of fractions and the degree of purification of cellulose from impurities of hemicellulose and lignin are presented. It has been established that the use of ultrasound with a power of 10-50 W at processing of wheat straw in the environment of 1-butyl-3-methylimidazolium chloride promotes an increase in the degree of purification of cellulose from impurities, primarily hemicellulose, and a decrease in treatment time. The maximum degree of purification of cellulose was 68.1% and was received by irradiating with ultrasound 50 W at 140 °C within 15 min. It is shown that ultrasonic treatment of wheat straw in the environment of 1-butyl-3-methylimidazolium chloride provides an increase in the total yield of sugars of fermentolysis of polysaccharides of wheat straw by 4-5 times. The total yield of sugars of fermentolysis of the fractions of polysaccharides isolated in the experimental conditions was 83% of the theoretically possible.

*Keywords:* wheat straw, ionic liquid, 1-butyl-3-methylimidazolium chloride, cellulose, hemicellulose, lignin, ultrasound, IR spectroscopy.

### References

1. Turner M.B., Spear S.K., Huddleston J.G., Holbrey J.D., Rogers R.D. *Green Chemistry*, 2003, vol. 5, pp. 443–447.
2. Dupont J. *ChemInform.*, 2007, vol. 38, no. 47, pp. 229–249.
3. Evstaf'ev S.N., Khoang K.K. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2016, no. 4, pp. 27–34. (in Russ.).
4. Sulaiman A. Z., Ajit A., Yunus R. M., Chisti Y. *Biochem. Eng.*, 2011, vol. 54, pp. 141–150.
5. Li Q., Ji G-S., Tang Y-B., Gu X-D., Fei J-J., Jiang H-Q. *Bioresour. Technol.*, 2012, vol. 107, pp. 251–257.
6. Yue F., Lan W., Zhang A., Liu C., Sun R., Ye J. *BioResources.*, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 2199–2208.
7. Sun R.C., Sun X.F., Ma X.H. *Ultrason. Sonochem.*, 2002, vol. 9, pp. 95–101.
8. Dubois M., Gilles K.A. *Analyt. Chem.*, 1956, vol. 28, pp. 350–356.
9. Yoon L.W., Ang T.N., Ngoh G.C., Chua A.S.M. *Biomass and bioenergy*, 2012, vol. 36, pp. 160–169.
10. Bazarnova N.G., Karpova E.V., Katrakov I.B., Markin V.I., Mikushina I.V., Ol'khov Iu.A., Khudenko S.V. *Metody issledovaniia drevesiny i ee proizvodnykh*. [Methods for studying wood and its derivatives]. Barnaul, 2002, 160 p. (in Russ.).
11. Dekhant I., Dants R., Kimmer V., Shmol'ke R. *Infrakrasnaia spektroskopiia polimerov*. [Infrared Spectroscopy of Polymers]. Moscow, 1976, 472 p. (in Russ.).
12. Kacurakova M., Belton P. S., Wilson R. H., Hirsch J., Ebringerova A. *J. Sci. Food Agric.*, 1998, vol. 77, pp. 38–44.
13. Sun R., Lawther J.M., Banks W.B. *Carbohydr. Polym.*, 1996, vol. 29, pp. 325–331.

*Received June 2, 2017*

*Revised November 17, 2017*

---

\* Corresponding author.