

УДК 620.193.16, 620.93, 556.114

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСНОЙ МАССЫ, АКТИВИРОВАННОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

© *Н.Ю. Демиденко**, *М.А. Баяндин*, *А.В. Намятов*, *В.Н. Ермолин*

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. Мира, 82, Красноярск, 660017 (Россия),
e-mail: nftalie.demid@gmail.com*

В работе изучено влияние механоактивации гидродинамическим способом на физико-химические свойства мягких отходов механической обработки древесины (опилок). В результате исследований установлено, что при кавитационной обработке происходит трансформация химической структуры древесных опилок, что обеспечивает получение гидродинамически активированных древесных частиц с высоким содержанием реакционноспособных поверхностных функциональных групп, которое обусловлено изменением лигно-углеводного комплекса. Установлено, что в результате гидродинамической активации количество трудногидролизуемых полисахаридов снижается на 37%, при этом увеличиваются доли легкогидролизуемых веществ и веществ фенольной природы, соответственно, на 12 и 25%. Трансформация лигно-углеводного комплекса древесных частиц в процессе кавитации во многом предопределяет изменение характеристики их пористой структуры. Установлено увеличение количества микропор в 1.5 раза и больших транспортных пор в 3 раза в процессе кавитации. Полученные результаты во многом доказывают, что физико-химические свойства активированных гидродинамическим способом древесных частиц во многом определяют возможность получения нетоксичных древесных материалов с высокими физико-механическими свойствами без пьезотермических воздействий.

Ключевые слова: древесные опилки, кавитация, механоактивация, химический состав, пористая структура, функциональные группы, лигно-углеводный комплекс, гидродинамическая активация, целлюлоза, лигнин, углеводный комплекс.

Данный проект поддержан за счет средств гранта №20-48-240001, предоставленного РФФИ, Правительством Красноярского края и Краевым фондом науки.

Введение

Современные процессы производства древесных плит направлены на комплексное использование древесины. Реализуемые промышленностью технологии обеспечивают переработку низкосортной древесины и отходов деревообработки. В последнее время все больше внимания уделяется экологическим аспектам производства и эксплуатации плит. Основным вектором развития является отказ от синтетических связующих и получения материалов без использования адгезивов. Многочисленные исследования [1–6] указывают на то, что необходимым условием для повышения эксплуатационных свойств плитных материалов без связующих является активация сырья. Известен целый спектр способов активации древесины. Химическое воздействие реагентами позволяет провести деструкцию лигно-углеводной матрицы древесного вещества. При этом хими-

Демиденко Наталья Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии древесины и биотехнологии, e-mail: natalie.demid@gmail.com

Баяндин Михаил Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии древесины и биотехнологии, e-mail: mihailbayandin@yandex.ru

Намятов Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, ассистент кафедры химической технологии древесины и биотехнологии, e-mail: Namyatov2010@yandex.ru

Ермолин Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры химической технологии древесины и биотехнологии, e-mail: vnermolin@yandex.ru

ческие соединения взаимодействуют с реакционноспособными функциональными группами основных компонентов древесины с образованием новых ковалентных связей [7–9]. В большинстве случаев данное взаимодействие протекает с гидроксильными группами структурных компонентов клеточной стенки [10, 11]. Несмотря на существенные изменения в древесинном веществе, это не позволяет обеспечить аутогезионное взаимодействие между частицами древесной массы без пьезотермических воздействий.

* Автор, с которым следует вести переписку.

Перспективным направлением является механоактивация древесины. Она позволяет изменить химические, физико-химические свойства, а также морфологию древесных частиц. В результате механических воздействий происходит частичное разрушение древесинного вещества и образование новых межфазных поверхностей с активными функциональными группами, которые ранее участвовали в образовании надмолекулярных структур [10, 12–14]. Эти группы способны образовывать межмолекулярные соединения между древесными частицами. Одним из широко используемых способов является механический размол. Полученная таким способом древесная масса широко используется для получения различных материалов, в частности древесных плит различной плотности. Данный способ, как показывают последние исследования [13, 14], может обеспечивать внешнюю и внутреннюю фибрилляцию древесных волокон, что увеличивает площадь межфазных поверхностей. Это дает возможность получить плиты без использования связующих веществ, но не позволяет обеспечить требуемых свойств материалов. Размол древесины на волокна почти не затрагивает надмолекулярную структуру целлюлозы. По мнению авторов работы [15], лигно-углеводный комплекс блокирует доступность целлюлозного компонента действию размалывающих факторов и защищает целлюлозу от внутреннего фибриллирования в процессе размола. Наравне с этим значительное внимание уделяется процессу взрывного автогидролиза, где степень фибриляции древесной массы гораздо выше. Это во многом обусловлено более глубокой деструкцией компонентов лигно-углеводной матрицы древесинного вещества и высоким содержанием редуцирующих веществ [15]. Это позволяет получать плиты разной плотности без использования адгезивов, только путем горячего прессования.

Значительно лучшие результаты обеспечивает другой способ механоактивации древесины – гидродинамическая обработка в гидродинамическом диспергаторе. Такая обработка за счет возникновения явления кавитации оказывает существенное влияние на морфолого-анатомическое строение древесных частиц и их физико-химические свойства [10, 12, 16–18]. Из полученной по такому способу древесной массы были получены плиты без использования связующих веществ с различной плотностью (от 200 до 1100 кг/м³). Их механические свойства при сопоставимой плотности не уступают широко известным древесным плитам, таким как ДВП, ДСП, МДФ и изоляционным ДВП, а по водостойкости даже превосходят их [16]. Эти данные говорят о целесообразности дальнейших исследований по изучению изменений, происходящих в древесине в процессе гидродинамических воздействий.

Большинство методов изучения свойств древесных масс направлены на определение геометрических показателей, равномерность их распределения, пористость, которые во многом определяют процесс формирования структуры материалов [16]. В работе [3] установлено, что гидродинамическая активация древесины позволяет увеличить удельную поверхность в 3 раза. Это во многом указывает на высокую степень фибриляции частиц и, соответственно, их высокую межфазную поверхность, на которых имеются активные функциональные группы, ранее участвующие в образовании надмолекулярных структур древесинного вещества. В процессе удаления воды путем конвективной сушки происходит сближение частиц и создаются условия для взаимодействия между этими группами у соседних частиц, в результате чего формируется структура материала. Как известно, внутренняя фибрилляция приводит к необратимым перегруппировкам структурных элементов внутри набухшей вторичной стенки волокна, не уменьшая его прочности. Процессы внешнего и внутреннего фибриллирования трудно разделить, так как они тесно взаимосвязаны [11]. Косвенно степень внешней фибрилляции оценивают обычно по изменению наружной поверхности волокон, внутренней – по их гибкости [11]. Исходя из того, что древесинное вещество представляет собой коллоидное капиллярно-пористое тело, фибриллирование обуславливает образование микротрещин, разрывов, что приводит к изменению поверхностной пористой структуры частиц. Учитывая размеры образующихся дефектов, в данном случае вызывают интерес методы оценки относительного количества микро- и мезопор, доступных для адсорбции растворенных в воде веществ. Данные методы находят широкое применение при изучении веществ с высокой удельной поверхностью, например, сорбентов. Для изучения поверхностной пористой структуры нами проведены специальные исследования активированной гидродинамическим способом древесной массы.

Для формирования понимания механизма структурообразования плит и совершенствования способов их получения необходимо изучение физико-химических характеристик древесных материалов, что явилось целью данной работы.

Экспериментальная часть

В работе для проведения исследований в качестве сырья использовались сосновые опилки влажностью 62%, полученные в промышленных условиях на ООО «ДОК Енисей» на круглопильных станках. Гидродинамическая обработка древесных частиц при концентрации 6% осуществлялась в гидродинамическом диспергаторе оригинальной конструкции, принцип работы которого подробно описан в работе [4]. Отбор проб древесной массы для исследований осуществлялся последовательно при продолжительности от 5 до 20 мин. Остаточная влажность древесной массы составляла 75%.

Адсорбционную способность активированных древесных опилок оценивали общепринятым способом, включающим адсорбцию йода и метиленового голубого испытуемыми образцами из стандартных водных растворов в соответствии с рекомендациями [19–23]. Изучение содержания полисахаридов и лигнина древесных частиц определяли по методикам, принятым в химии древесины [24].

С целью изучения изменения поверхностной структуры древесных частиц в процессе кавитации проведены исследования поверхностных функциональных групп по методикам [22].

Обсуждение результатов

Явление кавитации возникает под действием принудительно распространяемых в жидкой среде колебаний ультразвуковой частоты и строго заданной амплитуды давления. Процесс напоминает кипение. При этом жидкость, в частности вода, на определенное время приобретает все свойства, присущие жидкости с температурой вблизи точки кипения. Такая жидкость является мощным растворителем и вступает в реакцию гидратации биополимеров древесного сырья – соединение их с молекулами воды, интенсивно экстрагирует [25]. Кавитационные пузырьки образуются при кипении жидкости под давлением ниже атмосферного. Процесс схлопывания происходит со сверхзвуковой скоростью и порождает множество физических и химических эффектов [25].

В условиях кавитации в воде генерируются импульсы давления, трансформация энергии которых реализуется в ней «надтепловой» механизм физико-химических изменений структуры. Вода переходит в так называемое термодинамически неравновесное состояние, которое продолжается до тех пор, пока она постепенно не отдаст полученную энергию в виде тепла в процессе восстановления своей кластерной структуры [26].

Во время гидродинамической обработки с эффектом кавитации молекулы воды диссоциируют на радикалы $\text{OH}\cdot$ и $\text{H}\cdot$, и в этих условиях образуется соединение перекиси водорода (H_2O_2). Затем гидропероксильные анионы ($\text{HOO}\cdot$) реагируют с H_2O_2 и диссоциируют на гидроксильные ($\text{OH}\cdot$) и супероксидные ($\text{O}^{2\cdot-}$) радикалы. Эти радикалы $\text{OH}\cdot$ приводят к деградации боковых цепей лигнина, которые подвергаются реакциям окисления и удалению их из клеточных стенок растений под действием H_2O_2 [27].

Изменения состава полисахаридов и лигнина в результате кавитационных процессов представлены в таблице 1.

Как показывают исследования химического состава древесных частиц, представленные в таблице 1, после гидродинамической активации исходное сырье претерпевает существенные изменения.

С увеличением продолжительности обработки уменьшается с большей степени содержание легкогидролизуемых полисахаридов на 37%. Количество трудногидролизуемых полисахаридов уменьшается на 12%. Количественные изменения полисахаридов объясняются увеличением температурного воздействия в процессе обработки с эффектом кавитации. Это связано с экстракцией водорастворимых веществ, протекающей непосредственно в процессе гидродинамической активации, и переходе их в водную часть суспензии. Исследования водных суспензий в процессе кавитации показали присутствие редуцирующих веществ (до 7%).

Таблица 1. Компонентный состав древесных опилок в процессе кавитации

Образец	Продолжительность процесса гидродинамической обработки, мин	Температура пробы, °С	Легкогидролизуемые полисахариды	Трудногидролизуемые полисахариды	Лигнин по Комарову
1	исходный	27	16.3±0.2	40.8±0.1	32.4±0.1
2	5	61	13.2±0.1	39.6±0.1	32.6±0.1
3	10	90	12.5±0.1	37.5±0.2	32.4±0.1
4	15	97	10.4±0.1	34.9±0.1	30.2±0.2
5	20	100	10.7±0.2	35.4±0.1	30.4±0.1

Доля веществ ароматической природы, представленная в древесных опилках лигнином, в результате кавитационных процессов с учетом выхода древесных опилок изменяется незначительно. Происходит растворение веществ фенольной природы, обуславливающее интенсивность окраски раствора в процессе гидродинамической обработки более 15 мин.

Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о качественных изменениях в составе лигно-углеводного комплекса древесных опилок в результате гидродинамической активации.

Следует отметить, что указанное воздействие вызывает не только изменение состава полисахаридов и лигнина, но трансформацию капиллярно-пористой системы.

Согласно определению IUPAC, пористые тела делятся на микропористые (диаметр пор менее 2 нм), мезопористые (в пределах от 2 до 50 нм) и макропористые (более 50 нм) [28].

В таблице 2 представлены результаты исследований структурных характеристик древесных частиц с разной продолжительностью обработки.

Как видно из результатов исследований, в процессе гидродинамической активации происходит значительное изменение микропористой структуры. Вероятно, это обусловлено тем, что при активации происходит гидратация целлюлозного компонента клеточной стенки. В процессе обработки наблюдается увеличение этого показателя в 1.5 раза. В этой связи целесообразно иметь в виду, что микропоры целлюлозы формируются между наноразмерными фрагментами микрофибрилл, а мезопоры находятся между микрофибриллами и их агрегатами [29]. Таким образом, специфика взаимного расположения этих пор в целлюлозной структуре создает определенные препятствия для эффективного диффузионного молекулярного обмена адсорбатом между ними. В то же время эксперимент показывает, что межслоевой автономный молекулярный обмен как внутри микропор, так и внутри мезопор явно относится к категории быстрого [29].

Суммарная пористость по воде характеризует наличие макропор. Кавитационные явления также способствовали увеличению больших транспортных пор в три раза.

Полученные результаты по исследованию пористой структуры согласуются с микроснимками древесных опилок, представленных на рисунке.

В работе [30] была подтверждена экспериментально гипотеза о доминирующем вкладе поверхностных групп кристаллитов в формирование так называемых «аморфных» областей целлюлозы.

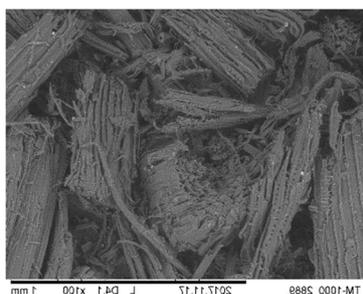
Результаты исследований поверхностных функциональных групп древесных опилок представлены в таблице 3. Полученные результаты указывают, что с увеличением продолжительности снижение поверхностных фенольных гидроксильных групп уменьшается в три раза, при этом содержание лигнина в полученных образцах после гидродинамической активации увеличивается. Вероятно, произошли процессы конденсации фенольных веществ.

Уменьшение количества поверхностных карбоксильных групп согласуется с изменением состава полисахаридов в древесных опилках.

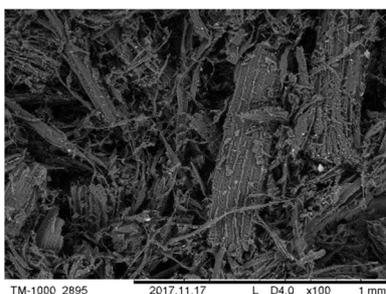
Таблица 2. Структурные характеристики древесных частиц

Образец*	Адсорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г	Адсорбционная активность по йоду, мг/г	Суммарная пористость по воде, см ³ /г
1	221.72	31.56	0.34
2	283.61	45.43	0.45
3	311.17	56.80	1.26
4	403.55	88.67	1.48
5	454.33	122.33	1.67

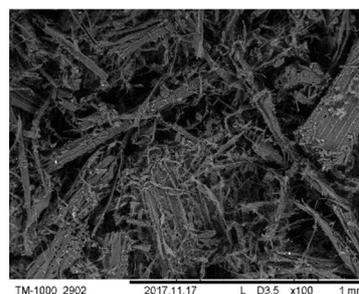
Примечание: условия получения образцов представлены в таблице 1.



Образец 1



Образец 3



Образец 5

Структура древесных опилок в процессе гидродинамической активации

Таблица 3. Изменение поверхностной структуры древесных опилок в процессе кавитации

Наименование показателя	Образец				
	1	2	3	4	5
Поверхностные фенольные гидроксильные группы, %	19.61	10.53	9.7	8.6	6.21
Поверхностные карбоксильные группы, %	0.28	0.14	0.18	0.18	0.20

Примечание: условия получения образцов представлены в таблице 1.

Заключение

Таким образом, как показали исследования, что в результате гидродинамической обработки происходит трансформация физико-химической структуры древесных опилок. Гидродинамическая обработка с эффектом кавитации обеспечивает изменение содержания полисахаридов и лигнина древесинного вещества и получение древесной массы с высоким содержанием реакционноспособных поверхностных функциональных групп. Такие характеристики поверхностной пористой структуры древесных частиц указывают на высокую степень их внутренней фибрилляции, что обуславливает снижение их жесткости. Это позволяет при удалении воды путем конвективной сушки за счет сил капиллярной контракции максимально их сблизить и, соответственно, обеспечить взаимодействие между реакционноспособными поверхностными функциональными группами. Получаемые из такой активированной древесной массы плиты имеют более высокие физико-механические свойства в сравнении с известными аналогами, такими как изоляционные и мягкие древесноволокнистые плиты.

Список литературы

1. Катраков И.Б., Маркин В.И., Базарнова Н.Г. Получение пресс-масс и плитных материалов на основе кавитированного растительного сырья // Известия АлтГУ. 2014. Т. 1. №3. С. 204–208. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-37.
2. Ширияев Д.В. Теплоизоляционные материалы на основе модифицированных методом взрывного автогидролиза отходов растительного происхождения: автореф. дисс. ... докт. техн. наук. Барнаул, 2013. 20 с.
3. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казицин С.Н., Намятов А.В. Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 2019. №5 (371). С. 148–156. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.148.
4. Казицин С.Н. Получение древесных плит без связующих веществ из механоактивированных древесных частиц: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2018. 16 с.
5. Базарнова Н.Г., Катраков И.Б., Маркин В.И. Химическое модифицирование древесины // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). 2004. Т. 48. №3. С. 108–115.
6. Мохирев А.П., Зырянов М.А., Булаев Е.В. Анализ процесса гидродинамического воздействия на сырье из отходов лесозаготовок при получении древесной массы // Universum: Технические науки. 2019. №1(68). С. 67–69.
7. Hon D.N.-S. Chemical Modification of Lignocellulosic Materials. Marcel Dekker, 1996. 370 p.
8. Hill C.A.S. Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes. John Wiley & Sons Ltd, 2006. 248 p.
9. Hu F., Ragauskas A. Pretreatment and lignocellulosic chemistry // Bioengineering Resources. 2012. Vol. 5. Pp. 1043–1066. DOI: 10.1007/s12155-012-9208-0.
10. Микушина И.В. и др. Изменение химического состава древесины при механохимической обработке // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10. №4. С. 443–447.
11. Лебедев И.В., Казаков Я.В., Чухчин Д.Г., Романенко К.А. Роль поверхности волокон в развитии бумагообразующих свойств технической целлюлозы в процессе размола // Химия растительного сырья. 2018. №2. С. 207–216. DOI: 10.14258/jcprgm.2018022248.
12. Марченко Р.А., Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С. Сравнительная оценка показателей размола при ножевом и безножевом способах // Химия растительного сырья. 2012. №1. С. 191–198.
13. Комаров В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. Архангельск, 2002. 440 с.
14. Роговин З.А. Химия целлюлозы. М., 1972. 519 с.
15. Структура и физико-химические свойства целлюлоз и нанокмозитов на их основе / под ред. Л.А. Алешиной, В.А. Гуртова, Н.В. Мелех. Петрозаводск, 2014. 240 с.
16. Алашкевич Ю.Д. Гидродинамические явления при безножевой обработке волокнистых материалов. Красноярск, 2004. 80 с.
17. Петрунина Е.А., Лоскутов С.Р., Баяндин М.А. и др. Гидродинамическая обработка древесины: влияние на гигроскопические свойства // Строение, свойства и качество древесины – 2018: материалы VI Международного симпозиума имени Б.Н. Уголева, посвященного 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам древесиноведения. Красноярск, 2018. С. 158–161.
18. Быков А.В., Мирошников С.А., Межуева Л.В. К пониманию действия кавитационной обработки на свойства отходов производств // Вестник ОГУ. 2009. №12 (106). С. 77–80.

19. Петрунина Е.А., Лоскутов С.Р., Миронов П.В. Гидродинамически активированная древесина сосны: термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия // Структура, свойства и качество древесины – 2018: материалы VI Международного симпозиума имени Б.Н. Уголева, посвященного 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам древесиноведения. Красноярск, 2018. С. 161–165.
20. ГОСТ 4453-74. Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия. М., 1993. 23 с.
21. ГОСТ 6217-74. Уголь активный древесный дробленый. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3, 4). М., 2003. 8 с.
22. Дубинин М.М. Новое в области физической адсорбции паров микропорами адсорбентов // Журнал физической химии. 1987. №5. С. 1301–1305.
23. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М., 1976. 512 с.
24. Рязанова Т.В., Чупрова Н.А., Исаева Е.В. Химия древесины. Ч. 2: Основные компоненты древесины: учебное пособие для студентов вузов. Красноярск, 2011. 229 с.
25. Pinjari D.V., Pandit A.B. Cavitation milling of natural cellulose to nanofibrils // Ultrasonics sonochemistry. 2010. Vol. 17. Pp. 845–852.
26. Хилл К., Бэмбер Д. Ультразвук в медицине. Физические основы применения: монография. М., 2008. 542 с.
27. Tsalagkas D. et al. Assessment of the papermaking potential of processed *Miscanthus × giganteus* stalks using alkaline pre-treatment and hydrodynamic cavitation for delignification // Ultrasonics sonochemistry. 2021. Vol. 72. 105462.
28. IUPAC Manual of Symbols and Terminology. Pure and Applied Chemistry, 1972. Vol. 31. 578 p.
29. Кузнецов Б.Н., Головин Ю.Г., Головина В.В., Еремина А.О., Левданский В.А. Получение углеродных адсорбентов из продуктов экстракционной переработки коры лиственницы сибирской // Химия растительного сырья. 2002. №2. С. 57–61.
30. Грунин Ю.Б., Грунин Л.Ю., Никольская Е.А., Таланцев В.И. Микроструктура целлюлозы и ее изучение методом релаксации ЯМР // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2012. Т. 54. №3. С. 397–405.

Поступила в редакцию 14 июня 2022 г.

После переработки 10 мая 2023 г.

Принята к публикации 17 мая 2023 г.

Для цитирования: Демиденко Н.Ю., Баяндин М.А., Намятов А.В., Ермолин В.Н. Исследование физико-химических свойств древесной массы, активированной гидродинамическим способом // Химия растительного сырья. 2023. №3. С. 337–344. DOI: 10.14258/jcrpm.20230311513.

Demidenko N.Yu.^{*}, Bayandin M.A., Namyatov A.V., Yermolin V.N. RESEARCH OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF WOOD PULSE ACTIVATED BY HYDRODYNAMIC METHOD

Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, pr. Mira, 82, Krasnoyarsk, 660017 (Russia), e-mail: nftalie.demid@gmail.com

The work studied the effect of mechanical activation, hydrodynamically, on the physico-chemical properties of soft waste from mechanical processing of wood (sawdust). As a result of research, it has been established that during cavitation treatment, the chemical structure of sawdust is transformed, which ensures the production of hydrodynamically activated wood particles with a high content of reactive surface functional groups, which is caused by a change in the ligno-carbohydrate complex. It has been established that as a result of hydrodynamic activation, the amount of difficult-to-hydrolyze polysaccharides is reduced by 37%, while the proportions of easily hydrolyzable substances and substances of phenolic nature increase, respectively, by 12 and 25%. The transformation of the ligno-carbohydrate complex of wood particles during cavitation largely determines the change in the characteristics of their porous structure. An increase in the number of micropores by 1.5 times and large transport pores by 3 times during the cavitation process was established. The results obtained largely prove that the physical and chemical properties of hydrodynamically activated wood particles largely determine the possibility of obtaining non-toxic wood materials with high physical and mechanical properties without piezo-thermal effects.

Keywords: sawdust, cavitation, mechanical activation, chemical composition, porous structure, functional groups, ligno-carbohydrate complex, hydrodynamic activation, cellulose, lignin, carbohydrate complex.

References

1. Katrakov I.B., Markin V.I., Bazarnova N.G. *Izvestiya AltGU*, 2014, vol. 1, no. 3, pp. 204–208. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-37. (in Russ.).
2. Shirayayev D.V. *Teploizolyatsionnyye materialy na osnove modifitsirovannykh metodom vzryvnogo avtogidroliza ot-khodov rastitel'nogo proiskhozhdeniya: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk.* [Thermal insulation materials based on waste of plant origin modified by explosive autohydrolysis: abstract of dissertation. ... doc. tech. Sci.]. Barnaul, 2013, 20 p. (in Russ.).
3. Yermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V. *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal*, 2019, no. 5 (371), pp. 148–156. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.148. (in Russ.).
4. Kazitsin S.N. *Polucheniye drevesnykh plit bez svyazuyushchikh veshchestv iz mekhanoaktivirovannykh drevesnykh chas-tits: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk.* [Preparation of wood boards without binders from mechanically activated wood particles: abstract of dissertation. ... cand. tech. Sci.]. Krasnoyarsk, 2018, 16 p. (in Russ.).
5. Bazarnova N.G., Katrakov I.B., Markin V.I. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal (Zhurnal Rossiyskogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva)*, 2004, vol. 48, no. 3, pp. 108–115. (in Russ.).
6. Mokhirev A.P., Zyryanov M.A., Bulayev Ye.V. *Universum: Tekhnicheskiye nauki*, 2019, no. 11(68), pp. 67–69. (in Russ.).
7. Hon D.N.-S. *Chemical Modification of Lignocellulosic Materials*. Marcel Dekker, 1996, 370 p.
8. Hill C.A.S. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley & Sons Ltd, 2006, 248 p.
9. Hu F., Ragauskas A. *Bioengineering Resources*, 2012, vol. 5, pp. 1043–1066. DOI: 10.1007/s12155-012-9208-0.
10. Mikushina I.V. i dr. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2002, vol. 10, no. 4, pp. 443–447. (in Russ.).
11. Lebedev I.V., Kazakov YA.V., Chukhchin D.G., Romanenko K.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2018, no. 2, pp. 207–216. DOI: 10.14258/jcprm.2018022248. (in Russ.).
12. Marchenko R.A., Alashkevich Yu.D., Reshetova N.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2012, no. 1, pp. 191–198. (in Russ.).
13. Komarov V.I. *Deformatsiya i razrusheniye voloknistykh tsellyulozno-bumazhnykh materialov*. [Deformation and destruction of fibrous pulp and paper materials]. Arkhangel'sk, 2002, 440 p. (in Russ.).
14. Rogovin Z.A. *Khimiya tsellyulozy*. [Chemistry of cellulose]. Moscow, 1972, 519 p. (in Russ.).
15. *Struktura i fiziko-khimicheskiye svoystva tsellyuloz i nanokompozitov na ikh osnove* [Structure and physicochemical properties of celluloses and nanocomposites based on them], ed. L.A. Aleshina, V.A. Gurto, N.V. Melekh. Petrozavodsk, 2014, 240 p. (in Russ.).
16. Alashkevich Yu.D. *Gidrodinamicheskiye yavleniya pri beznozhevoy obrabotke voloknistykh materialov*. [Hydrodynamic phenomena during knifeless processing of fibrous materials]. Krasnoyarsk, 2004, 80 p. (in Russ.).
17. Petrunina Ye.A., Loskutov S.R., Bayandin M.A. i dr. *Stroyeniye, svoystva i kachestvo drevesiny – 2018: materialy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni B.N. Ugoleva, posvyashchennogo 50-letiyu Regional'nogo Koordinatsionnogo soveta po sovremennym problemam drevesinovedeniya*. [Structure, properties and quality of wood - 2018: materials of the VI International Symposium named after B.N. Ugolev, dedicated to the 50th anniversary of the Regional Coordination Council on Contemporary Problems of Wood Science]. Krasnoyarsk, 2018, pp. 158–161. (in Russ.).
18. Bykov A.V., Miroshnikov S.A., Mezhuzeva L.V. *Vestnik OGU*, 2009, no. 12 (106), pp. 77–80. (in Russ.).
19. Petrunina Ye.A., Loskutov S.R., Mironov P.V. *Stroyeniye, svoystva i kachestvo drevesiny – 2018: materialy VI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni B.N. Ugoleva, posvyashchennogo 50-letiyu Regional'nogo Koordinatsionnogo soveta po sovremennym problemam drevesinovedeniya*. [Structure, properties and quality of wood - 2018: materials of the VI International Symposium named after B.N. Ugolev, dedicated to the 50th anniversary of the Regional Coordination Council on modern problems of wood science]. Krasnoyarsk, 2018, pp. 161–165. (in Russ.).

* Corresponding author.

20. GOST 4453-74. Ugol' aktivnyy osvetlyayushchiy drevesnyy poroshkoobraznyy. *Tekhnicheskiye usloviya*. [GOST 4453-74. Active charcoal brightening wood powder. Technical conditions]. Moscow, 1993, 23 p. (in Russ.).
21. GOST 6217-74. Ugol' aktivnyy drevesnyy droblenny. *Tekhnicheskiye usloviya (s Izmennyami N 1, 2, 3, 4)*. [GOST 6217-74. Crushed active charcoal. Technical specifications (with Amendments No. 1, 2, 3, 4)]. Moscow, 2003, 8 p. (in Russ.).
22. Dubinin M.M. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 1987, no. 5, pp. 1301–1305. (in Russ.).
23. Kel'tsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki*. [Fundamentals of adsorption technology]. Moscow, 1976, 512 p. (in Russ.).
24. Ryazanova T.V., Chuprova N.A., Isayeva Ye.V. *Khimiya drevesiny. Ch. 2: Osnovnyye komponenty drevesiny: uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov*. [Chemistry of wood. Part 2: Basic components of wood: a textbook for university students]. Krasnoyarsk, 2011, 229 p. (in Russ.).
25. Pinjari D.V., Pandit A.B. *Ultrasonics sonochemistry*, 2010, vol. 17, pp. 845–852.
26. Khill K., Bember D. *Ul'trazvuk v meditsine. Fizicheskiye osnovy primeneniya: monografiya*. [Ultrasound in medicine. Physical basis of application: monograph]. Moscow, 2008, 542 p. (in Russ.).
27. Tsalagkas D. et al. *Ultrasonics sonochemistry*, 2021, vol. 72, 105462.
28. *IUPAC Manual of Symbols and Terminology*. Pure and Applied Chemistry, 1972, vol. 31, 578 p.
29. Kuznetsov B.N., Golovin Yu.G., Golovina V.V., Yeremina A.O., Levdanskiy V.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2002, no. 2, pp. 57–61. (in Russ.).
30. Grunin Yu.B., Grunin L.Yu., Nikol'skaya Ye.A., Talantsev V.I. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Ser. A*, 2012, vol. 54, no. 3, pp. 397–405. (in Russ.).

Received June 14, 2022

Revised May 10, 2023

Accepted May 17, 2023

For citing: Demidenko N.Yu., Bayandin M.A., Namyatov A.V., Yermolin V.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2023, no. 3, pp. 337–344. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20230311513.