



Утилизация отходов и биодegradация отходов

УДК 544.473:547.322

DOI: 10.25514/CHS.2020.2.18017

Получение углеродсодержащих сорбентов в качестве альтернативного способа переработки лигнин-содержащих отходов***М. И. Минич¹✉, А. А. Спицын²***

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vampiresuperman@gmail.com

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию: 30.09.2020 г., после доработки: 18.12.2020 г., принята в печать: 21.12.2020 г.

Аннотация – В работе предложена методика получения углеродных сорбентов из лигнин-содержащих отходов путем карбонизации лигнин-содержащего сырья с последующей паровой активацией. Стадия карбонизации выполнялась при температуре 700°C на стендовой установке пиролиза. Активация полученного углеродного материала проводилась водяным паром при температуре 970°C при различной продолжительности, причем оптимальным было время активации – 60 мин, которое обеспечило высокую сорбционную активность продукта. Результаты исследований сорбционной активности по йоду полученных сорбентов показали, что приготовленные образцы имели высокие показатели (максимальная сорбционная активность по йоду ~82%), не уступая известным промышленным аналогам, получаемым из древесного сырья. Таким образом, предлагаемый метод представляет собой альтернативу сжиганию и является перспективным способом утилизации лигнин-содержащих отходов с одновременным получением эффективных сорбентов, которые могут применяться для очистки жидких сред от загрязнителей.

Ключевые слова: лигнин-содержащие отходы, карбонизация, пиролиз, паровая активация, углеродный сорбент, сорбционная активность, очистка жидких сред.

Utilization and biodegradation of wastes

UDC 544.473:547.322

DOI: 10.25514/CHS.2020.2.18017

Production of carbon-based sorbents as an alternative method for utilization of lignin containing waste***Maria I. Minich¹✉, and Andrey A. Spitsyn²***

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: vampiresuperman@gmail.com

²Saint-Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg, Russia

Received: September 30, 2020, Revised: December 18, 2020, Accepted: December 21, 2020

Abstract – The paper proposes a method for obtaining carbon sorbents from lignin-containing waste by carbonization of lignin-containing raw materials followed by vapor activation. The carbonization step is carried out at a temperature of 700°C using a bench pyrolysis unit. The obtained carbon material is activated with water vapor at a temperature of 970°C for various durations, and the optimal activation time is found to be 60 min, which provides a high sorption activity of the product. The results of studying sorption activity with respect to iodine of the obtained sorbents have shown that the samples are characterized by high values of sorption activity (maximum sorption activity with respect to iodine is ~82%), which is competitive with the known industrial analogs obtained from wood raw materials. Thus, the proposed procedure can be considered as an alternative to the waste incineration and has proved to be a promising way for disposal of lignin-containing waste with simultaneous production of effective sorbents that can be further used for treatment of contaminated liquid media from pollutants.

Keywords: lignin containing waste, carbonization, pyrolysis, vapor activation, carbon sorbent, sorption activity, treatment of liquid media

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из важнейших проблем мирового масштаба является утилизация лигнин-содержащих отходов, которые в большом количестве образуются на предприятиях лесохимического комплекса в результате переработки древесины [1, 2]. Так, в России на лесопромышленных комплексах и деревоперерабатывающих комбинатах ежегодно образуется свыше 200 млн м³ отходов древесины [3].

Классическими способами утилизации твердых отходов являются [4]:

- захоронение;
- термическая обработка (сжигание и плазменная обработка);
- компостирование;
- брикетирование.

Наиболее часто применяемым способом утилизации отходов крупнотоннажных производств является сжигание, однако это способ имеет существенный недостаток – большой выброс вредных веществ, негативно влияющий на состояние окружающей среды и здоровье человека. В данной статье рассмотрен альтернативный способ утилизации – не только более безопасный, но и ведущий к получению продуктов с высокой добавочной стоимостью [5], то есть сорбционных материалов.

Исследования гидролизного лигнина – отхода гидролизной промышленности, который представляет собой разветвленный трехмерный полимер, содержащий фенилпропановые структуры, а также остатки полисахаридов – показали потенциальную возможность его использования в различных сферах [6, 7].

Лигнин, в том числе гидролизный может использоваться для получения жидкого топлива, биоводорода, ароматических мономеров [8, 9], биоугля [9], продуктов биотехнологии [10].

Показана возможность использования гидролизного лигнина в строительной промышленности в производстве блоков для стен [11], в качестве модификатора для получения композиционных связующих в дорожном

строительстве [12], активированный гидролизный лигнин был применен в качестве катодного материала для литиевого источника тока [13].

Наиболее крупномасштабное направление использования технических лигнинов – это синтез углеродных сорбентов [14, 15]. Так, например, известно использование гидролизного лигнина в качестве сырья для производства сорбентов: из гидролизного лигнина получают препарат Полифепан (РФ), который является природным энтеросорбентом [16]. Также получают сорбенты на основе активированного угля и лигнина [17], лигнин и целлолигнин используют для получения гранулированных активных углей [18, 19].

Целью данного исследования является разработка метода получения углеродсодержащих сорбентов из лигнин-содержащих отходов производства микрокристаллической целлюлозы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Исходным сырьем являлись отходы получения микрокристаллической целлюлозы на лабораторной установке, хотя предлагаемый метод переработки отходов является универсальным и подходит для любого лигнин-содержащего сырья.

Средняя влажность используемого в работе образца лигнин-содержащего сырья составила 9,93%, средняя зольность – 0,3%.

Пиролиз лигнин-содержащих отходов

Пиролиз проводился на стендовой установке периодического действия, состоящей из: реактора с отводом парогазов, патрубками замера температур по центру объема реторты и выхода парогазов, конденсационной системы, градуированного приемника жидких продуктов, системы очистки неконденсируемых газов, нагревательного элемента.

Установка снабжена автоматизированной системой управления, наблюдения и сбора данных. Управление нагревом производится с помощью термоконтроллера. Регулирование подачи охлаждающей воды в конденсатор-холодильник и контроль работы дожигателя проводились в ручном режиме.

Система позволяет производить измерение температур в реакторе паропроводе, конденсационной системе, дожигателе, определять расход хладагента и выход жидких продуктов. Данные от показывающих преобразователей поступают на сервер SCADA «OpenScada», работающий на ПЭВМ под управлением ОС GNU/Linux Debian 8.

Общая схема стендовой установки пиролиза представлена на рисунок 1.

Исходное сырье загружалось в реактор. Выделяющаяся в процессе пиролиза парогазовая смесь отводилась через паропровод в конденсатор-холодильник. Остывшая парогазовая смесь с трудно конденсируемыми жидкими продуктами, в виде взвеси низковязких частиц затем поступала на доохлаждение в холодильник-конденсатор.

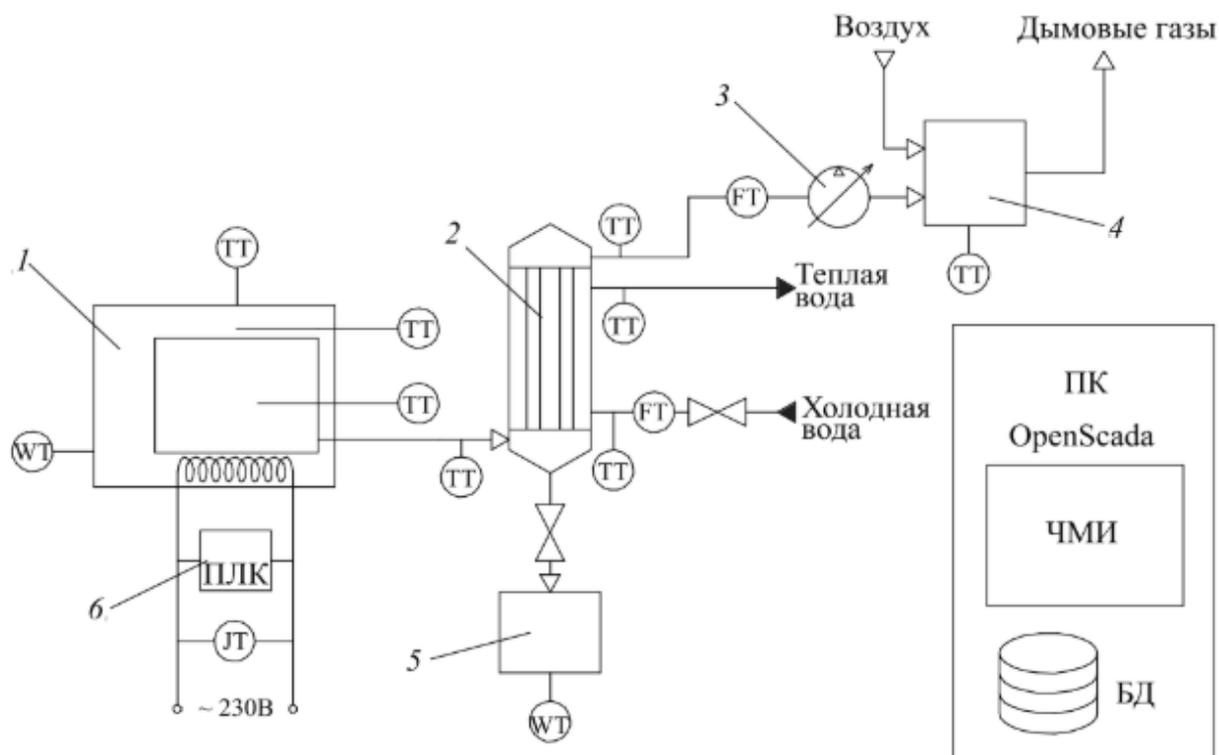


Рис. 1. Схема стандовой установки для проведения пиролиза лигнин-содержащих отходов: 1 – реактор; 2 – конденсатор-холодильник; 3 – насос; 4 – топочная камера; 5 – приемная емкость; 6 – программируемый термоконтроллер; ТТ – измеритель температуры; JT – измеритель мощности; WT – датчик веса; FT – измеритель расхода потока.

Fig. 1. Scheme of bench unit for pyrolysis of lignin-containing waste: 1 – reactor; 2 – condenser; 3 – pump; 4 – furnace chamber; 5 – receiving tank; 6 – programmable thermocontroller; TT – temperature meter; JT – power meter; WT – weight sensor; FT – flow meter.

После доохлаждения очищенная парогазовая смесь подавалась на узел измерения расхода по условному газу и далее на дожигатель. Выделенная жидкая фракция отводилась в сборник конденсата. О стадиях процесса можно судить по значениям показателей, регистрируемых SCADA, и горению неконденсируемой парогазовой смеси.

Диаграмма процесса пиролиза лигнин-содержащих отходов показана на рисунок 2. Интенсификация выхода парогазов пиролиза совпадает с увеличением скорости разложения органического сырья. Неконденсируемые газы пиролиза устойчиво горят при температуре внутри реторты выше 300°C. Выход углеродистого остатка составил 30% от абсолютно сухого сырья.

Далее полученный углеродистый остаток подвергался брикетированию с целью увеличения прочности и плотности сырья для активации и, соответственно, получения самих активных углей, по следующей методике:

- 1) Брикетирование твердых продуктов пиролиза с использованием лесохимического связующего в виде пирогенной смолы, получаемой в приемной емкости процесса пиролиза;
- 2) Размол брикетов и отбор фракции;

3) Активация полученных после брикетирования гранул.

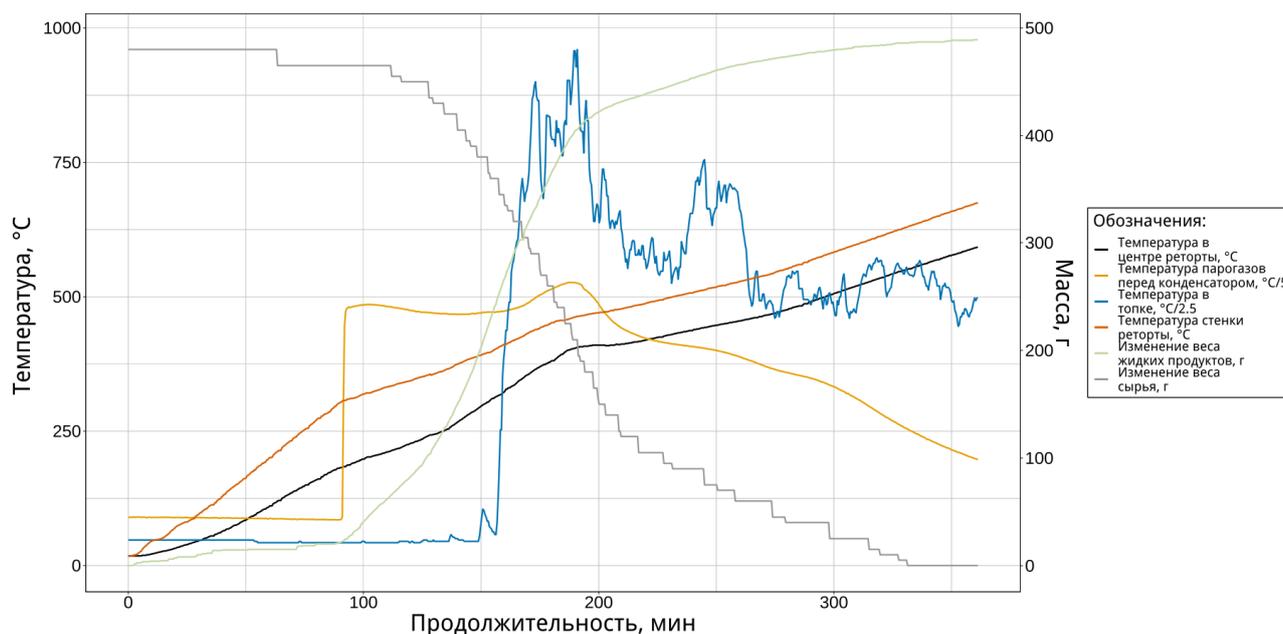


Рис. 2. Диаграмма процесса пиролиза лигнин-содержащих отходов.

Fig. 2. Diagram of pyrolysis process of lignin containing waste.

Брикетирование проводилось на лабораторном гидравлическом прессе – ПЛГ20. Брикетированные образцы были подвергнуты измельчению на рубильной машине РМ-120, и отобрана фракция 0,5–2,0 мм для дальнейшей активации.

Паровая активация полученных сорбентов

Активация образцов проводилась на стендовой установке по активации, схема которой представлена на рис. 3.

Исходное сырье загружалось в реактор, который затем помещался в предварительно нагретую до 970°C трубчатую печь. Через паропровод из парогенератора подавался пар, время подачи пара регулировалось в соответствии со схемой эксперимента. Выделяющаяся в процессе активации смесь абгазов отводилась на сжигание.

В качестве продуктов получали активные угли при разном времени активации. Условия получения и основные характеристики полученных образцов представлены в таблице 1.

Определение сорбционной активности углеродных сорбентов

Определение адсорбционной активности образцов активированного угля по индикатору йода проводилось в соответствии с ГОСТ 6217-74 [20].

Пробу угля высушивают при 110–115°C в сушильном шкафу или под инфракрасной лампой до постоянной массы. Около 1 г высушенного угля взвешивают (результат взвешивания записывают с точностью до третьего десятичного знака), помещают в коническую колбу вместимостью 250 см³, добавляют 100 см³ раствора йода в йодистом калии, закрывают пробкой и

вручную каждую минуту взбалтывают в течение 30 мин. Затем раствору дают отстояться и из колбы пипеткой осторожно, чтобы не попали частички угля, отбирают 10 см³ раствора, помещают в коническую колбу вместимостью 50 см³ и титруют раствором тиосульфата натрия. В конце титрования добавляют 1 см³ раствора крахмала и титруют до исчезновения синей окраски.

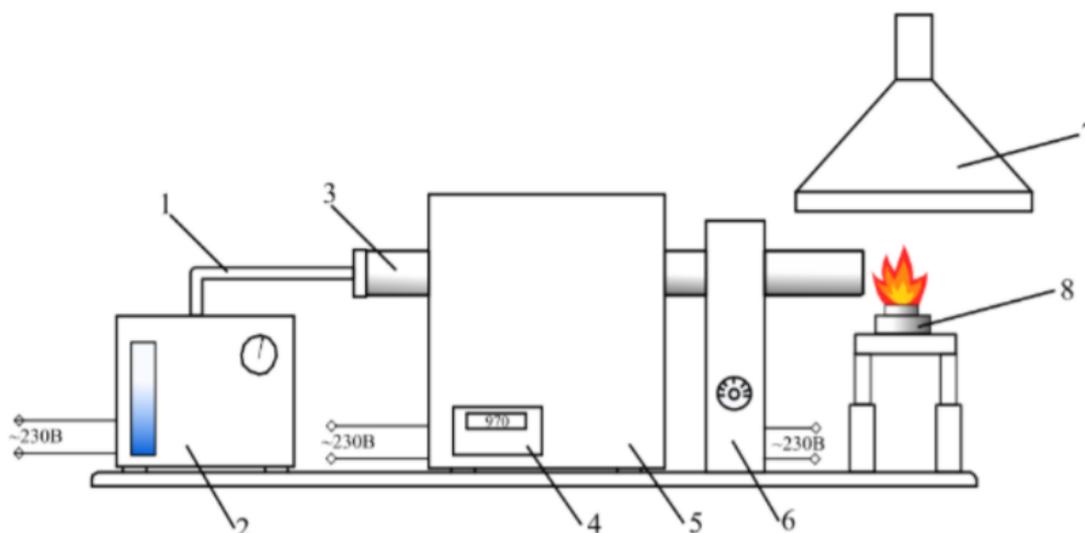


Рис. 3. Схема установки по активации углеродного сорбента: 1 – паропровод; 2 – парогенератор; 3 – реактор; 4 – терморегулятор; 5 – трубчатая печь; 6 – редуктор; 7 – вытяжной конус; 8 – горелка.

Fig. 3. Activation setup scheme: 1 – steam pipeline; 2 – steam generator; 3 – reactor; 4 – thermoregulator; 5 – tube furnace; 6 – reducer; 7 – extraction cone; 8 – burner.

Одновременно проводят определение начального содержания йода в растворе, для этого отбирают 10 см³ раствора йода в йодистом калии и титруют раствором тиосульфата натрия, добавив в конце титрования раствор крахмала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Активация образцов полученного и измельченного угля происходила при следующих условиях [18, 21]: активирующий агент – водяной пар, температура активации – 970°C, продолжительность активации при заданной температуре – 20, 60 и 80 мин (в соответствии с различным временем активации образцы полученных активированных углеродных сорбентов получили обозначения АУ 1, АУ 2 и АУ 3). Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Данные по активации углеродсодержащих сорбентов

Table 1. Summary of activation data for carbon-based sorbents

Наименование образца	Масса угля до активации, г	Масса угля после активации, г	Время активации, мин	Выход активного угля, %	Степень обгара, %
АУ 1	11,604	9,526	20	82,1	17,9
АУ 2	6,873	5,797	60	84,4	45,7
АУ 3	11,252	5,633	80	50,1	49,9

Выход активного угля рассчитан по формуле:

$$X_1 = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100\%$$

Степень обгара рассчитана по формуле:

$$X_2 = \frac{(m_2 - m_1)}{m_2} \cdot 100\%$$

где m_1 – масса угля после активации, г; m_2 – масса угля до активации, г.

Как видно из таблицы, максимальная степень обгара (доля угля, выгоревшего при активации) составила 49,9%. Выход активного угля с увеличением степени обгара уменьшается.

Результаты определения сорбционной активности по йоду для полученных образцов сорбентов представлены в таблице 2. Как следует из полученных данных, максимальную сорбционную активность по йоду показал образец АУ 2 (81,92%), поэтому условия его активации (970°C, 60 мин) следует считать оптимальными.

Таблица 2. Результаты сорбционной активности по йоду

Table 2. Summary of adsorption activity for iodine of activated carbon samples

Показатели	Требования по ГОСТ 6217-74 [20]		Наименование образца		
	БАУ-А	БАУ-МФ	АУ 1	АУ 2	АУ 3
Адсорбционная активность по йоду, %	не менее 60	не менее 70	40,64	81,92	74,86

Важно отметить, что полученные образцы АУ 2 и АУ 3 по своей сорбционной емкости не только не уступают, но, возможно, даже превосходят соответствующие показатели образцов известных промышленных марок активированных углей, полученных из древесного сырья БАУ-А и БАУ-МФ (75–81% против 60–70% в соответствии с нормативным документом [20]).

Таким образом, предлагаемый метод получения углеродных сорбентов может стать перспективным способом, обеспечивающим не только утилизацию лигнин-содержащих отходов, но и одновременное получение сорбентов с полезными свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ переработки лигнин-содержащих отходов путем их пиролиза с последующей паровой активацией полученных углеродных сорбентов является перспективным альтернативным способом утилизации данного вида отходов. Способ также является универсальным и подходит для любого вида лигноцеллюлозных отходов.

Полученные по описанной в статье методике углеродные сорбенты не уступают по своим сорбционным характеристикам аналогичным промышленным образцам активированных углей, полученных из древесного сырья.

Сорбенты, полученные из лигнин-содержащего сырья целесообразно использовать для очистки жидких сред от неорганических соединений.

Список литературы:

1. Журавлева Л.Н., Девятловская А.Н. (2007). Основные направления использования древесных отходов. *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 18, 96 - 99.
2. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. (2015). Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования. *Инженерный вестник Дона*, 2-2, 81.
3. «Об утверждении стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года». Распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 года № 84-Р.
4. Кирсанов С.А., Мустафин Г.В. (2014). Мировой и российский опыт утилизации твердых бытовых отходов. *Вестник ОмГУ. Серия: Экономика*, 2, 114 - 120.
5. Осокин В.М., Сомин В.А. (2013). Исследования по получению новых сорбентов из растительного сырья для очистки воды. *Ползуновский вестник*, 1, 280 - 282.
6. Чудаков М.И. (1983). *Промышленное использование лигнина*. М.: Лесная промышленность.
7. Цветков М.В., Салганский Е.А. (2018). Лигнин: направления использования и способы утилизации. *Журнал прикладной химии*, 91(7), 988 - 997. DOI: [10.1134/S0044461818070095](https://doi.org/10.1134/S0044461818070095)
8. Azadi P., Inderwildi O.R., Farnood R., King D.A. (2013). Liquid fuels, hydrogen and chemicals from lignin: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 506 - 523. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.022>
9. Ponnusamy V.K., Nguyen D.D., Dharmaraja J., Shobana S., Banu J.R., Saratale R.G., Chang S.W., Kumar G. (2019). A review on lignin structure, pretreatments, fermentation reactions and biorefinery potential. *Bioresource Technology*, 271, 462 - 472. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.070>
10. Feofilova E.P., Mysyakina I.S. (2016). Lignin: Chemical structure, biodegradation, and practical application (a review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 52, 573 - 581. <https://doi.org/10.1134/S0003683816060053>
11. Волосатова К.А. (2018). Исследование возможности применения гидролизного лигнина в производстве стеновых блоков для малоэтажного строительства. *Инженерный вестник Дона*, 3, 125.
12. Дошлов О.И., Казрян А.С., Дошлов И.О. (2014). Новые аспекты утилизации технического гидролизного лигнина в качестве сырья для промышленного производства. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 11(94), 205 - 211.
13. Nikolenko Yu.M., Opra D.P., Tsvetnikov A.K., Ustinov A.Yu., Kuryavii V.G., Sokolov A.A., Silantev V.E., Zverev G.A., Majorov V.Y., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V. (2018). High-capacity derivatives produced from hydrolytic lignin as electrode materials for energy storage and conversion. *Diffusion and Defect Data. Pt A Defect and Diffusion Forum*, 386, 359 - 364. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.386.359>
14. Симонова В.В., Шендрик Т.Г., Кузнецов Б.Н. (2010). Методы утилизации технических лигнинов. *Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия Химия*, 3(4), 340 - 354.
15. Чистяков А.В., Цодиков М.В. (2018). Методы синтеза углеродных сорбентов из лигнина (обзор). *Журнал прикладной химии*, 91(7), 949 - 967. DOI: [10.1134/S0044461818070058](https://doi.org/10.1134/S0044461818070058)
16. Пат. 2440125 С1 РФ, 2010.
17. Савицкая Т.А., Невар Т.Н., Цыганкова Н.Г., Кривова М.Г., Резников И.В., Шахно Е.А., Везенцев А.И., Гриншпан Д.Д. (2015). Сорбенты на основе активированного угля и гидролизного лигнина: структура, свойства, применение. *Свиридовские чтения*, 11, 132 - 143. <http://elib.bsu.by/handle/123456789/223267> (дата обращения 30.09.2020).

18. Тиньгаева Е.А., Фарберова Е.А. (2016). Исследование возможности использования лигнина и целлюлозы для получения гранулированных активных углей. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*, 1, 47 - 60.
19. Романенко К.А., Богданович Н.И., Канарский А.В. (2017). Получение активных углей пиролизом гидролизного лигнина. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 4, 162 - 171. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.4.162](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.162)
20. ГОСТ 6217-74. Уголь активный древесный дробленый. Технические условия.
21. Marsh H., Reinoso F.R. (2006). *Activated Carbon*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044463-5.X5013-4>

References:

1. Zhuravleva, L.N., & Devyatlovskaya, A.N. (2007). Main directions of using wood wastes. *Aktualnye problemy lesnogo kompleksa = Actual problems of forest complex*, 18, 96 - 99 (in Russ.).
2. Mokhirev, A.P., Bezrukikh, Yu.A., & Medvedev, S.O. (2015). Recycling of wood wastes of timber industry, as a factor of sustainable resource management. *Inzhenernyi Vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2-2, 81 (in Russ.).
3. On approval of strategy for development of industry for processing, utilization and disposal of production and consumption waste for the period up to 2030. Order of the Government of the Russian Federation No. 84-R of January 25, 2018 (in Russ.).
4. Kirsanov, S.A., & Mustafin, G.V. (2014). World and Russian experience of utilization of solid domestic waste. *Vestnik Omskogo universiteta. Ser. Ekonomika = Herald of Omsk University. Series: Economics*, 2, 114 - 120 (in Russ.).
5. Osokin, V.M., & Somin, V.A. (2013). Study on obtaining new sorbents from plant raw materials for water treatment. *Polzunovskiy Vestnik*, 1, 280 - 282 (in Russ.).
6. Chudakov, M.I. (1983). *Industrial use of lignin*. M.: Lesnaya promyshlennost' (in Russ.).
7. Tsvetkov, M.V., & Salganskii, E.A. (2018). Lignin: applications and ways of utilization (review). *Russian Journal of Applied Chemistry*, 91(7), 1129 - 1136. <https://doi.org/10.1134/S1070427218070108>
8. Azadi, P., Inderwildi, O.R., Farnood, R., & King, D.A. (2013). Liquid fuels, hydrogen and chemicals from lignin: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 506 - 523. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.022>
9. Ponnusamy, V.K., Nguyen, D.D., Dharmaraja, J., Shobana, S., Banu, J.R., Saratale, R.G., Chang, S.W., & Kumar, G. (2019). A review on lignin structure, pretreatments, fermentation reactions and biorefinery potential. *Bioresource Technology*, 271, 462 - 472. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.070>
10. Feofilova, E.P., & Mysyakina, I.S. (2016). Lignin: Chemical structure, biodegradation, and practical application (a review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 52, 573 - 581. <https://doi.org/10.1134/S0003683816060053>
11. Volosatova, K.A. (2018). Study of application of hydrolytic lignin in production of wall blocks for low-rise construction. *Inzhenernyi Vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 3, 125 (in Russ.).
12. Doshlov, O.I., Kazryan, A.S., & Doshlov, I.O. (2014). New aspects of utilization of technical hydrolytic lignin as a raw material for industrial production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 11(94), 205 - 211 (in Russ.).
13. Nikolenko, Yu.M., Opra, D.P., Tsvetnikov, A.K., Ustinov, A.Yu., Kuryavyi, V.G., Sokolov, A.A., Silantev, V.E., Zverev, G.A., Majorov, V.Y., Sinebryukhov, S.L., & Gnedenkov, S.V. (2018). High-capacity derivatives produced from hydrolytic lignin as electrode materials for

- energy storage and conversion. *Diffusion and Defect Data. Pt A Defect and Diffusion Forum*, 386, 359 - 364. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.386.359>
14. Simonova, V.V., Shendrik, T.G., & Kuznetsov, B.N. (2010). Methods of industrial lignin utilization. *Journal of Siberian Federal University*, 4, 340 - 354 (in Russ.).
 15. Chistyakov, A.V., & Tsodikov, M.V. (2018). Methods for preparing carbon sorbents from lignin (review). *Russian Journal of Applied Chemistry*, 91(7), 1090 - 1105. <https://doi.org/10.1134/S1070427218070054>
 16. Pat. 2440125, Russian Federation, 2010.
 17. Savitskaya, T.A., Nevar, T.N., Tsygankova, N.G., Krivova, M.G., Reznikov, I.V., Shakhno, E.A., Vezentsev, A.I., & Grinshpan, D.D. (2015). Sorbents based on activated carbon and hydrolytic lignin: structure, properties, application. *Sviridovskie chteniya*, 11, 132 - 143 (in Russ.).
 18. Tingaeva, E.A., & Farberova, E.A. (2016). Research the possibility of using lignin and cellolignin to obtain granulated active carbons. *Vestnik PNIPU. Ser. Khim. Tekhnologiya i Biotekhnologiya = PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology*, 1, 47 - 60 (in Russ.).
 19. Romanenko, K.A., Bogdanovich, N.I., & Kanarskii, A.V. (2017). Obtaining of activated carbons by pyrolysis of hydrolytic lignin. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 4, 162 - 171 (in Russ.). DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.4.162](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.162)
 20. GOST (State Standard) 6217-74. Wood crushed activated carbon. Specifications (in Russ).
 21. Marsh, H., & Reinoso, F.R. (2006). *Activated Carbon*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044463-5.X5013-4>