

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.040.262

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-124-132>

Термолизная переработка отходов гидролизного производства

© С.В. Гунич*, Е.В. Янчуковская**

* АО «Инновационно-технологические системы», г. Москва, Российская Федерация

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

Резюме: Одна из актуальных задач рационального природопользования – решение проблемы утилизации крупнотоннажных промышленных отходов. Накопленные отходы занимают значительные площади земли и выступают источником загрязнения окружающей среды, вследствие чего ухудшаются условия жизни человека. Количество некоторых углеродсодержащих отходов столь велико, что их рассматривают как вторичные техногенные сырьевые ресурсы. В частности, лигнин как составная часть древесины, в больших количествах скапливающийся в отвалах целлюлозно-бумажных и гидролизных предприятий, может быть использован для получения широкого спектра продуктов – от ароматических альдегидов, спиртов до минеральных удобрений и кормовых добавок. Однако ввиду своей высокой устойчивости к микробиологическому разложению и способности к самовозгоранию (в сухом виде) лигнин является наиболее трудноутилизируемым остаточным продуктом. Недостатком существующих технологий его переработки является невозможность переработки больших объемов, а также удаленность перерабатывающих предприятий от мест хранения. В настоящей статье рассматривается возможность разложения лигнина на pilotной установке СВЧ-термолиза с целью его утилизации и получения целевых продуктов. Использование СВЧ-излучения сокращает время разложения лигнина по сравнению с традиционным способом, уменьшает объем утилизируемого вещества, обезвреживает и очищает его от патогенных микроорганизмов. Установка входит в состав действующего мусороперерабатывающего завода (г. Томбов). По результатам исследования определены технологические параметры процесса, представлен усредненный оценочный выход продуктов термолиза. Получаемый углеродный остаток может быть использован, например, для производства катализаторов и углеродных сорбентов, жидкая фракция – легкогорючих топливных фракций. Действующая система газоочистки делает процесс экологически безопасным.

Ключевые слова: гидролизное производство, переработка лигнина, опытная установка, термолиз, экологическая безопасность, целевые продукты

Информация о статье: Дата поступления 12 марта 2019 г.; дата принятия к печати 25 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2020 г.

Для цитирования: Гунич С.В., Янчуковская Е.В. Термолизная переработка отходов гидролизного производства // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. N 1. С. 124–132. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-124-132>

Thermolysis waste processing in hydrolysis production

Sergei V. Gunich*, Elena V. Yanchukovskaya**

* Society "Innovative technological systems", Moscow, Russian Federation

** Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: One of the urgent tasks of rational environmental management concerns the recycling of large-tonnages of industrial waste. Occupying significant landfill areas, accumulated waste acts as a source of environmental pollution, resulting in a decline in human living conditions. The great quantity of some carbon-

containing wastes leads to their consideration as secondary technogenic raw material resources. In particular, since comprising an integral part of the structure of wood and accumulating in large quantities in the wastes of paper pulp and hydrolysis plants, lignin potentially forms a promising basis for producing a wide range of products, including aromatic aldehydes, alcohols, mineral fertilisers and feed additives. However, due to its high resistance to microbiological decomposition and propensity to spontaneous combustion (in dry form), the utilisation of lignin for such purposes presents certain difficulties. Additional limitations affecting existing technologies for lignin processing include the inability to efficiently process large volumes, as well as the remoteness of processing enterprises from storage sites. In the present article, the decomposition of lignin in a microwave thermolysis pilot plant comprising part of an existing waste recycling plant (Tombov, Russia) is investigated in connection with its disposal and extraction of target products. Under the applied microwave radiation, the decomposition time of lignin is reduced in comparison with the traditional method. This is combined with a decrease in volume of utilised substance complemented by its neutralisation and cleaning of pathogenic microorganisms. Based on the results of the study, the technological parameters of the process are determined and the average estimated yield of thermolysis products is provided. The resulting carbon residue can be applied in the production of catalysts and carbon sorbents, while the liquid component can be used as a raw material for low-combustible fuel fractions. The existing gas cleaning system makes the process more environmentally friendly.

Keywords: hydrolysis production, lignin processing, pilot plant, thermolysis, environmental safety, target products

Information about the article: Received March 12, 2019; accepted for publication February 25, 2020; available online March 31, 2020.

For citation: Gunich SV, Yanchukovskaya EV. Thermolysis waste processing in hydrolysis production. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2020;10(1):124–132. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-124-132>

ВВЕДЕНИЕ

В Иркутской области, являющейся лидером среди регионов России по объемам лесозаготовок, накоплено немало отходов переработки древесины. Среди них – гидролизный лигнин, полимер, составная часть стенок клеток растений. Около городов Зима, Тулун и Усть-Кут скопилось около 3 млн т подобных отходов, оставшихся после ликвидации гидролизных заводов. К этому количеству необходимо прибавить отходы Бирюсинского гидролизного завода, а также 6,2 млн т шлам-лигнина, накопленного за годы работы Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. Одной из проблем, связанных с хранением лигнина в отвалах, является его высокая горючесть.

Вопросам использования лигнина с максимальной эффективностью и минимальными затратами посвящен ряд работ [1–4]. Один из вариантов – переработка лигнина в органическое удобрение. Однако данный способ не позволяет перерабатывать большие объемы. Альтернативой может послужить термолизная утилизация отходов гидролизного производства с целью выработки газообразных, жидких и твердых продуктов [5–7].

Целью данного исследования являлось выявление возможности переработки гидролизного лигнина на установке СВЧ-термолиза, предназначенной для утилизации широкого спектра отходов II-V классов опасности [8], получение образцов продуктов термолиза и анализ их физико-химических свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

По заказу ОАО «Восточно-Сибирский комбинат биотехнологий» на опытно-полупромышленной (пилотной) установке термолиза твердых бытовых отходов «WUT-01» производительностью от 20 до 200 кг отходов в сутки в составе мусороперерабатывающего завода ООО «Комэк», г. Тамбов, были проведены исследования по определению технологических параметров процесса, количественного выхода продуктов термолизной переработки гидролизного лигнина, а также анализ их физико-химических свойств [9]. Установка предназначена для термической деструкции различных горючих твердых коммунальных (бытовых) отходов, биомассы, иловых осадков очистных сооружений сточных вод, древесно-растительных отходов, нефтешламов и др. [10].

Основной аппарат установки – реактор термолиза, представляет собой стальную сварную камеру прямоугольного сечения, выполненную из коррозионностойкой жаропрочной стали марки 20Х23Н18. Камера оборудована СВЧ-генератором, оснащена трубопроводами для подачи охлаждающей воды и водяного пара от парогенератора, соединенная газовым коллектором с системой фракционирования и возврата газообразных продуктов термолиза на горелки для сжигания отходов в камере сгорания.

В качестве сырья (объекта исследования) был отобран смешанный образец (объединенная проба) отходов из свалки лигнина бывшего предприятия ОАО «Тулунский гидролизный завод» (Иркутская область, г. Тулун).

Свойства поступившего на переработку сырья:

- влажность пробы отходов – 45–60 % масс.;
- плотность – 123 кг/м³;
- насыпная плотность в воздушно-сухом состоянии – около 200 кг/м³;
- температура сжигания – 750–850 °С;
- зольность – более 10 % масс.

Визуально отходы представляют собой перепревшие мелкодисперсные тонко измельченные древесные остатки различной крупности (преимущественно менее 5 мм) со слабо выраженным специфическим запахом дурно пахнущих газов (рис. 1).



Рис. 1. Образец исходного сырья для термолиза

Fig. 1. Thermolysis feed sample

Лигнин в количестве 20 кг загружали в реактор термолиза без предварительного измельчения и сушки. Процесс проводили до максимальной выработки газообразных летучих продуктов термообработки; скорость нагрева реактора составляла 200–300 °С/ч. Общее время цикла термолиза – 5–6 ч, в том числе: время нагрева до начала выделения летучих продуктов – 3–3,5 ч; период выделения летучих продуктов – 2–2,5 ч. Период охлаждения реактора – 12 ч. Диапазон рабочей температуры в реакционной камере – 750–850 °С. Давление в реакционной камере – атмосферное.

В интервале температур 120–300 °С наблюдалось активное образование водо-углеводородной эмульсии, направляемой в колонну фракционирования для конденсации при температуре 60–70 °С. Полученный конденсат представлял собой горючую вязкую жидкость бурого цвета с характерным запахом углеводородов и содержал выпаренную воду, частицы механических примесей исходного сырья и термолизных смол.

При высоких температурах исходное сырье без доступа воздуха разлагается на угольный остаток и горючий газ (смесь летучих углеводородов, окиси углерода, водорода и прочих газов),

выход и напор которого увеличивался с повышением температуры (рис. 2).



Рис. 2. Образец твердого остатка термолиза лигнина

Fig. 2. Lignin thermolysis solid residue sample

Остаток выгружали из печи при температурах выше температур самовоспламенения сажи (540 °С). Для безопасного обращения с углеродным веществом предусмотрена установка для сухого тушения, которое осуществляется циркулирующим воздухом, подаваемым газодувкой. В процессе продувки некоторая часть углерода сгорает, выделяя углекислый газ и водяные пары, которые вместе с потоком воздуха охлаждают нисходящий поток углеродных частиц до температуры 100–150 °С. Далее нагретые газы тушения проходят стадии обеспыливания в циклоне и мокрого пылеулавливания в скруббере. Теплота, принимаемая газами тушения, может утилизироваться в градирне либо в экономайзере (при наличии потребителя тепловой энергии). Образующиеся при тушении углерода стоки подаются на тонкослойный отстойник, где осветляются, а отстаиваемая часть (преимущественно мелкодисперсные частицы сажи и углеродного вещества) выводится на конвейер к основному потоку.

Получаемое углеродное вещество после стадии тушения направляется на установку гранулирования, объединенную с упаковочной машиной. Поскольку данное вещество имеет сравнительно низкую насыпную плотность и склонно к пылеобразованию, применяется его формование в pellets (цилиндрические гранулы диаметром 8 мм и длиной 20 мм) с последующей упаковкой в мешки-«бигбэги».

Чтобы разделить газообразные продукты термолиза на конденсируемую и неконденсируемую фракции, необходимо охлаждение газового потока. При этом допустим непосредственный контакт между горячим газовым потоком и теплоносителем (промывной водой). Процесс реализуется в насадочном скруббере, куда подается промывная вода и газы термолиза по противоточной схеме. Сконденсированная широкая

фракция углеводов направляется через отпарную колонну в приемную емкость.

Несконденсированные газы (так называемый синтез-газ) представляют собой смесь окиси углерода (CO), молекулярного водорода (H₂), диоксида углерода (CO₂), метана (CH₄), паров воды и некоторых органических соединений [11].

Синтез-газ откачивается из скруббера, подвергается осушке в адсорбере, заполненном силикагелем, очищается и направляется на дожигание в камеру сгорания реактора термолиза к горелке как вторичное газовое топливо (рис. 3).



Рис. 3. Горение синтез-газа, образующегося в процессе термолиза

Fig. 3. Combustion of synthesis gas generated during thermolysis

В результате этого часть вредных и токсичных компонентов, содержащихся в нем, окисляется, сгорает и выделяется в виде дымовых газов, что и обуславливает необходимость применения газоочистки.

Продукты сгорания топлива в реакторе термолиза (дымовые газы) откачиваются дымососом в систему газоочистки, где последовательно проходят стадию каталитической очистки в адсорбере и стадию мокрой очистки в газопромывателях. В качестве катализатора используется муллитокремнеземистое волокно с активированным углем и частицами оксида меди [12].

На данной стадии из потока дымовых газов улавливаются полиароматические и хлорорганические загрязняющие вещества (сажа, бензапирены, фураны, диоксиноподобные вещества). Для мокрой очистки дымовых газов используется 10%-й водный раствор карбамида, щелочи и гашеной извести (известкового молока), в результате чего газы очищаются от оксидов серы, азота, углерода. Очищенные и охлажденные дымовые

газы по вентиляционному каналу выбрасываются в атмосферу [13].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Было проведено 6 экспериментов термолизной переработки лигнина с одинаковой массой загрузки, их результаты представлены в табл. 1.

Исследованы следующие технологические операции термолизной переработки исходного сырья:

- загрузка образца отходов в установку массой 20 кг;
- запуск и выход на рабочий режим (разогрев реактора до 800 °С;
- выпаривание содержащейся влаги (дренаж влаги в емкости через спускную арматуру установки);
- термолизная деструкция отходов;
- выработка жидких продуктов термолиза (жидкая текучая эмульсия), пригодных для разделения, перегонки, экстракции и иных методов фракционирования на водную фазу и фазу легкогорючих жидких топливных фракций;
- выработка горючего синтез-газа, используемого в качестве вторичного топлива для обогрева реактора в автотермическом режиме;
- выработка твердых продуктов (твердый угольный остаток), гранулируемых в пеллеты.

Для определения потребительских свойств угольного остатка изучили его элементный состав (углерод, водород, азот, сера, кислород) на мультиэлементном CHNS/O анализаторе Thermo Flash методом пиролиза с газо-хроматографическим анализом и на энергодисперсионном детекторе SSD X-Max (в комплекте с СЭМ JEOL 6510LV) энергодисперсионным рентгенофлуоресцентным методом. Результаты представлены в табл. 2 и 3.

Углерод определяет способность вещества выделять тепло при горении в присутствии воздуха или чистого кислорода.

Среднее содержание углерода в образцах составляет 69–73 % масс. Разброс значений обусловлен, вероятно, неоднородностью проб. Одним из возможных объяснений меньшего содержания углерода в пробах может быть наличие в них некоторого количества минеральных частиц, содержащих кальций, калий и другие элементы.

Количество азота также важно для термохимической переработки вещества. Его некоторое повышение в угольном остатке связано, возможно, с наличием определенных компонентов в гидролизном сырье.

Сера является вредной примесью: в случае сжигания угольного остатка могут образовываться летучие сернистые соединения, загрязняющие атмосферу. Вместе с тем содержание серы, согласно данным табл. 2 и 3, изменяется от 0,3 до 0,5 % масс., что сопоставимо с содержанием ее в малосернистых углях.

Таблица 1

Результаты экспериментов термолиза

Table 1

Thermolysis experiment results

Усредненный оценочный выход продуктов термолиза, % от исходной массы в сухом виде			
Жидкие продукты	Газообразные продукты	Твердый угольный остаток	Непрореагировавшее исходное сырье (потери в разгрузочном патрубке и трубах)
21	48	29	2
Итого: 100			

Таблица 2

Содержание легких (биогенных) элементов в угольном остатке по данным энергодисперсионного анализа, % масс.

Table 2

Content of light (biogenic) elements in the coal residue according to energy dispersive analysis, % mass.

Элемент	Проба			Среднее
	1	2	3	
Углерод	75,30	67,30	76,70	73,10
Азот	—	13,00	—	13,00
Сера	0,45	0,31	—	0,38
Кислород	12,52	10,07	12,00	11,53
Общее содержание	88,27	90,68	88,70	—
Среднее по трем пробам	89,22			—

Таблица 3

Содержание легких (биогенных) элементов в угольном остатке по данным пиролиза, % масс.

Table 3

Content of light (biogenic) elements in the coal residue according to pyrolysis, % mass.

Элемент	Проба			Среднее
	1	2	3	
Водород	3,64	5,03	4,02	4,23
Углерод	67,38	70,65	69,51	69,18
Азот	5,05	7,40	7,71	6,72
Сера	0,53	0,51	0,44	0,49
Кислород	11,05	8,56	10,11	9,91
Общее содержание	87,65	92,15	91,79	—
Среднее по трем пробам	90,53			—

Энергодисперсионным анализом в образцах угольного остатка определили содержание галогенов (F, Cl, Br, I), основных металлов (Mg, Na, Al, Ca, K, Fe), иных элементов (Zn, Cu, Ba, P, Si), тяжелых металлов, таких как Pb, Cd, Hg.

В различных образцах отмечено содержание, % масс.: фосфора – до 0,2; бария – меньше 0,3; кремния – до 0,9. Общее содержание металлов в угольном остатке – до 6 % масс. Галогены также содержатся в небольших количествах.

Присутствие таких токсичных элементов, как свинец, кадмий, ртуть, выявлено в незначительных количествах. Например, ртути – до 0,1 % масс (в различных сортах угля содержание ртути колеблется от 0,09 до 0,39 % масс.).

Результаты сравнительного анализа показателей послереакционной плотности (одна из

основных характеристик металлургического кокса, определяющая его восстановительную способность в пирометаллургических процессах) угольного остатка и кокса каменноугольного показаны в табл. 4.

Качественное и количественное определение компонентного состава синтез-газа осуществляли методом газовой хроматографии с детектированием по теплопроводности на 4-х канальном газовом хроматографе Varian CP-4900 (США), с пламенно-ионизационным детектированием на хроматографе Varian 3800 (США), с масс-спектрометрическим детектированием на хроматографе Varian 3800 (США). Для обработки хроматографических данных применялось программное обеспечение Varian (США). Результаты итогового анализа представлены в табл. 5.

Таблица 4

Показатели послереакционной плотности угольного остатка и кокса

Table 4

Post-reaction density indicators of the coal residue and coke

Опыт	Послереакционная плотность угольного остатка и кокса CSR, %, по ASTM D 5341–93a		
	Опытный образец угольного остатка, крупность 3–5 мм	Кокс металлургический крупностью, мм,	
		60–80	40–60
1	47,9	51,3	56,1
2	45,2	52,8	58,3
3	46,3	52,5	58,0
4	47,8	51,9	57,5
5	46,8	52,0	57,7
Среднее	46,8	52,1	57,5
Ошибка, %	9,6	11,3	7,9

Таблица 5

Содержание компонентов синтез-газа

Table 5

Composition of the synthesis gas

Компонент	Формула	Содержание, % об.
Водород	H ₂	40,920
Моноксид углерода	CO	035,70
Диоксид углерода	CO ₂	0,030
Метан	CH ₄	0,006
Этан	C ₂ H ₆	0,002
Этилен	C ₂ H ₄	0,002
Воздух	O ₂ +N ₂ (~21/78)	23,290

Установлено, что в составе синтез-газа не содержатся летучие органические соединения с молекулярной массой в диапазоне 33–500. Преимущественными компонентами синтез-газа являются моноксид углерода и водород, присутствие которых и определяет его тепло-творную способность. Наличие воздуха в синтез-газе обусловлено, вероятно, попаданием воздушного потока в объект исследования при пробоотборе.

После разгонки органического слоя жидкой текучей эмульсии был проведен анализ полученных фракций на групповой состав при температурах <120 °C и >120 °C (до 210 °C). Групповой состав фракции в интервале температур 120–210 °C представлен в табл. 6.

Таблица 6

Групповой состав фракции 120–210 °C

Table 6

Group composition of the fraction 120–210 °C

Класс соединений	Содержание, % масс.
Ароматические соединения	60,23
Олефины	21,54
Парафины	6,83
Соединения, которые не удалось определить	8,70

Содержание серы в полученных после разгонки фракциях анализировали на энергодисперсионном анализаторе серы АСЭ-1 (табл. 7).

Таблица 7

Содержание серы во фракциях

Table 7

Sulfur content in fractions

Фракция, °C	Содержание серы, % масс.
<120	0,15
120–210	0,25

ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты показали, что технология термолизной переработки, реализованная в масштабе пилотной установки «WUT-01», позволяет утилизировать промышленные отходы гидролизного производства с получением целевых продуктов – синтез-газа, жидких углеводородных фракций, угольных пеллет.

Масса и объем исходного сырья сокращаются в 4–5 раз в зависимости от его состава и технологических особенностей процесса. Применяемая переработка лигнина в отличие от традиционного способа нагрева уменьшает время его разложения (в зависимости от влажности исходного материала) до 5–6 ч.

Как показал теплотехнический анализ проб, полученный в процессе термолиза угольный остаток (в зависимости от содержания минеральных примесей в исходном лигнине) по теплоте сгорания (25–30 МДж/кг) аналогичен топливу RDF и каменноугольному полукоксу [14]. Показатель послереакционной плотности угольного остатка соответствует значениям данного показателя металлургического кокса.

При дальнейших исследованиях свойств жидких фракций и угольного остатка можно будет давать рекомендации по их практическому применению [15, 16].

Использование вырабатываемого газообразного топлива для нагрева реактора термо-

лиза позволяет экономить общие эксплуатационные затраты процесса термической переработки отходов.

Благодаря наличию системы газоочистки рассматриваемый процесс является технически надежным и экологически безопасным.

Выполнен расчет количества теплоты, необходимого для передачи в единицу времени объему вещества в реакторе; установлена согласованность параметров СВЧ-излучения (частота, тип волны) с физико-химическими характеристи-

ками лигнина (проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемость, однородность), целью которой является достижение полного поглощения излучения при его равномерном распределении по объему реакционной зоны.

Таким образом, результаты проведенного исследования позволяют приступить к разработке технологии термолизной переработки гидролизного лигнина и проектированию специальных многокамерных модульных реакторов непрерывного действия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Huang Y.-F., Chiueh P.-T., Kuan W.-H., Lo S.-L. Effects of lignocellulosic composition and microwave power level on the gaseous product of microwave pyrolysis // *Energy*. 2015. Vol. 89. P. 974–981. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.035>

2. Lo S.-L., Huang Y.-F., Chiueh P.-T., Kuan W.-H. Microwave Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. P. 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.277>

3. Morgan H.M.Jr., Bu Q., Liang J., Liu Y., Mao H., Shi A., et al. A review of catalytic microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass for value-added fuel and chemicals // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 230. P. 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.059>

4. Liu Q., Wang S., Zheng Y., Luo Z., Cen K. Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG-FTIR analysis // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2008. Vol. 82. Issue 1. P. 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.03.007>

5. Garcia-Nunez J.A., Pelaez-Samaniego M.R., Garcia-Perez M.E., Fonts I., Abrego J., Westerhof R.J.M., et al. Historical developments of pyrolysis reactors: a review // *Energy and Fuels*. 2017. Vol. 31. Issue 6. P. 5751–5775. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00641>

6. Huang Y.-F., Chiueh P.-T., Kuan W.-H., Lo S.-L. Product distribution and heating performance of lignocellulosic biomass pyrolysis using microwave heating // *Energy Procedia*. 2018. Vol. 152. P. 910–915. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.092>

7. Gauthier G., Melkior T., Grateau M., Thiery S., Sylvain S. Pyrolysis of centimetre-scale wood particles: New experimental developments and results // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013. Vol. 104. P. 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.05.017>

8. Chen P., Xie Q., Addy M., Zhou W., Liu Y., Wang Y., et al. Utilization of municipal solid and liquid wastes for bioenergy and bioproducts production // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 215. P. 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.094>

9. Пат. № 2013126238А, Российская Федерация. Способ переработки бытовых и производ-

ственных отходов в печное топливо и углеродное вещество и устройство для его осуществления / С.В. Гунич, Т.И. Малышева; заявитель и патентообладатель С.В. Гунич, Т.И. Малышева; заявл. 10.06.2013; опубл. 20.12.2014. Бюл. № 35.

10. Гунич С.В., Янчуковская Е.В., Днепровская Н.И. Анализ современных методов переработки твердых бытовых отходов // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2015. N 2 (13). С. 110–115.

11. Гунич С.В., Янчуковская Е.В. Анализ процессов пиролиза отходов производства и потребления // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2016. N 1 (16). С. 86–93.

12. Гунич С.В., Янчуковская Е.В., Днепровская Н.И. Переработка илового осадка очистных сооружений // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2017. Т. 7. N 1. С. 183–188. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-1-183-187>

13. Гунич С.В., Янчуковская Е.В. Очистка продуктов сгорания топлива установки переработки твердых бытовых отходов // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2018. Т. 8. N 1. С. 92–98. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-1-92-98>

14. Beneroso D., Arenillas A., Montes-Moran M.A., Bermudez J.M., Mortier N., Verstichel S., et al. Ecotoxicity tests on solid residues from microwave induced pyrolysis of different organic residues: An addendum // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016. Vol. 121. P. 329–332. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.08.013>

15. Burhenne L., Messmer J., Aicher T., Laborie M.-P. The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013. Vol. 101. P. 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.01.012>

16. Correa C.R., Hehr T., Voglhuber-Slavinsky A., Rauscher Y., Kruse A. Pyrolysis vs. hydrothermal carbonization: Understanding the effect of biomass structural components and inorganic compounds on the char properties // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2019. Vol. 140. P. 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.03.007>

REFERENCES

1. Huang Y-F, Chiueh P-T, Kuan W-H, Lo S-L. Effects of lignocellulosic composition and microwave power level on the gaseous product of microwave pyroly-

sis. *Energy*. 2015;89:974–981. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.035>

2. Lo S-L, Huang Y-F, Chiueh P-T, Kuan W-H.

Microwave Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Energy Procedia*. 2017;105:41–46. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.277>

3. Morgan HMJr, Bu Q, Liang J, Liu Y, Mao H, Shi A, et al. A review of catalytic microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass for value-added fuel and chemicals. *Bioresource Technology*. 2017;230: 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.059>

4. Liu Q, Wang S, Zheng Y, Luo Z, Cen K. Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG-FTIR analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2008;82(1):170–177. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.03.007>

5. Garcia-Nunez JA, Pelaez-Samaniego MR, Garcia-Perez ME, Fonts I, Abrego J, Westerhof RJM, et al. Historical developments of pyrolysis reactors: a review. *Energy and Fuels*. 2017;31(6): 5751–5775. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00641>

6. Huang Y-F, Chiueh P-T, Kuan W-H, Lo S-L. Product distribution and heating performance of lignocellulosic biomass pyrolysis using microwave heating. *Energy Procedia*. 2018;152:910–915. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.092>

7. Gauthier G, Melkior T, Grateau M, Thiery S, Sylvain S. Pyrolysis of centimetre-scale wood particles: New experimental developments and results. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013;104:521–530. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.05.017>

8. Chen P, Xie Q, Addy M, Zhou W, Liu Y, Wang Y, et al. Utilization of municipal solid and liquid wastes for bioenergy and bioproducts production. *Bioresource Technology*. 2016;215:163–172. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.094>

9. Gunich SV, Malysheva TI. *Method for processing of domestic and productive wastes in the stove fuel and carbon substance and device for its realization*. Patent RF, no. 2013126238A; 2014. (In Russian)

10. Gunich SV, Yanchukovskaya EV, Dneprovskaya NI. Analysis of modern methods of hard domestic wastes processing. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2015;2:110–115. (In Russian)

11. Gunich SV, Yanchukovskaya EV. Analysis of processes of pyrolysis of wastes of production and consumption. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2016;1:86–93. (In Russian)

12. Gunich SV, Yanchukovskaya EV, Dneprovskaya NN. Processing of sludge treatment facilities. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2017;7(1): 183–187. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-1-183-187>

13. Gunich SV, Yanchukovskaya EV. Cleaning of fuel combustion products in a solid domestic waste treatment plant. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2018;8(1):92–98. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-1-92-98>

14. Beneroso D, Arenillas A, Montes-Moran MA, Bermudez JM, Mortier N, Verstichel S, et al. Ecotoxicity tests on solid residues from microwave induced pyrolysis of different organic residues: An addendum. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016;121:329–332. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.08.013>

15. Burhenne L, Messmer J, Aicher T, Laborie M-P. The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013;101:177–184. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.01.012>

16. Correa CR, Hehr T, Voglhuber-Slavinsky A, Rauscher Y, Kruse A. Pyrolysis vs. hydrothermal carbonization: Understanding the effect of biomass structural components and inorganic compounds on the char properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2019;140:137–147. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.03.007>

Критерии авторства

Гунич С.В., Янчуковская Е.В. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Гунич С.В., Янчуковская Е.В. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contribution

Sergei V. Gunich, Elena V. Yanchukovskaya, carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Sergei V. Gunich, Elena V. Yanchukovskaya 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.

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

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Гунич Сергей Васильевич,
генеральный директор,
АО «Инновационно-технологические системы»,
107140, г. Москва,
ул. Верхняя Красносельская, 9,
Российская Федерация,
✉ e-mail: e.t.systems@mail.ru

Янчуковская Елена Владимировна,
к.т.н., доцент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: lenyan@istu.edu

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergei V. Gunich,
Director General,
Society «Innovative technological systems»,
9 Verkhnyaya Krasnoselskaya St.,
Moscow 107140, Russian Federation,
✉ e-mail: e.t.systems@mail.ru

Elena V. Yanchukovskaya,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University 83,
Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
e-mail: lenyan@istu.edu