

УДК 662.71:543.544.3

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-160-166>



Термохимическое ожигение соломы пшеницы в среде суб- и сверхкритического тетралина

Сергей Николаевич Евстафьев, Елена Сергеевна Фомина,
Надежда Павловна Тигунцева

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку: Евстафьев Сергей Николаевич, esn@istu.edu

Аннотация. Целью работы являлось изучение термохимических превращений биомассы соломы пшеницы в среде суб- и сверхкритического тетралина. Эксперимент выполнен в реакторе периодического действия при температурах 285, 330, 380, 420 и 460 °С, продолжительность обработки – 10 мин. Установлено, что процесс ожигения соломы в субкритическом тетралине характеризуется сравнительно высокой эффективностью. При 420 °С степень конверсии биомассы составила 98,2% а.с.м. Максимальный выход жидких продуктов ожигения (81,6% а.с.м.) получен при 380 °С. Жидкие продукты фракционировали последовательной экстракцией гексаном, водой и этанолом. По данным ГХ-МС гексанрастворимые продукты ожигения представлены смесью низкомолекулярных продуктов деструкции компонентов соломы и продуктов превращения тетралина. В составе продуктов деструкции компонентов соломы идентифицированы метиловые эфиры жирных кислот, ароматические соединения, алканы и в минорных количествах спирты и кетоны. С повышением температуры обработки содержание сложных эфиров снижается с увеличением доли ароматических соединений до 50% отн. В составе гексанрастворимых продуктов ожигения, полученных при 460 °С, сложные эфиры и фенольные соединения отсутствуют. В условиях процесса происходит дегидрирование, алкилирование и изомеризация тетралина с образованием нафталина, 1,4-дигидронафталина и алкилпроизводных тетралина, нафталина и индана. На основании результатов сравнительного анализа ИК-спектров соломы и твердых продуктов ожигения сделано предположение о том, что при температурах процесса до 330 °С в биомассе соломы интенсивно протекают процессы фрагментации полисахаридов, а при более высоких температурах – лигнина. В результате в ИК-спектре твердого продукта, полученного при 380 °С, присутствуют слабо выраженные полосы поглощения алкилароматических структурных фрагментов, а на ИК-спектрах твердого продукта, полученного при 420 °С, – только полосы поглощения минеральных компонентов золы соломы и адсорбированной воды.

Ключевые слова: солома пшеницы, ожигение, тетралин, суб- и сверхкритические условия, ИК-спектроскопия

Для цитирования: Евстафьев С. Н., Фомина Е. С., Тигунцева Н. П. Термохимическое ожигение соломы пшеницы в среде суб- и сверхкритического тетралина // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 1. С. 160–166. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-160-166>.

BRIEF COMMUNICATION

Thermochemical liquefaction of wheat straw in sub- and supercritical tetralin

Sergei N. Evstaf'ev, Elena S. Fomina,
Nadezhda P. Tiguntceva

Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation

Corresponding author: Sergei N. Evstaf'ev, esn@istu.edu

Abstract. The present work investigates the thermochemical conversion of wheat straw biomass in a sub- and supercritical tetralin medium. The experiment was carried out in a batch reactor at 285, 330, 380, 420

and 460 °C for 10 minutes. The process of straw liquefaction in subcritical tetralin was characterised by relatively high efficiency. At 420 °C, the biomass conversion rate amounted to 98.2% a.d.m. The maximum yield of liquid products during liquefaction (81.6% a.d.m.) was obtained at 380 °C. The liquid products were fractionated by successive extraction with hexane, water and ethanol. According to GC-MS data, the liquefaction products soluble in hexane comprised a mixture of low-molecular weight degradation products of straw components and tetralin derivatives, including methyl esters of fatty acids, aromatic compounds, alkanes and minor alcohols and ketones. When the process temperature increased, the content of esters diminished, followed by an increment in the proportion of aromatic compounds up to 50% rel. No esters and phenolic compounds were present in the liquefaction products soluble in hexane obtained at 460 °C. Dehydrogenation, alkylation and isomerisation of tetralin with the formation of naphthalene, 1,4-dihydronaphthalene and alkyl derivatives of tetralin, naphthalene and indane occurred under the given conditions. The conducted comparative analysis of infrared spectra for straw and solid products of liquefaction suggested that, at temperatures of up to 330 °C, the process of polysaccharide fragmentation is more pronounced in the straw biomass, while, at higher temperatures, the process of lignin fragmentation prevails. As a result, the IR-spectrum of the solid product obtained at 380 °C revealed weakly pronounced absorption bands of alkylaromatic structural fragments. At the same time, only the absorption bands of mineral components in straw ash and adsorbed water were observed in the IR-spectrum of the solid product obtained at 420 °C.

Keywords: wheat straw, liquefaction, tetralin, sub- and supercritical conditions, IR spectroscopy

For citation: Evstaf'ev S. N., Fomina E. S., Tiguntceva N. P. Thermochemical liquefaction of wheat straw in sub- and supercritical tetralin. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(1):160-166. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-160-166>.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных способов химической переработки отходов лигноцеллюлозного сырья с целью получения биотоплив и сырья для химической промышленности является термохимическая конверсия в суб- и сверхкритических условиях [1, 2]. Значительная часть выполненных в этой области работ была направлена на отработку условий подготовки целлюлозы для последующего ферментализа и ферментации выделенных сахаров с получением биотоплив. В соответствии с этим подбирали условия процесса и растворители, которые позволяли либо переводить целлюлозу в низкомолекулярные сахара [3–5], либо селективно извлекать из лигноцеллюлозы лигнин [6–11]. При этом лигнин считался отходом производства биотоплив и если использовался, то только в качестве энергетического топлива [12]. Значительная часть его складировалась в отстойниках, что представляет на сегодняшний день серьезную экологическую проблему.

В то же время лигнин как природный полимер занимает второе место после целлюлозы и представляет собой источник различных низкомолекулярных органических веществ. Тем не менее в настоящее время не существует промышленных технологий переработки лигнина с получением ценных продуктов с высокой добавленной стоимостью, в том числе высокоценных ароматических углеводородов, в связи с чем валоризация лигнина является актуальной задачей для химии и технологии [13].

Известно, что на выход и состав продуктов ожижения наряду с условиями процесса (температура, давление, катализатор) существенное

влияние оказывает природа используемого растворителя [14]. Ряд растворителей способствует превращению биомассы лигноцеллюлозного сырья в бионефть с высоким содержанием ароматических соединений. Одним из таких растворителей является тетралин, представляющий собой неполярный растворитель, не способный образовывать водородные связи, но эффективный в качестве донора водорода. Его эффективность подтверждена при ожижении углей и растительной биомассы [15–18]. Тем не менее тетралин остается относительно мало изученным растворителем для ожижения лигноцеллюлозного сырья. Требуется дополнительное исследование для того, чтобы понять его влияние на глубину и скорость преобразования биомассы лигноцеллюлозного сырья, выход и состав продуктов ожижения.

Целью работы являлось изучение термохимических превращений биомассы соломы пшеницы в среде суб- и сверхкритического тетралина.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Работа выполнена с образцами соломы пшеницы крупностью 1–5 мм. Компонентный состав соломы, в % на абсолютно сухую массу соломы (% а.с.м.): целлюлоза – 41,9; лигнин – 23,5; пентозаны – 18,9. В качестве растворителя использован тетралин ($T_{кр} = 447\text{ °C}$, $P_{кр} = 3,69\text{ МПа}$ [19]).

Эксперимент выполнен в реакторе периодического действия при температурах 285, 330, 380, 420 и 460 °C, продолжительность обработки – 10 мин. Реактор объемом 8 см³ изготовлен из нержавеющей стали. Навеску соломы массой 0,25–0,30 г загружали в металлический сетчатый контейнер, который помещали в реактор и при-

ливали 7 см³ тетралина. Скорость нагрева реактора до заданной температуры – 12–15 °С/мин, скорость охлаждения – 50 °С/мин.

После охлаждения вынимали контейнер, нерастворившуюся часть соломы (твердый продукт) промывали этанолом и сушили при 105 °С. Этанольный раствор смешивали с жидкими продуктами ожигения. После удаления растворителей на ротормном испарителе получали жидкий продукт, который сушили на лиофильной сушилке VaCo 2 (Zirbus Technology GmbH, Германия) при температуре -40 °С в течение 12 ч.

Выход газа определяли как разность между потерей массы соломы при ожигении и выходом жидкого продукта.

Жидкие продукты фракционировали последовательной исчерпывающей экстракцией гексаном, водой и этанолом при температуре кипения растворителей.

Состав гексановых экстрактов анализировали на хроматографе 7820 А с селективным масс-спектрометрическим детектором HP 5975 (Agilent Technologies, США). Кварцевая колонка 30000×0,25 мм со стационарной фазой (95% диметил – 5% дифенилполисилоксан). Условия анализа: 3 мин выдержка при 50 °С с последующим подъемом температуры до 250 °С со скоростью 6 град/мин и выдержкой в течение 40 мин при температуре 250 °С. Идентификацию соединений осуществляли с использованием библиотеки масс-спектров NIST 11.

ИК-спектры твердых продуктов регистрировали на инфракрасном спектрофотометре IRAffinity-1 с преобразованием Фурье (SHIMADZU, Япония) в таблетке KBr.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно полученным данным, термохимическое ожигение биомассы соломы пшеницы в среде субкритического тетралина характеризуется относительно высокой эффективностью. При повышении температуры процесса в интервале 285–420 °С степень конверсии биомассы соломы увеличилась с 63,5 до 98,2% а.с.м. (рис. 1). При переходе в сверхкритическую для тетралина область (460 °С) она практически не изменилась, но наблюдалось увеличение выхода газообразных продуктов до 22,1% а.с.м. Максимальный выход жидких продуктов (81,6% а.с.м.) в исследуемых условиях процесса получен при 380 °С. При повышении температуры до 460 °С он снижается до 76,1% а.с.м.

В результате фракционирования жидких продуктов были выделены четыре фракции: гексановый и этанольный экстракты, водорастворимые соединения и фракция не растворимых в этаноле соединений. Ранее было установлено [3, 20], что при ожигении соломы в гексановый экстракт переходят относительно низкомолекулярные продукты деструкции компонентов био-

массы, во фракцию водорастворимых соединений – продукты деструкции полисахаридов, а во фракциях этанольного экстракта и этанолнерастворимых соединений сконцентрированы преимущественно полярные и высокомолекулярные соединения.

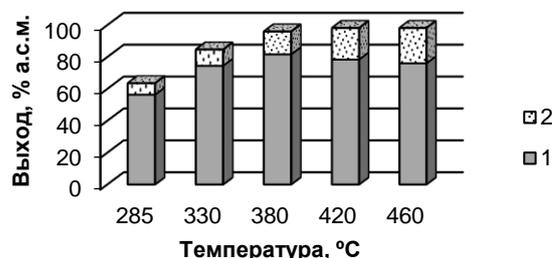


Рис. 1. Зависимость выхода жидких (1) и газообразных (2) продуктов от температуры процесса ожигения соломы в тетралине

Fig. 1. Yield of liquid (1) and gaseous (2) products versus the temperature of the straw liquefaction process in tetralin

Согласно полученным данным (рис. 2), в интервале температур 285–380 °С из биомассы соломы извлекаются преимущественно полярные и высокомолекулярные соединения. На их долю приходится более 50% отн. выделенных жидких продуктов. Суммарный выход этанольного экстракта и фракции не растворимых в этаноле соединений проходит через максимум при 330 °С и составляет 44,1% а.с.м. При повышении температуры до 460 °С он снижается до 29,8% а.с.м. при увеличении выхода гексанового экстракта до 22,1% а.с.м. Как следствие, доля гексанрастворимых соединений в жидких продуктах, полученных при 420 и 460 °С, составляет около 50% отн.

По данным ГХ-МС гексановые экстракты представлены смесью низкомолекулярных продуктов деструкции компонентов соломы и продуктов дегидрирования, алкилирования и изомеризации тетралина. Низкомолекулярные продукты деструкции компонентов соломы представлены метиловыми эфирами карбоновых кислот, алканами, ароматическими соединениями и с незначительным содержанием спиртами и кетонами. Свободные карбоновые кислоты не обнаружены. Выход и компонентный состав продуктов зависит от температуры процесса. С ее повышением происходит снижение содержания сложных эфиров и увеличение доли ароматических соединений, в составе которых снижается содержание фенолов. В гексановом экстракте, полученном при 460 °С, сложные эфиры и фенолы не обнаружены. В условиях процесса превращения тетралина сопровождаются образованием нафталина, 1,4-дигидронафталина, индана и алкилпроизводных тетралина. Наряду с этим, идентифицированы алкилнафталины и алки-

линданы. С повышением температуры доля этих продуктов в гексановых экстрактах повышается.

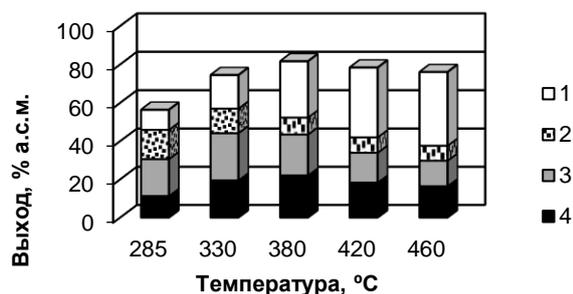


Рис. 2. Зависимость фракционного состава жидких продуктов ожижения соломы в тетралине от температуры: 1 – гексановый экстракт; 2 – фракция водорастворимых соединений; 3 – этанольный экстракт; 4 – фракция не растворимых в этаноле соединений

Fig. 2. Fractional composition of liquid products of straw liquefaction in tetralin versus temperature: 1 – hexane extract; 2 – water soluble compounds; 3 – ethanol extract; 4 – ethanol insoluble compounds

Относительно высокий выход водорастворимых соединений наблюдается при температурах процесса ожижения до 330 °C. С повышением температуры выход фракции снижается в результате вторичных термических превращений ее компонентов. Следует отметить, что полученная динамика выхода фракции водорастворимых соединений хорошо коррелирует с результатами сравнительного анализа ИК-спектров исходной соломы и твердых продуктов ожижения (рис. 3).

Согласно результатам анализа, после ожижения соломы в исследуемом интервале температур в ИК-спектрах полученных твердых продуктов наблюдаются значительные изменения во всем интервале частот. Для твердых продуктов, полученных до 330 °C, наиболее выражены изменения для полос поглощения полисахаридов. Происходит уменьшение интенсивности полос поглощения валентных (3400 см⁻¹) и деформационных (1422, 1375, 1246 см⁻¹) колебаний ОН-групп, валентных колебаний карбонильной группы сложных эфиров гемицеллюлоз при 1730 см⁻¹, а также валентных колебаний связей С-О-С, С-С и С-ОН в области 1200–900 см⁻¹.

При этом полосы поглощения структурных фрагментов лигнина 1595, 1513 и 1450 см⁻¹ сохраняют свою интенсивность. Интенсивная деструкция лигнина происходит при температурах выше 330 °C, что находит отражение в снижении интенсивности соответствующих полос поглощения. Так, в ИК-спектре твердого продукта, полученного при 380 °C, полосы поглощения алкилароматических структурных фрагментов при 2926,

2820, 1595 и 1450 см⁻¹ характеризуются средней интенсивностью, а в ИК-спектре твердого продукта, полученного при 420 °C, эти полосы слабо выражены. Присутствуют полосы поглощения адсорбированной воды при 3430 см⁻¹ и минеральных компонентов золы соломы с максимумом при 1090 см⁻¹.

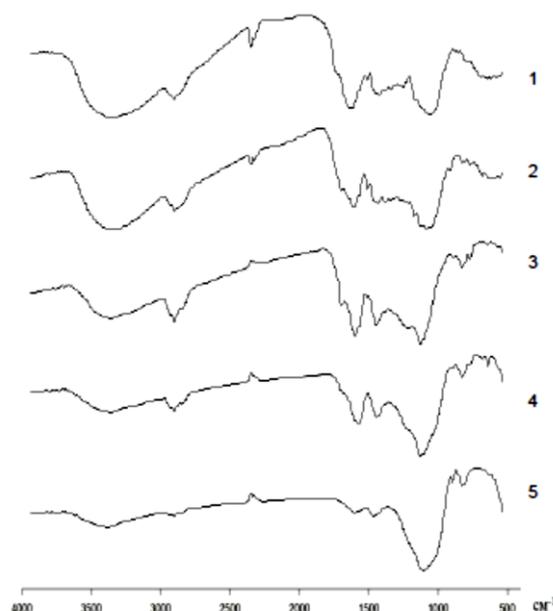


Рис. 3. ИК-спектры соломы пшеницы (1) и твердых продуктов, полученных при температурах: 2 – 285 °C; 3 – 330 °C; 4 – 380 °C; 5 – 420 °C

Fig. 3. IR spectra of wheat straw (1) and solid products obtained at temperatures: 2 – 285 °C; 3 – 330 °C; 4 – 380 °C; 5 – 420 °C

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования установлено:

- процесс термохимического ожижения соломы в субкритическом тетралине характеризуется высокой эффективностью;
- в условиях процесса интенсивная фрагментация полисахаридов соломы протекает при температурах до 330 °C, а при более высоких температурах наиболее выражена деструкция лигнина;
- гексанрастворимые продукты ожижения соломы пшеницы представлены сложной смесью низкомолекулярных продуктов ожижения биомассы и продуктов дегидрирования, алкилирования и изомеризации тетралина;
- жидкие продукты, полученные при ожижении соломы пшеницы при температуре выше 420 °C, характеризуются высоким содержанием низкомолекулярных ароматических соединений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kajimoto O. Solvation in supercritical fluids: its effects on energy transfer and chemical reactions // *Chemical Reviews*. 1999. Vol. 99, no. 2. P. 355–390. <https://doi.org/10.1021/cr970031l>.
2. Sun Y., Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review // *Biore-source Technology*. 2002. Vol. 83, no. 1. P. 1–11. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00212-7).
3. Евстафьев С. Н., Чечикова Е. В. Превращения полисахаридов соломы пшеницы в динамических условиях процесса субкритического автогидролиза // *Химия растительного сырья*. 2015. N. 1. С. 41–49. <https://doi.org/10.14258/jcp.rm.201501426>.
4. Perkins G., Batalha N., Kumar A., Bhaskar T., Konarova M. Recent advances in liquefaction technologies for production of liquid hydrocarbon fuels from biomass and carbonaceous wastes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 115. P. 109400. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109400>.
5. de Caprariis B., De Filippis P., Petruccio A., Scarsella M. Hydrothermal liquefaction of biomass: influence of temperature and biomass composition on the bio-oil production // *Fuel*. 2017. Vol. 208. P. 618–625. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.054>.
6. Hewetson B. B., Zhang X., Mosier N. S. Enhanced acid-catalyzed biomass conversion to hydroxymethylfurfural following cellulose solvent-and organic solvent-based lignocellulosic fractionation pretreatment // *Energy & Fuels*. 2016. Vol. 30. P. 9975–9977. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01910>.
7. Ma P., Gao Y., Zhai H. Fractionated wheat straw lignin and its application as antioxidant // *Bio-Resources*. 2013. Vol. 8, no. 4. P. 5581–5595. <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.5581-5595>.
8. Chesi C., de Castro I. B. D., Clough M. T., Ferrini P., Rinaldi R. The influence of hemicellulose sugars on product distribution of early-stage conversion of lignin oligomers catalysed by Raney nickel // *ChemCatChem*. 2016. Vol. 8, no. 12. P. 2079–2088. <https://doi.org/10.1002/cctc.201600235>.
9. Schutyser W., Van den Bosch S., Renders T., De Boe T., Koelewijn S.-F., Dewaele A., et al. Influence of bio-based solvents on the catalytic reductive fractionation of birch wood // *Green Chemistry*. 2015. Vol. 17, no. 11. P. 5035–5045. <https://doi.org/10.1039/c5gc01442e>.
10. Galkin M. V., Smit A. T., Subbotina E., Artemenkon K. A., Bergquist J., Huijgen W. J. J., et al. Hydrogen-free catalytic fractionation of woody biomass // *ChemSusChem*. 2016. Vol. 9, no. 23. P. 3280–3287. <https://doi.org/10.1002/cssc.201600648>.
11. Parsell T., Yohe S., Degenstein J., Jarrell T., Klein I., Gencer E., et al. A synergistic biorefinery based on catalytic conversion of lignin prior to cellulose starting from lignocellulosic biomass // *Green Chemistry*. 2015. Vol. 17, no. 3. P. 1492–1499. <https://doi.org/10.1039/C4GC01911C>.
12. Sannigrahi P., Ragauskas A. J. Characterization of fermentation residues from the production of bio-ethanol from lignocellulosic feedstocks // *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 2011. Vol. 5, no. 4. P. 514–519. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2011.1170>.
13. Kleinert M., Barth T. Towards a lignocellulosic biorefinery: direct one-step conversion of lignin to hydrogen-enriched bio-fuel // *Energy & Fuels*. 2008. Vol. 22, no. 2. P. 1371–1379. <https://doi.org/10.1021/ef700631w>.
14. Wang Y., Wang H., Lin H., Zheng Y., Zhao J., Pelletier A., et al. Effects of solvents and catalysts in liquefaction of pinewood sawdust for the production of bio-oils // *Biomass and Bioenergy*. 2013. Vol. 59. P. 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.022>.
15. Sangon S., Ratanavaraha S., Ngamprasert-sith S., Prasassarakich P. Coal liquefaction using supercritical toluene-tetralin mixture in a semi-continuous reactor // *Fuel Processing Technology*. 2006. Vol. 87, no. 3. P. 201–207. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2005.07.007>.
16. Koriakin A., Nguyen H. V., Kim D.-W., Lee C.-H. Thermochemical decomposition of microcrystalline cellulose using sub- and supercritical tetralin and decalin with Fe₃O₄ // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2015. Vol. 54, no. 18. P. 5184–5194. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b00763>.
17. Kundu R., Ramsurn H. Kinetic study of non-catalytic dissolution of cellulose biochar in hydrogen donor solvent // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020. Vol. 8, no. 31. P. 11606–11617. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c02907>.
18. Koriakin A., Moon S., Kim D.-W., Lee C.-H. Liquefaction of oil palm empty fruit bunch using sub- and supercritical tetralin, *n*-dodecane, and their mixture // *Fuel*. 2017. Vol. 208. P. 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.010>.
19. Kim D.-W., Lee C.-H. Efficient conversion of extra-heavy oil into distillates using tetralin/activated carbon in a continuous reactor at elevated temperatures // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2019. Vol. 140. P. 245–254. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2019.04.001>.
20. Фомина Е. С., Евстафьев С. Н. Сравнительный анализ состава низкомолекулярных продуктов сверхкритической экстракции соломы пшеницы этанолом и диметилкарбонатом // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2018. Т. 8. N 2. С. 9–18. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-2-9-18>.

REFERENCES

1. Kajimoto O. Solvation in supercritical fluids: its effects on energy transfer and chemical reactions. *Chemical Reviews*. 1999;99(2):355-390. <https://doi.org/10.1021/cr970031l>.

2. Sun Y., Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Biore-source Technology*. 2002;83(1):1-11. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00212-7](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00212-7).
3. Evstaf'ev S. N., Chechikova E. V. Transformations of wheat straw polysaccharides in dynamic conditions of subcritical autohydrolysis. *Khimija rastitel'nogo syr'ja = Chemistry of plant raw material*. 2015;1:41-49. (In Russian). <https://doi.org/10.14258/jcprm.201501426>.
4. Perkins G., Batalha N., Kumar A., Bhaskar T., Konarova M. Recent advances in liquefaction technologies for production of liquid hydrocarbon fuels from biomass and carbonaceous wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;115:109400. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109400>.
5. de Caprariis B., De Filippis P., Petruccio A., Scarsella M. Hydrothermal liquefaction of biomass: influence of temperature and biomass composition on the bio-oil production. *Fuel*. 2017;208:618-625. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.054>.
6. Hewetson B. B., Zhang X., Mosier N. S. Enhanced acid-catalyzed biomass conversion to hydroxymethylfurfural following cellulose solvent-and organic solvent-based lignocellulosic fractionation pretreatment. *Energy & Fuels*. 2016;30:9975-9977. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01910>.
7. Ma P., Gao Y., Zhai H. Fractionated wheat straw lignin and its application as antioxidant. *Bio-Resources*. 2013;8(4):5581-5595. <https://doi.org/10.15376/biores.8.4.5581-5595>.
8. Chesi C., de Castro I. B. D., Clough M. T., Ferrini P., Rinaldi R. The influence of hemicellulose sugars on product distribution of early-stage conversion of lignin oligomers catalysed by Raney nickel. *ChemCatChem*. 2016;8(12):2079-2088. <https://doi.org/10.1002/cctc.201600235>.
9. Schutyser W., Van den Bosch S., Renders T., De Boe T., Koelewijn S.-F., Dewaele A., et al. Influence of bio-based solvents on the catalytic reductive fractionation of birch wood. *Green Chemistry*. 2015;17(11):5035-5045. <https://doi.org/10.1039/c5gc01442e>.
10. Galkin M. V., Smit A. T., Subbotina E., Artemenkon K. A., Bergquist J., Huijgen W. J. J., et al. Hydrogen-free catalytic fractionation of woody biomass. *ChemSusChem*. 2016;9(23):3280-3287. <https://doi.org/10.1002/cssc.201600648>.
11. Parsell T., Yohe S., Degenstein J., Jarrell T., Klein I., Gencer E., et al. A synergistic biorefinery based on catalytic conversion of lignin prior to cellulose starting from lignocellulosic biomass. *Green Chemistry*. 2015;17(3):1492-1499. <https://doi.org/10.1039/C4GC01911C>.
12. Sannigrahi P., Ragauskas A. J. Characterization of fermentation residues from the production of bio-ethanol from lignocellulosic feedstocks. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 2011;5(4):514-519. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2011.1170>.
13. Kleinert M., Barth T. Towards a lignocellulosic biorefinery: direct one-step conversion of lignin to hydrogen-enriched bio-fuel. *Energy & Fuels*. 2008;22(2):1371-1379. <https://doi.org/10.1021/ef700631w>.
14. Wang Y., Wang H., Lin H., Zheng Y., Zhao J., Pelletier A., et al. Effects of solvents and catalysts in liquefaction of pinewood sawdust for the production of bio-oils. *Biomass and Bioenergy*. 2013;59:158-167. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.022>.
15. Sangon S., Ratanavaraha S., Ngamprasert-sith S., Prasassarakich P. Coal liquefaction using supercritical toluene-tetralin mixture in a semi-continuous reactor. *Fuel Processing Technology*. 2006;87(3):201-207. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2005.07.007>.
16. Koriakin A., Nguyen H. V., Kim D.-W., Lee C.-H. Thermochemical decomposition of microcrystalline cellulose using sub- and supercritical tetralin and decalin with Fe₃O₄. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2015;54(18):5184-5194. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b00763>.
17. Kundu R., Ramsurn H. Kinetic study of non-catalytic dissolution of cellulose biochar in hydrogen donor solvent. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020;8(31):11606-11617. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c02907>.
18. Koriakin A., Moon S., Kim D.-W., Lee C.-H. Liquefaction of oil palm empty fruit bunch using sub- and supercritical tetralin, *n*-dodecane, and their mixture. *Fuel*. 2017;208:184-192. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.010>.
19. Kim D.-W., Lee C.-H. Efficient conversion of extra-heavy oil into distillates using tetralin/activated carbon in a continuous reactor at elevated temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2019;140:245-254. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2019.04.001>.
20. Fomina E. S., Evstaf'ev S. N. A comparative study of low-molecular-weight products extracted from wheat straw using ethanol and dimethyl carbonate. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2018;8(2):9-18. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-2-9-18>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

С. Н. Евстафьев,
д.х.н., профессор, заведующий кафедрой
химии и пищевой технологии,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergei N. Evstaf'ev,
Dr. Sci. (Chemistry), Professor,
Head of the Laboratory of Food Technology,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
esn@istu.edu

esn@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-3681-9478>

Е. С. Фомина,
к.х.н., доцент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
lenafomina1982@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0307-3382>

Н. П. Тигунцева,
к.х.н., доцент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
tignadezhda@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5348-5345>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

*Поступила в редакцию 10.06.2021.
Одобрена после рецензирования 15.02.2022.
Принята к публикации 28.02.2022.*

<https://orcid.org/0000-0002-3681-9478>

Elena S. Fomina,
Cand. Sci. (Chemistry),
Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
lenafomina1982@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0307-3382>

Nadezhda P. Tiguntceva,
Cand. Sci. (Chemistry),
Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
tignadezhda@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5348-5345>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

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

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

Information about the article

*The article was submitted 10.06.2021.
Approved after reviewing 15.02.2022.
Accepted for publication 28.02.2022.*