

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ / CHEMICAL TECHNOLOGY

Оригинальная статья / Original

УДК 631.872 – 661.11

DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-105-112

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ УЛЬТРАЗВУКОМ СОЛОМЫ ПШЕНИЦЫ В СРЕДЕ ХЛОРИДА 1-БУТИЛ-3-МЕТИЛИМИДАЗОЛИЯ

© Хоанг Куанг Кыонг, С.Н. Евстафьев

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Выполнена термическая обработка биомассы соломы пшеницы в среде хлорида 1-бутил-3-метилимидазолия при температурах 80, 100, 120 и 140 °С с использованием ультразвукового воздействия с частотой 44 кГц и мощностью 10, 30 и 50 Вт. После обработки из соломы выделены фракции целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Полученные фракции полисахаридов подвергали ферментативному гидролизу с использованием препарата «Целлолюкс-А». С целью оптимизации процесса термообработки методом математического моделирования с использованием программы Design-Expert 8.0.5.2 исследовано изменение массовой доли сахаров ферментализации фракций полисахаридов соломы в зависимости от технологических факторов термообработки: температуры, продолжительности и мощности облучения. Установлено, температура 103 °С, продолжительность обработки 5 мин и мощность облучения 48,5 Вт являются оптимальными условиями для максимального выхода сахаров. Расхождение между прогнозируемым и экспериментально полученным выходом сахаров составило 1,8%, что подтверждает обоснованность полученной модели.

Ключевые слова: солома, полисахариды, хлорид 1-бутил-3-метилимидазолия, фракционирование, ультразвук, моделирование, оптимизация.

Формат цитирования: Хоанг К.К., Евстафьев С.Н. Оптимизация процесса обработки ультразвуком соломы пшеницы в среде хлорида 1-бутил-3-метилимидазолия // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7, N 2. С. 105–112. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-105-112

OPTIMIZATION OF WHEAT STRAW ULTRASOUND PROCESSING IN THE ENVIRONMENT OF 1-BUTYL-3-METHYLIMIDAZOLIUM CHLORIDE

© Hoang Quang Cuong, S.N. Evstaf'ev

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation.

Heat treatment of wheat straw biomass in the environment of 1-butyl-3-methylimidazolium chloride is executed at temperatures of 80, 100, 120 and 140 °C using ultrasonic frequency of 44 kHz and a power of 10, 30 and 50 W. Cellulose, hemicellulose and lignin were isolated from straw after treatment. The resulting fractions of polysaccharides were subjected to enzymatic hydrolysis using preparation Tsellolyuks A. The change of the mass concentration of sugars yielded in the enzymatic conversion of straw polysaccharides depending on the heat treatment process factors (temperature, duration and power) was investigated to optimize the heat treatment process by mathematical modeling using Design-Expert 8.0.5.2 program. The temperature of 103 °C, processing duration of 5 minutes and the power of 48.5 W were found to be optimum conditions for the maximum yield of sugars. The discrepancy between the predicted and experimentally obtained sugar yield was 1.8% that confirms the validity of the received model.

Keywords: straw, polysaccharides, 1-butyl-3-methylimidazolium chloride, fractionation, ultrasound, modeling, optimization

For citation: Hoang Q.C., Evstaf'ev S.N. Optimization of wheat straw ultrasound processing in the environment of 1-butyl-3-methylimidazolium chloride (in Russian). *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimia i Bio-*

tekhnologiya [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2017, vol 7, no. 2, pp. 105–112. (in Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-105-112

ВВЕДЕНИЕ

Результаты немногочисленных исследований позволяют предположить, что ионные жидкости (ИЖ) в ближайшей перспективе могут быть использованы для фракционирования биомассы растительного сырья с получением целлюлозы, обладающей повышенной реакционной способностью в условиях ферментализации [1–3]. Процесс обработки в среде ИЖ осуществляют при атмосферном давлении, относительно низких температурах до 150 °С и продолжительности до 6 ч [2].

Для снижения продолжительности термообработки лигноцеллюлозного сырья могут быть использованы различные физические методы, в том числе ультразвуковая обработка [4, 5]. Предполагают [6–8], что воздействие ультразвука способствует разрушению клеточных стенок и, как следствие, повышению эффективности массообмена.

Традиционные методы исследования технологических процессов связаны с выполнением экспериментов, которые требуют больших затрат времени и средств и основаны на поочередном варьировании отдельных независимых переменных. В последнее время для оптимизации технологических процессов широко используют различные статические методы, в том числе методологию анализа поверхности отклика, позволяющую оценить влияние отдельных переменных и осуществить эффективный поиск оптимальных условий для многофакторной системы [9–13].

Целями работы являлись моделирование и оптимизация процесса обработки ультразвуком соломы пшеницы в среде хлорида 1-бутил-3-метилимидазолия [Bmim][Cl] для получения максимального выхода сахаров при последующем ферментативном гидролизе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исследуемого материала использовали обессмоленную солому пшеницы крупностью менее 0,5 мм, содержащую 42,85% целлюлозы; 25,72% лигнина и 30,1% гемицеллюлозы. Для удаления экстрактивных веществ солому экстрагировали в аппарате Сокслета этанолом в течение 12 ч. Непосредственно перед экспериментом ИЖ и обессмоленную солому сушили в вакууме при 40 °С в течение 24 ч.

Термообработку осуществляли при температурах 80, 100, 120 и 140 °С. Для этого образец соломы массой 250 мг и [Bmim][Cl] (5 г) помещали в стеклянную пробирку, которую затем нагревали при 100 °С в течение 10 мин

для плавления ИЖ и равномерного смачивания соломы. Затем пробирку помещали в термостат с заданной температурой. Обработку осуществляли с помощью ультразвукового диспергатора УЗДН-2Т при рабочей частоте 44 кГц и мощности 10, 30 и 50 Вт. После ультразвукового облучения фракционирование полученной смеси на отдельные компоненты осуществляется по методике, описанной в работе [14].

Ферментализация фракций целлюлозы и гемицеллюлозы проводили ферментным препаратом «Целлолюкс-А» с целлюлазной активностью 2000 ед/г, по методике [14]. Выход редуцирующих сахаров определяли фенолсерноокислотным методом [15]. Опытно-конструкторский и статистический анализ проводили в соответствии с методом анализа поверхности отклика с помощью программы State–Ease Design–Expert 8.0.5.2. Для изучения совокупного влияния трех независимых переменных, а именно температуры обработки (А, °С), продолжительности (В, мин) и мощности ультразвука (С, Вт) на зависимую переменную – выход сахаров (У, %) была применена матрица D-оптимального плана. Диапазон и уровни независимых переменных отображены в табл. 1. Матрица D-оптимального плана представлена в табл. 2.

Для оценки отклика зависимой переменной было предположено третичное полиномиальное уравнение:

$$\begin{aligned} Y = & b_0 + b_1A + b_2B + b_3C + b_4AB + b_5AC + \\ & + b_6BC + b_7A^2 + b_8B^2 + b_9C^2 + b_{10}ABC + \\ & + b_{11}A^2B + b_{12}A^2C + b_{13}AB^2 + b_{14}AC^2 + \\ & + b_{15}B^2C + b_{16}BC^2 + b_{17}A^3 + b_{18}B^3 + b_{19}C^3, \end{aligned} \quad (1)$$

где Y – прогнозируемой реакцией; А, В и С – независимые переменные; b_0 – свободный коэффициент; b_1, b_2, b_3 – линейные коэффициенты; $b_4, b_5, b_6, b_{10}, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_{16}$ – коэффициенты взаимодействия; b_7, b_8, b_9 – вторичные коэффициенты; b_{17}, b_{18}, b_{19} – третичные коэффициенты. Значение всех коэффициентов в полиномиальном уравнении статистически оценивали с использованием F-значения с уровнем значимости 0,005.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате обработки результатов эксперимента с использованием программы State–Ease Design–Expert 8.0.5.2 была получе-

Таблица 1

Условие проведения экспериментов

Натуральные факторы	Температура обработки (A), °C	Продолжительность обработки (B), мин	Мощность ультразвука (C), Вт
Верхний уровень	140	15	50
Нижний уровень	80	5	10
Шаг варьирования	20	5	20

Таблица 2

Матрица D-оптимального плана эксперимента

Фактические значения факторов			Кодовые значения факторов			Y
A	B	C	A	B	C	
80	5	10	-1	-1	-1	50,13
120	5	30	0,33	-1	0	54,47
80	5	50	-1	-1	1	55,86
140	5	10	1	-1	-1	57,36
100	15	10	-0,33	1	-1	52,12
80	15	30	-1	1	0	56,77
100	15	50	-0,33	1	1	60,81
120	15	30	0,33	1	0	56,06
140	15	30	1	1	0	54,00
100	15	30	-0,33	1	0	55,94
120	15	50	0,33	1	1	55,87
80	15	50	-1	1	1	57,42
120	10	30	0,33	0	0	56,47
140	15	50	1	1	1	49,56
80	5	50	-1	-1	1	56,72
80	5	50	-1	-1	1	55,72
140	15	30	1	1	0	54,02
140	15	30	1	1	0	53,98

на математическая модель в нормированном виде:

$$Y = 55,28 + 5,03C - 1,70AB - 1,98AC - 1,36BC - 5,46A^2C. \quad (2)$$

Оценка качества полученной модели выполнена с помощью дисперсионного анализа (табл. 3). Согласно данным дисперсионного анализа значение F-отношения (F-value) модели равно 24,85 и очень низкое значение вероятности ошибки (менее 0,0001) свидетельствуют о высокой точности математической модели.

Множественный коэффициент детерминации для модели составил

$$R^2 = 111,02 / 121,75 = 0,91,$$

т.е. только 9% от общей дисперсии отклика не может быть объяснено с помощью модели. Высокое значение коэффициента детерминации подразумевает сильную корреляцию между фактическими и прогнозируемыми значениями (рис. 1).

Проверка адекватности модели проведена с целью доказательства пригодности полученного уравнения регрессии для описания экспериментальных данных с заданной точностью. Она включает сопоставление ошибки экспериментального определения значений отклика (называемой в регрессионном анализе ошибкой воспроизводимости или чистой ошибкой) и ошибки, связанной с отклонением экспериментальных значений отклика от

Дисперсионный анализ для полученной модели

Источник вариации	Сумма квадратов	Степень свободы	Среднее значение квадратов	F-отношение (F-value)	Вероятность ошибки ([Prob >F])
Модель	111,02	5	22,20	24,85	<0,0001
С	32,11	1	32,11	35,93	<0,0001
АВ	19,64	1	19,64	21,97	0,0005
АС	15,52	1	15,52	17,37	0,0013
ВС	7,00	1	7,00	7,83	0,0161
A ² C	26,35	1	26,35	29,49	0,0002
Остаток	10,72	12	0,89	–	–
Точность построения	10,14	8	1,27	8,69	0,0265
Чистая ошибка	0,58	4	0,15	–	–
Общая сумма	121,75	17	–	–	–

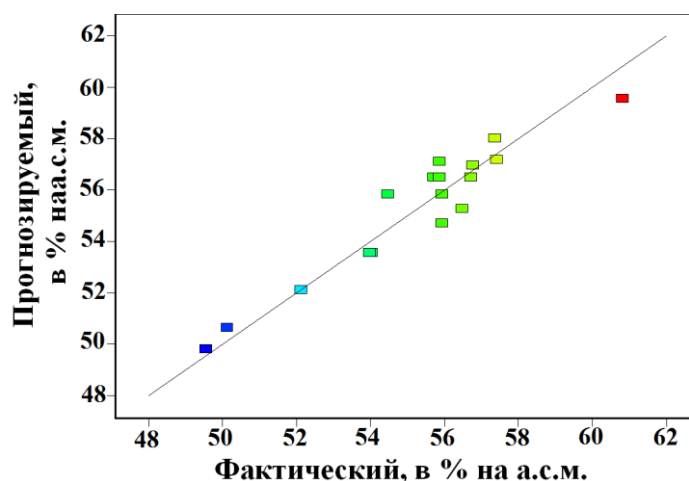


Рис. 1. Прогнозируемый и фактический выход сахаров

расчетных (по модели). Использован наиболее распространенный критерий – F-критерий Фишера. Рассчитанное значение F-критерия Фишера для полученной модели составило 0,646, что намного меньше табличного значения критерия Фишера (2,43) с вероятностью 95%. Это доказывает, что полученная модель адекватна [16]. Кроме того, значения [Prob >F] всех коэффициентов, присутствующих в модели, были меньше 0,05 (табл. 3), что также подтверждает их значимость [17–19].

Математическая модель регрессии в нормированном виде позволяет по знаку и величине коэффициентов судить о вкладе той или иной независимой переменной в вариацию среднего отклика. В полученной модели (2) по линейным эффектам на выход сахаров (Y) влияет только мощность облучения ультразвуком (C). Ее повышение увеличивает общий выход сахаров, так как при этом коэффициент

в модели принимает положительное значение (+5,03C).

Вышеперечисленные статистические тесты показали, что разработанная модель обеспечивает хорошую корреляцию между переменными обработки и откликом, и этого достаточно, чтобы предсказать общий выход сахаров при различных комбинациях условий термообработки в исследуемом диапазоне переменных.

Для получения оптимальных условий термообработки соломы пшеницы ультразвуком в среде ИЖ, которые обеспечивают максимальный общий выход сахаров после ферментативного гидролиза, коэффициенты регрессии были использованы для формирования поверхности отклика из регрессионной модели. Трехмерные графики (рис. 2–4) были получены при сохранении значения одной переменной постоянным и варьировании значений остальных

ных переменных в исследованном диапазоне. Результирующие поверхности отклика показали влияние температуры, продолжительности и мощности облучения на общий выход сахаров.

Влияние температуры и продолжительности обработки соломы пшеницы ультразвуком в среде ИЖ при различных мощностях облучения показано на рис. 2. В зависимости от мощности ультразвука поверхность отклика имеет разную форму. При мощности облучения 10 Вт поверхность отклика имеет вогнутую форму (рис. 2, а), а при мощности 50 Вт – выпуклую форму (рис. 2, в). Поверхность отклика при средней мощности облучения (30 Вт) характеризуется сложной формой (рис. 2, б). При этом выход сахаров при мощности 10 Вт находится в интервале 48–58%, при мощности 30 Вт в интервале 53–57%, а при 50 Вт повышается до 61% на а.с.м.

На рис. 3 показана поверхность отклика для общего выхода сахаров в зависимости от температуры и мощности ультразвуковой обработки. Можно заметить, что независимо от продолжительности обработки все три поверхности имеют вогнутую форму при 10 Вт и выпуклую форму при 50 Вт.

На рис. 4 показано влияние продолжительности и мощности ультразвуковой обработки на общий выход сахаров. Можно заметить, что все поверхности отклика для различных температур обработки выглядят плоскими с разным углом наклона.

В интервале 80–100 °С для всех значений продолжительности в рассматриваемом интервале общий выход редуцирующих сахаров, полученный после ферментализации, в целом возрастает с повышением мощности облучения (рис. 4, а и б). Для интервала 120–140 °С общий выход сахаров уменьшается с увеличением продолжительности и мощности обработки (рис. 4, в и г).

В результате анализа поверхности отклика были определены оптимальные условия процесса термообработки соломы пшеницы в среде [Bmim][Cl] с использованием ультразвукового воздействия: температура – 103 °С, продолжительность – 5 мин и мощность – 48,5 Вт. Прогнозируемый выход сахаров составил 60,9% на а.с.м. Фактический выход сахаров, полученный при ферментализации полисахаридов, выделенных из соломы пшеницы, термообработанной в оптимальных условиях, был равен 59,8%.

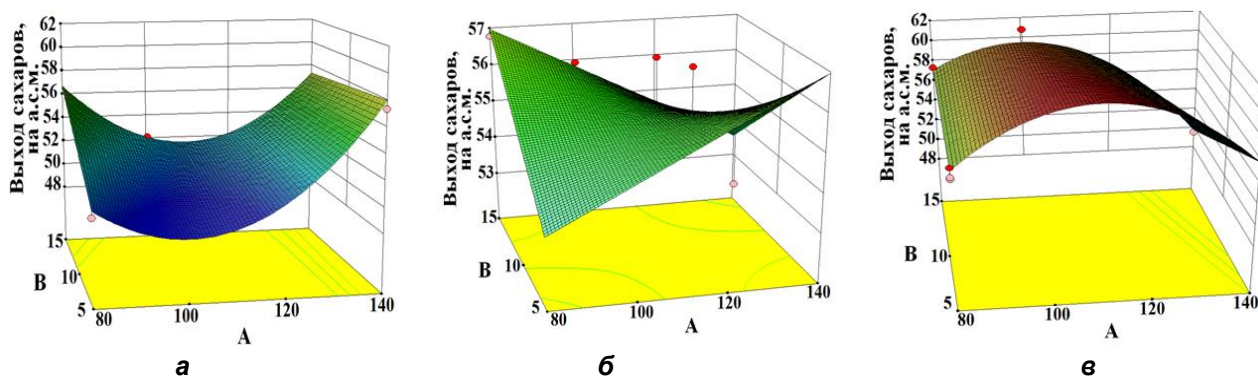


Рис. 2. Влияние температуры и продолжительности термообработки на выход сахаров: а-10 Вт, б-30 Вт, в-50 Вт

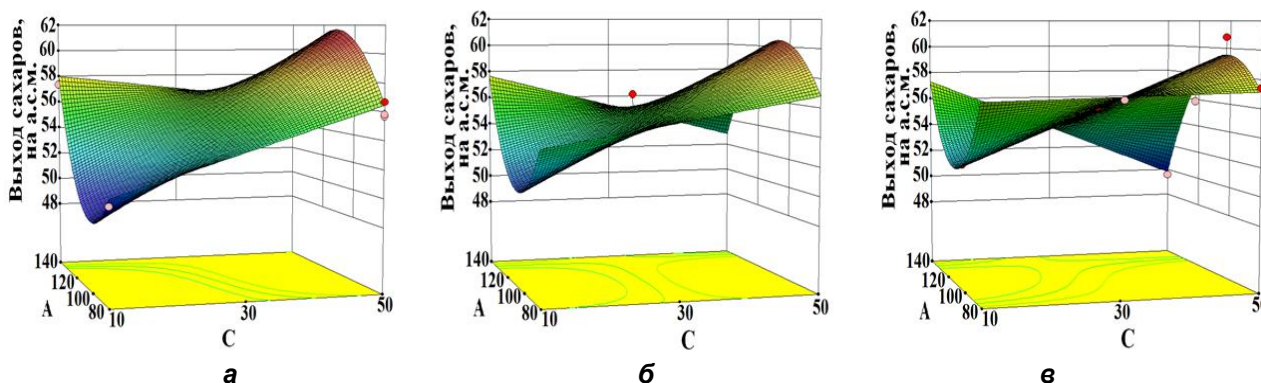


Рис. 3. Влияние температуры и мощности ультразвуковой обработки на выход сахаров: а – 5 мин; б – 10 мин; в – 15 мин

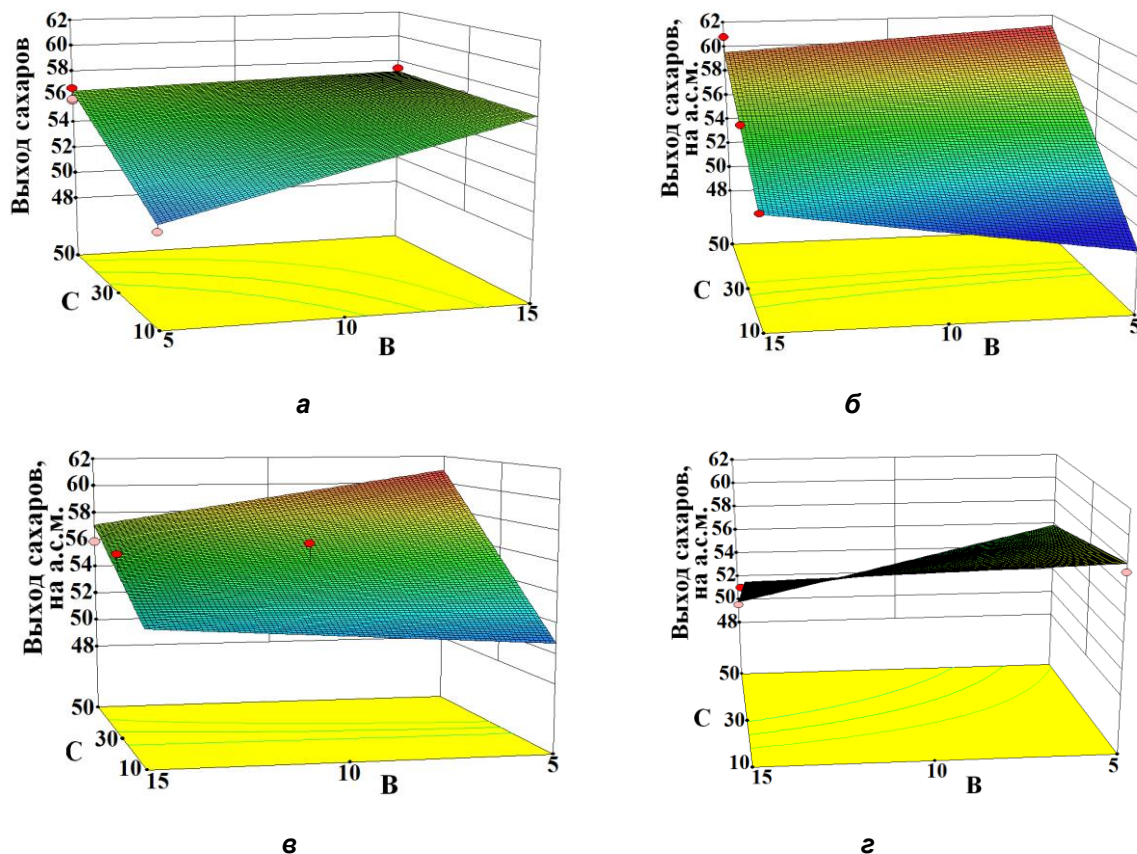


Рис. 4. Влияние мощности и продолжительности ультразвуковой обработки на выход сахаров: а – 80 °С; б – 100 °С; в – 120 °С; г – 140 °С

Расхождение между прогнозируемым и экспериментально полученным выходом сахаров составило 1,8%. Этот результат указывает на то, что существует отличная корреляция между экспериментальными и прогнозируемыми значениями и, в свою очередь, подтверждает обоснованность модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе методом мате-

матического моделирования с использованием программы Design-Expert 8.0.5.2 изучено изменение массовой доли сахаров ферментализации фракций полисахаридов соломы в зависимости от технологических факторов термообработки в среде [Bmim][Cl]: температуры, продолжительности и мощности облучения ультразвуком. Получена математическая модель процесса, и установлены оптимальные условия его проведения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brandt A., Ray M. J., To T. Q., Leak D. J., Murphy R. J., Welton, T. Ionic liquid pretreatment of lignocellulosic biomass with ionic liquid–water mixtures // *Green Chemistry*. 2011. V. 13, N 9. P. 2489–2499.
2. Zhang Z-G, Chen H-Z. Enhancement of the enzymatic hydrolysis of wheat straw by pretreatment with 1-allyl-3-methylimidazolium chloride ([Amim]Cl) // *African Journal of Biotechnology*. 2012. V. 11, N 31. P. 8032–8037.
3. Nawshad M., Zakaria M., Mohamad Azmi, B. K. Ionic liquid—a future solvent for the enhanced uses of wood biomass // *Eur. J. Wood Prod.* 2012. V. 70. P. 125–133.
4. Tang A. M., Zhang H. W., Chen G., Xie G. H., Liang W. Z. Influence of ultrasound treatment on accessibility and regioselective oxidation reactivity of cellulose // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2005. V. 12, N 6. P. 467–472.
5. Gadhe J. B., Gupta R. B., Elder T. Surface modification of lignocellulosic fibers using high-frequency ultrasound // *Cellulose*. 2006. V. 13. P. 9–22. DOI: 10.1007/s10570-005-9018-z.
6. Aliyu M., Hephher M. J. Effects of ultrasound energy on degradation of cellulose material // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2000. V. 7, N 4. P. 265–268.
7. Mikkola J.P., Kirilin A., Tuuf J.C., Pra-

novich A., Holmbom B., Kustov L.M., Murzin D.Y., Salmi T. Ultrasound enhancement of cellulose processing in ionic liquids: From dissolution towards functionalization // *Green Chemistry*. 2007. V. 9, N 11. P. 1229–1237.

8. Swatloski R.P., Spear S.K., Holbrey J.D., Rogers R.D. Dissolution of cellulose with ionic liquids // *Journal of the American Chemical Society*. 2002. V. 12, N 18. P. 4974–4975.

9. Mohan P.R., Kumar B.V., Reddy O.V.S. Optimization of pretreatment conditions for increased cellulose conversion of sugarcane bagasse using peracetic acid employing central composite design // *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 2013. V. 35, N 2. P. 177–185.

10. Qiu Z.G.M., Aita S.M. Optimization by response surface methodology of processing conditions for the ionic liquid pretreatment of energy cane bagasse // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2014. V. 89, N 5. P. 682–689. DOI:10.1002/jctb.4167.

11. Anupama M.P., Mahesh D.G., Ayyanna C. Optimization of fermentation medium for the production of Ethanol from Jaggery using box-behken design // *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*. 2010. V. 1. P. 34–45.

12. Fang H., Zhao C., Song X. Optimization of enzymatic hydrolysis of steam-exploded corn stover by two approaches: Response surface

methodology or using cellulase from mixed cultures of *Trichoderma reesei* RUT- C30 and *Aspergillus niger* NL02 // *Bioresource Technology*. 2010. V. 101, N 11. P. 4111–4119.

13. Tian S., Wang Z., Fan Z., Zuo L. Optimization of CO₂ laser-based pre-treatment of corn stover using response surface methodology // *Bioresource Technology*. 2011. V. 102, N 22. P. 10493–10497.

14. 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. N 4. С. 27–34. DOI: 10.14258/jcprm.2016041308.

15. Dubois M., Gilles K.A. Colorimetric method for determination of sugars and related substances // *Analyt. Chem.* 1956. V. 28. P. 350–356.

16. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М.: Высш. шк., 1985. 327 с.

17. Draper N.R., Smith H. *Applied Regression Analysis*. Third Edition. New Jersey, John Wiley & Sons, 1998, 736 p.

18. Frees E.W. *Regression modeling with actuarial and financial applications*. New York: Cambridge University Press, 2009. 584 p.

19. Floudas C.A., Paralos P.M. *Encyclopedia of optimization*. Second Edition. New York: Springer, 2008. 4622 p.

REFERENCES

1. Brandt A., Ray M.J., To T.Q., Leak D.J., Murphy R.J., Welton T. Ionic liquid pretreatment of lignocellulosic biomass with ionic liquid–water mixtures. *Green Chemistry*. 2011, vol. 13, no. 9, pp. 2489–2499.

2. Zhang Z-G, Chen H-Z. Enhancement of the enzymatic hydrolysis of wheat straw by pretreatment with 1-allyl-3-methylimidazolium chloride ([Amim]Cl). *African Journal of Biotechnology*. 2012, vol. 11, no. 31, pp. 8032–8037.

3. Nawshad M., Zakaria M., Mohamad Azmi B.K. Ionic liquid – a future solvent for the enhanced uses of wood biomass. *Eur. J. Wood Prod.* 2012, vol. 70, pp. 125–133.

4. Tang A.M., Zhang H.W., Chen G., Xie G.H., Liang W.Z. Influence of ultrasound treatment on accessibility and regioselective oxidation reactivity of cellulose. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2005, vol. 12, no. 6, pp. 467–472.

5. Gadhe J.B., Gupta R.B., Elder T. Surface modification of lignocellulosic fibers using high-frequency ultrasound. *Cellulose*. 2006, vol. 13, pp. 9–22. DOI: 10.1007/s10570-005-9018-z.

6. Aliyu M., Hopher M.J. Effects of ultrasound energy on degradation of cellulose material. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2000, vol. 7, no. 4,

pp. 265–268.

7. Mikkola J.P., Kirilin A., Tuuf J.C., Pranovich A., Holmbom B., Kustov L.M., Murzin D.Y., Salmi T. Ultrasound enhancement of cellulose processing in ionic liquids: From dissolution towards functionalization. *Green Chemistry*. 2007, vol. 9, no. 11, pp. 1229–1237.

8. Swatloski R.P., Spear S.K., Holbrey J.D., Rogers R.D. Dissolution of cellulose with ionic liquids. *Journal of the American Chemical Society*. 2002, vol. 12, no. 18, pp. 4974–4975.

9. Mohan P.R., Kumar B.V., Reddy O.V.S. Optimization of pretreatment conditions for increased cellulose conversion of sugarcane bagasse using peracetic acid employing central composite design. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 2013, vol. 35, no. 2, pp. 177–185.

10. Qiu Z.G.M., Aita S.M. Optimization by response surface methodology of processing conditions for the ionic liquid pretreatment of energy cane bagasse. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2014, vol. 89, no. 5, pp. 682–689. DOI:10.1002/jctb.4167.

11. Anupama M.P., Mahesh D.G., Ayyanna C. Optimization of fermentation medium for the production of ethanol from jaggery using box-

behnken design. *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*. 2010, vol. 1, pp. 34–45.

12. Fang H., Zhao C., Song X. Optimization of enzymatic hydrolysis of steam-exploded corn stover by two approaches: Response surface methodology or using cellulase from mixed cultures of *Trichoderma reesei* RUT-C30 and *Aspergillus niger* NL02. *Bioresource Technology*. 2010, vol. 101, no. 11, pp. 4111–4119.

13. Tian S., Wang Z., Fan Z., Zuo L. Optimization of CO₂ laser-based pre-treatment of corn stover using response surface methodology. *Bioresource Technology*. 2011, vol. 102, no. 22, pp. 10493–10497.

14. Evstaf'ev S.N., Khoang K.K. Influence of processing conditions on output and product composition of wheat straw fractionation in medium of 1-butyl-3-methylimidazolium chloride. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant

raw material]. 2016, vol. 4, pp. 27–34. DOI: 10.14258/jcprm.2016041308. (in Russian)

15. Dubois M., Gilles K.A. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analyt. Chem.* 1956, vol. 28, pp. 350–356.

16. Akhnazarova L.S., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii* [Methods of experiment optimization in chemical technology]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985, 327 p.

17. Draper N.R., Smith H. *Applied Regression Analysis*. Third Edition. New Jersey, John Wiley & Sons, 1998, 736 p.

18. Frees E.W. *Regression modeling with actuarial and financial applications*. New York, Cambridge University Press, 2009, 584 p.

19. Floudas C.A., Pardalos P.M. *Encyclopedia of optimization*. Second Edition. New York, Springer, 2008, 4622 p.

Критерии авторства

Хоанг Куанг Кыонг, Евстафьев С.Н. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Хоанг Куанг Кыонг, Евстафьев С.Н. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Хоанг Куанг Кыонг

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Аспирант,
hqc9189@gmail.com

Сергей Н. Евстафьев

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Д.х.н., профессор, директор Института пищевой инженерии и биотехнологии,
esn@istu.edu

Поступила 03.03.2017

Contribution

Hoang Quang Cuong, Evstaf'ev S.N. carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Hoang Quang Cuong, Evstaf'ev S.N. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

AUTHORS' INDEX Affiliation

Hoang Quang Cuong

Irkutsk National Research Technical University
Postgraduate Student
hqc9189@gmail.com

Sergei N. Evstaf'ev

Irkutsk National Research Technical University
Doctor of Chemistry, Professor, Director of the Institute of Food Engineering and Biotechnology
esn@istu.edu

Received 03.03.2017