

## МИКОЛИЗ ДРЕВЕСИНЫ, ЕГО ПРОДУКТЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ.

### V. «БУРАЯ ГНИЛЬ» ДРЕВЕСИНЫ КАК ПРИРОДНЫЙ КОМПОЗИТ И ИСТОЧНИК ПОЛУПРОДУКТОВ

Г.Н. Кононов<sup>1</sup>✉, А.Н. Веревкин<sup>1</sup>, Ю.В. Сердюкова<sup>1</sup>,  
В.А. Петухов<sup>1</sup>, Н.Л. Горячев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1  
<sup>2</sup>ОАО «ЦНИИБ», 141260, Московская обл., пос. Правдинский, ул. Ленина, д. 15/1

kononov@mgul.ac.ru

Рассмотрены возможные пути использования древесины с «бурой гнилью», как природного продукта обогащенного лигнином. Приведены результаты исследований пиролиза микологически разрушенной древесины в качестве модификатора гидролизного лигнина при получении из него угля-сырца. Проведены исследования ее пьезотермической обработки в целях получения лигноуглеводных пластиков. Изучена возможность использования экстрактивных веществ «бурой гнили» при получении лигноформальдегидных олигомеров. Настоящая статья является пятой в цикле «Микозис древесины, его продукты и их использование» (предыдущие опубликованы в журнале «Лесной вестник / Forestry Bulletin», 2020, т. 24, № 2, № 5; 2021, т. 25, № 1, № 5).

**Ключевые слова:** биолигнин, гидролизный лигнин, технологические отходы, уголь-сырец, лигноуглеводный пластик, лигноформальдегидные олигомеры

**Ссылка для цитирования:** Кононов Г.А., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Петухов В.А., Горячев Н.Л. Микозис древесины, его продукты и их использование. V. «Бурая гниль» древесины как природный композит и источник полупродуктов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 4. С. 92–102.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-92-102

В результате микозиса древесины под действием целлюлолитических ферментов дереворазрушающих грибов в природных условиях образуется «бурая гниль» [1]. Данный продукт хотя и сохраняет в той или иной степени анатомическое строение здоровой древесины, но значительно снижает ее физико-механические характеристики и рассматривается как один из главных пороков древесины, приводящих к образованию большого количества отходов лесопиления [2]. При этом, высокая пористость и развитая поверхность такой микологически разрушенной древесины за счет деградации ее углеводных компонентов, позволяют предположить возможность использования этого отхода при получении сорбционных систем различного назначения [3]. Увеличение содержания достаточно лабильного биолигнина, а также низкомолекулярных фенольных соединений в «бурой гнили» дают основание для ее использования при получении биопластиков и олигомерных продуктов [4].

#### Цель работы

Целью работы — изучение процесса пиролиза с использованием древесины с «бурой гнилью» для получения углеродных сорбентов и исследо-

вание возможности получения из нее биопластиков и олигомерных продуктов.

#### Материалы и методы

В качестве объекта исследования была использована «бурая гниль» древесины ели конечной стадии развития и технический гидролизный лигнин, производства Кировского БиоХимЗавода (рис. 1).

Пиролиз исходного сырья осуществлялся по методике, изложенной в работе [5], со скоростью нагрева 10 °С/мин до заданной температуры и последующей выдержкой в течение 2 ч, и затем охлаждением до комнатной температуры. Определение массовой доли нелетучего углерода и летучих веществ в полученном угле-сырце, проводилось по ГОСТ 33625–2015. «Уголь древесный. Стандартный метод технического анализа».

Получение лигноуглеводного пластика из древесины с «бурой гнилью» осуществлялось пресованием на гидравлическом прессе ПВ-474 при давлении 4,0 МПа, температуре 150 °С в течении 20 мин. Предел прочности полученного пластика при сжатии определялся по ГОСТ 16483.10–13, а предел прочности при изгибе по ГОСТ 16483.4–73.

Синтез олигомерных продуктов с использованием экстрактивных веществ «бурой гнили» осуществлялся по методике синтеза фенолоформальдегидных олигомеров [6].

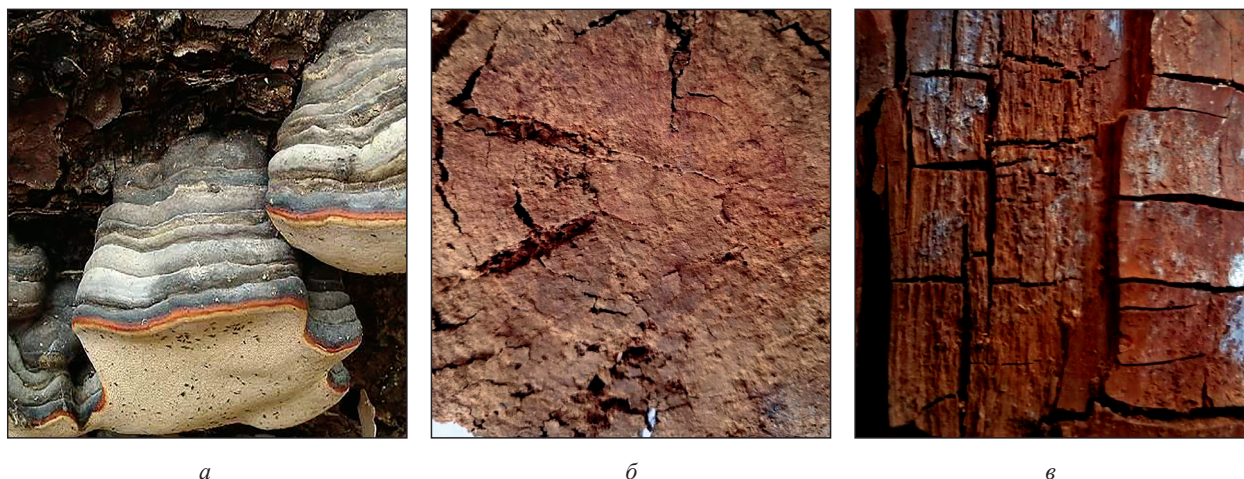


Рис. 1. Бурая гниль древесины ели и гриб, вызывающий ее образование: а — плодовое тело трутовика окаймленного (*Fomitopsis Pimicola*); б — торцевой срез; в — тангенциальный срез

Fig. 1. Brown rot of spruce wood and the fungus causing its formation: а — fruit body of bordered tinder (*Fomitopsis Pimicola*); б — end section; в — tangential section

## Результаты и обсуждение

Высокое содержание углерода в биолигнине «бурой гнили» [3], и наличие реакционноспособных групп (табл. 1), а также большое количество активных низкомолекулярных фенолов [4], послужило основанием для предположения о возможности ее использования в качестве сырья для пиролиза с целью получения угля-сырца, за счет процессов, происходящих в ней при высоких температурах (рис. 2).

Для подтверждения данного предположения был проведен пиролиз «бурой гнили», в результате которого было выяснено, что при повышении температуры от 350 до 550 °С, происходит резкое падение выхода угля-сырца. Это связано, по-видимому, с большим количеством низкомолекулярных кислородсодержащих веществ, превращающихся при высоких температурах в газообразные продукты, однако, содержание нелетучего углерода в полученном угле-сырце было высоким.

В связи с этим для увеличения выхода угля-сырца было предложено использовать еще один вид отходов, но уже химической переработки древесины — технический гидролизный лигнин, обладающий высоким «коксовым числом» по сравнению с микологически разрушенной древесиной (рис. 3).

Недостатком гидролизного лигнина с точки зрения получения из него угля-сырца, является его высокая дисперсность [8] с образованием первичного угля при его пиролизе, который невозможно активировать, вследствие его сгорания в потоке перегретого пара. Этот недостаток можно ликвидировать смешиванием гидролизного лигнина с низкомолекулярными продуктами

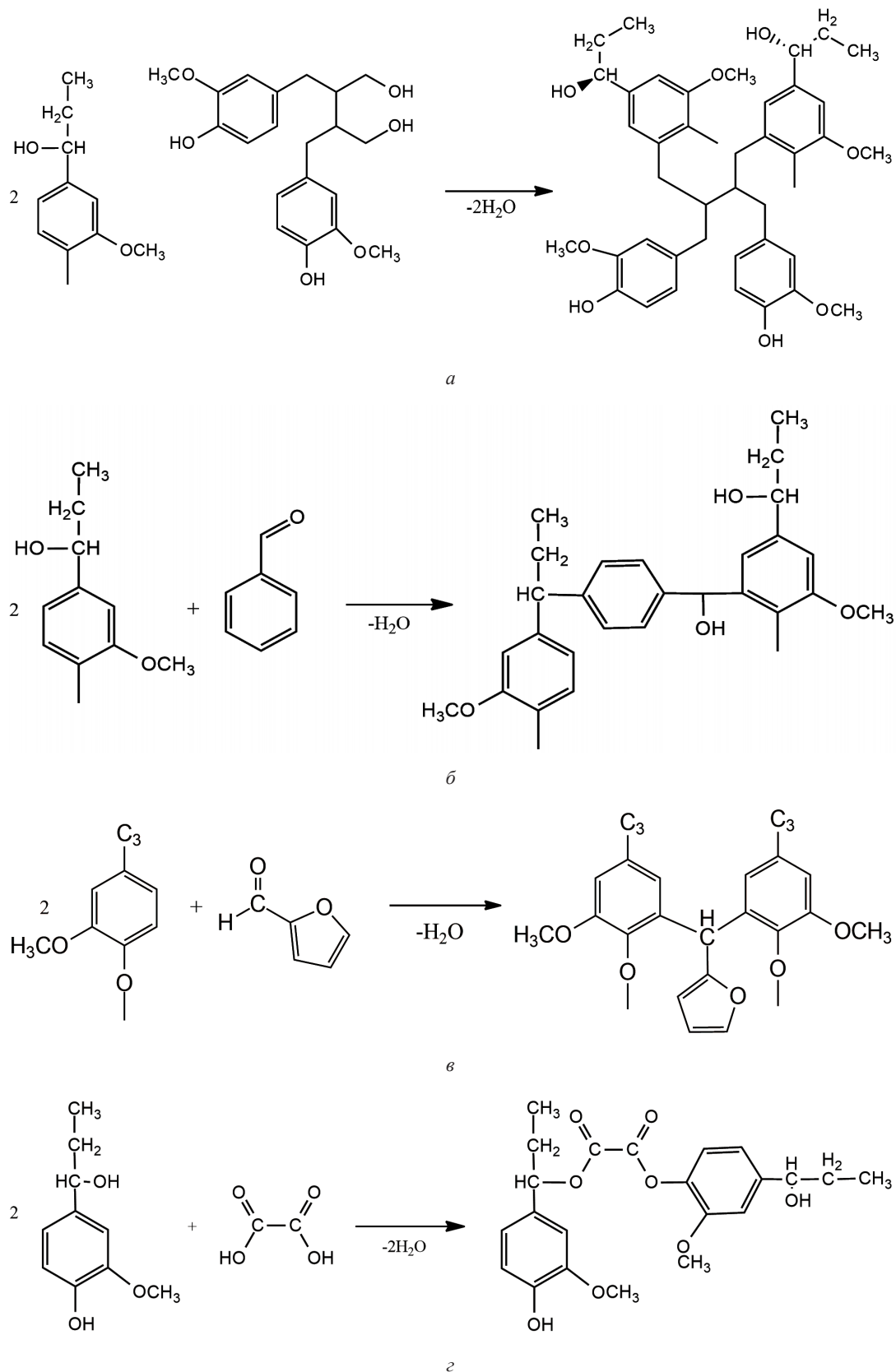
Т а б л и ц а 1

### Содержание функциональных групп в нативном лигнине древесины и биолигнине бурой гнили ели, % [7]

The content of functional groups in native lignin of wood and biolignin of brown rot of spruce, % [7]

Функциональная группа	Нативный лигнин	Биолигнин «бурой гнили»
—OCH <sub>3</sub>	15,11	9,67
α-C=O	0,07	0,14
—COOH	0,1	0,23
Общие —OH	1,16	1,36
Фенольные —OH	0,24	0,58
Алифатические —OH	0,92	0,78

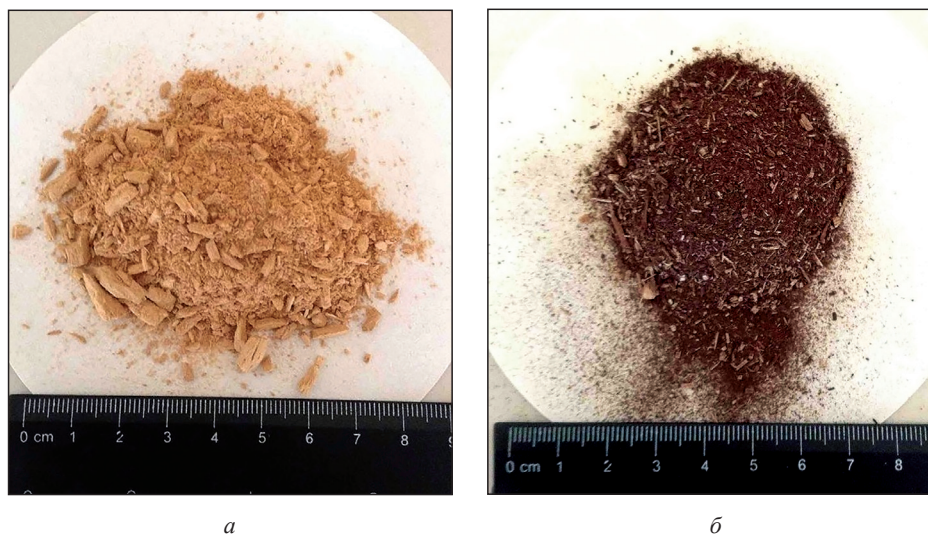
сульфитной делигнификации древесины. Однако их введение резко повышает зольность готового продукта, что крайне нежелательно [9]. Близость химической природы экстрактивных веществ «бурой гнили» и указанных соединений, с наличием высоколабильного «биолигнина» в ней, позволило предположить возможность реакций, приводящих к структурированию гидролизного лигнина в процессе пиролиза с получением кондиционного угля-сырца. Несмотря на потерю большого количества функциональных групп, гидролизный лигнин содержит в своем составе ароматические циклы, способные вступать в реакции конденсации с карбонильными группами биолигнина «бурой гнили» при высоких температурах пиролиза, а фенольные экстрактивные вещества «бурой гнили» могут выступать в качестве сшивающих агентов [10]. Остаточная углеводная часть «бурой гнили» в результате термораспада будет образовывать альдегидные соединения, которые так же могут выступать в качестве активных компонентов.



**Рис. 2.** Возможные пути взаимодействия фрагментов биолигнина «бурой гнили» с ее экстрактивными веществами: *a* — полиоксифенолы; *b* — карбонилсодержащие соединения; *c* — продукты дегидратации пентозанов; *d* — карбоксилсодержащие соединения

**Fig. 2.** Possible ways of interaction of fragments of «brown rot» biolignin with its extractive substances: *a* — polyoxyphenols; *b* — carbonyl-containing compounds; *c* — products of pentosan dehydration; *d* — carboxyl-containing compounds





**Рис. 3.** Отходы механической и химической переработки древесины: *а* — «бурая гниль»; *б* — гидролизный лигнин  
**Fig. 3.** Waste of mechanical and chemical processing of wood: *a* — «brown rot»; *b* — hydrolytic lignin

Взаимодействие такого модификатора, как «бурая гниль», с гидролизным лигнином, предположительно, поможет хотя бы частично восстановить его утраченную надмолекулярную структуру и уменьшить степень обгара получаемого угля-сырца при его дальнейшей активации.

На процесс пиролиза лигнина оказывают влияние его многочисленные функциональные группы, изменения которых в результате различных термолитических превращений протекают параллельно. Для пиролиза лигнина характерны два противоположных процесса: 1) расщепление макромолекулы с образованием низкомолекулярных продуктов; 2) конденсация с участием гидроксильных и карбонильных групп. Термораспад макромолекулы лигнина протекает сначала с участием наименее устойчивых связей, а затем с участием наиболее прочных связей [11].

Пиролитические превращения лигнина протекают в интервале температур 150...300 °С. Реакции при этом подразделяются на реакции первичной конденсации, начинающиеся при температуре 150 °С, и реакции вторичной конденсации, начинающиеся при температуре 300 °С [12]. Наиболее лабильны при пиролизе простые эфирные β–O–4 связи, деструкция которых начинается при температурах порядка 150...220 °С и достигает максимума при 280...300 °С. Углерод-углеродные связи более устойчивы и тормозят образование летучих веществ при пиролизе. Наименее устойчивы из них связи β–γ, что приводит к отщеплению углеродного атома при температурах 250...280 °С, а при температуре 350 °С уже происходит расщепление связей α–β. Наиболее прочные α–5 и 5–5' связи разрушаются

Т а б л и ц а 2

**Выход угля-сырца из шихты при разных значениях температуры карбонизации, °С**

The output of raw coal from the charge at different carbonization temperature values, °С

Состав сырья	Температура карбонизации, °С				
	350	400	450	500	550
Бурая гниль (БГ)	43,53	23,53	12,49	11,54	9,53
50 % БГ/50 % ГЛ	49,854	23,273	21,345	14,303	9,45
25 % БГ/75 % ГЛ	55,522	37,015	25,377	20,103	16,915
13 % БГ/87 % ГЛ	60,221	38,067	35,959	24,621	22,021
Гидролизный лигнин (ГЛ)	59,6	40,336	33,33	25,17	21,99

при температурах, начиная от 400...450 °С, вплоть до 600 °С (рис. 4) [13, 14].

Остаточная целлюлоза, находящаяся в гидролизном лигнине, представлена в основном кристаллической фазой, вследствие того, что гидролитическая деструкция целлюлозы под действием разбавленных минеральных кислот проходит в аморфных областях, диффузия реагентов в которые значительно выше, чем в кристаллиты [15]. Кристаллическая часть целлюлозы начинает превращаться в аморфную при температурах 270...280 °С. При температуре 340 °С происходит полная аморфизация, после чего начинается формирование структуры угля. При достижении температур 400...450 °С выделение жидких и газообразных продуктов заканчивается. Основным процессом деструкции является деполимеризация с образованием левоглюкозана (1,6-ангидроглюко-

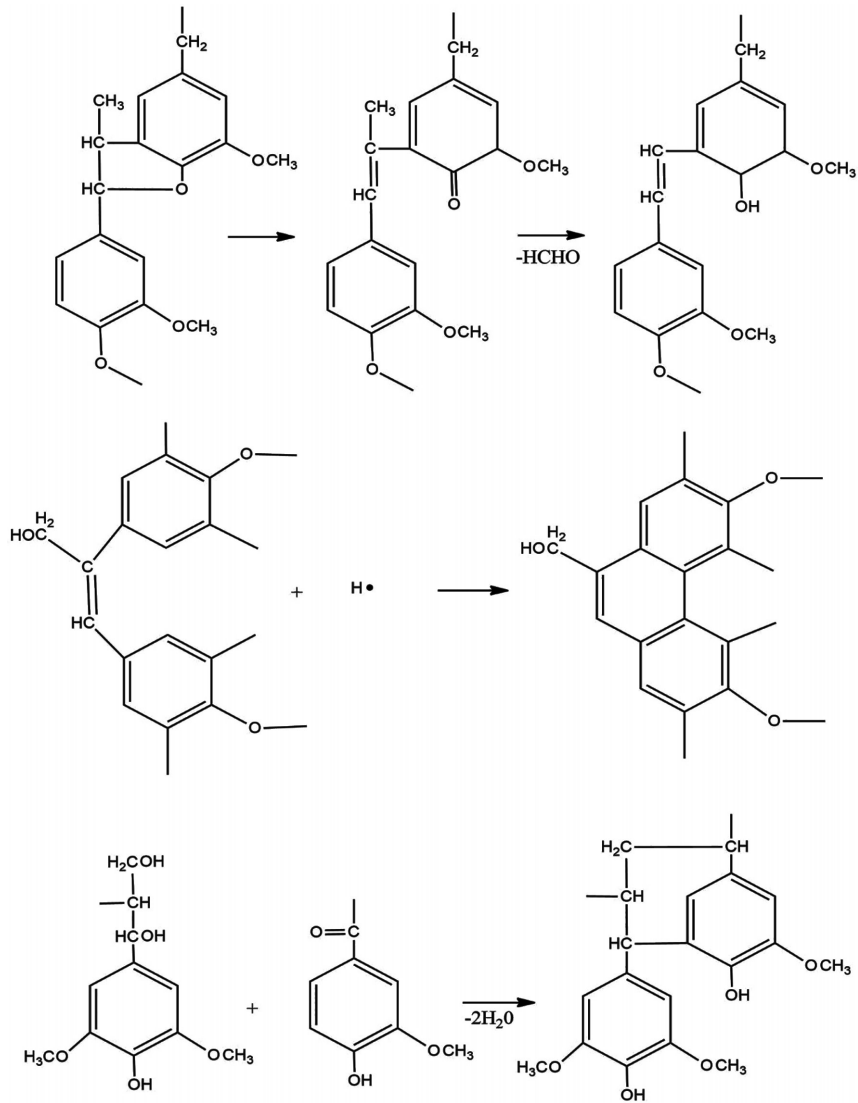


Рис. 4. Схемы превращения структур лигнина при пиролизе  
 Fig. 4. Schemes of lignin structures transformations during pyrolysis

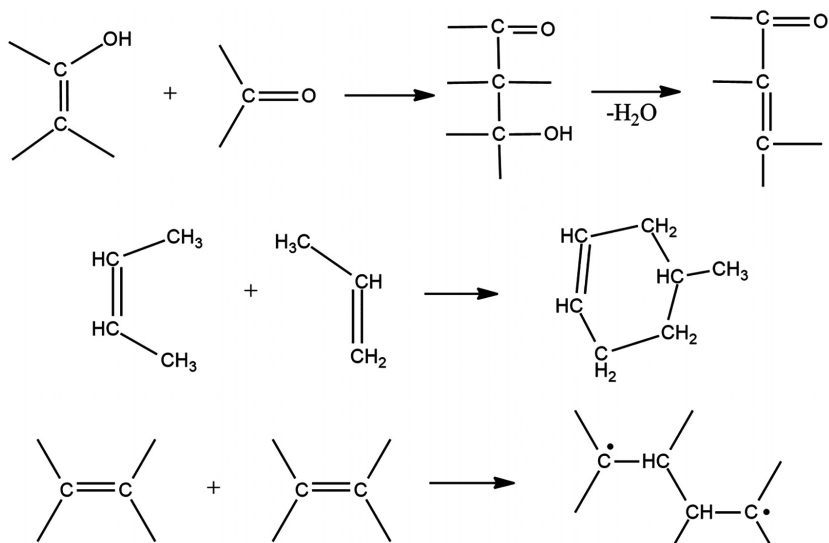
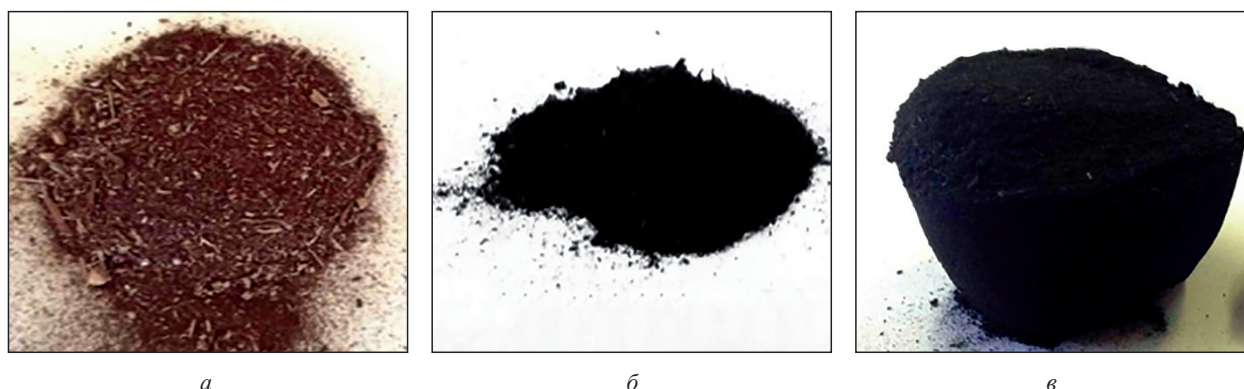


Рис. 5. Схема превращений структур целлюлозы при пиролизе  
 Fig. 5. The scheme of cellulose structure transformations during pyrolysis



**Рис. 6.** Гидролизный лигнин (а) и уголь-сырец из гидролизного (б) и модифицированного гидролизного лигнина 12,5 % «бурой гнили» (в)  
**Fig. 6.** Hydrolyzed lignin (a); raw coal from hydrolyzed lignin (b) and from modified hydrolytic lignin 12,5 % «brown rot» (c)

пиранозы), который, в свою очередь, подвергается деструкции с образованием других соединений. Формирование угольного остатка из целлюлозы может происходить в результате химических превращений, представленных на рис. 5 [16].

Исследование влияния содержания гидролизного лигнина в исходной шихте с «бурой гнилью» на выход угля-сырца позволило получить результаты, представленные в табл. 2.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, можно констатировать, что при оптимальной температуре пиролиза 450 °С «бурая гниль» дает очень незначительное количество угля-сырца, по-видимому, вследствие большого содержания низкомолекулярных кислородсодержащих соединений. При увеличении содержания гидролизного лигнина в шихте от 50 до 87,5 % происходит закономерное увеличение выхода угля-сырца за счет возрастания доли высокосконденсированного углеродного компонента, каковым является гидролизный лигнин [17, 18]. Однако исходная шихта, состоящая только из технического гидролизного лигнина, дает выход угля-сырца примерно на 3 % ниже, чем с добавкой 12,5 % «бурой гнили». Это может свидетельствовать о том, что низкомолекулярные соединения, содержащиеся в «бурой гнили», вступают в качестве сшивающих агентов и увеличивают количество конденсированных структур, что и приводит к увеличению выхода угля-сырца.

Взаимодействие гидролизного лигнина с веществами «бурой гнили» доказывает так же непропорциональное снижение выхода угля-сырца при увеличении ее доли в шихте и, что самое главное, внешний вид угля, который спекается в результате пиролиза и не образуется в виде мелкодисперсного порошка (рис. 6).

При анализе данных обуглероживания «бурой гнили» очевидно интенсивное снижение выхода угля-сырца при повышении температуры карбонизации. Это свидетельствует о большом

Т а б л и ц а 3

**Массовая доля нелетучего углерода, %**  
**Mass fraction of non-volatile carbon, %**

Состав сырья	Температура карбонизации, °С				
	350	400	450	500	550
Чистая бурая гниль (БГ)	64,7	60	57	80	83,3
50 % БГ/50 % ГЛ	69,55	68,75	42,1	11,4285	40
25 % БГ/75 % ГЛ	31,57	31,25	50	28,125	19
13 % БГ/87 % ГЛ	41,86	51,724	25	25	17,24
Чистый гидролизный лигнин (ГЛ)	72,09	51,6	50	18,91	17,24

Т а б л и ц а 4

**Массовая доля летучего углерода, %**  
**Mass fraction of volatile carbon, %**

Состав сырья	Температура карбонизации, °С				
	350	400	450	500	550
Бурая гниль (БГ)	33,83	38,53	41,53	18,53	15,23
50 % БГ/50 % ГЛ	25	25,75	52,465	82,9365	54,565
25 % БГ/75 % ГЛ	61,01	61,33	42,583	64,16	73,5825
13 % БГ/87 % ГЛ	52,893	45,203	66,63	66,2	74,39
Гидролизный лигнин (ГЛ)	18,51	39	40,6	71,69	73,36

содержанию как низкомолекулярных кислородсодержащих веществ, так и сильно окисленной поверхностной структуры «бурой гнили». Данная зависимость справедлива и при обуглероживании гидролизного лигнина, однако интенсивность

процесса в данном случае значительно ниже, поскольку содержание низкомолекулярных веществ, легко превращающихся в газообразные продукты, в гидролизном лигнине значительно ниже и окисленность его поверхности незначительна. При добавлении бурой гнили в исходное сырье выход угля-сырца не только не снижается, как можно было бы предположить, а в некоторых случаях еще и увеличивается, что так же свидетельствует о химическом взаимодействии веществ «бурой гнили» с гидролизным лигнином.

Полученные образцы угля-сырца были проанализированы в целях определения содержания в них нелетучего углерода и летучих веществ (табл. 3, 4).

При определении содержания массовой доли нелетучего углерода обнаружен максимум его содержания в угле-сырце, полученном из «бурой гнили» при температуре 450 °С. Более низкие температуры карбонизации дают меньшее содержание углерода вследствие незавершенности процессов конденсации низкомолекулярных и высокомолекулярных фракций биолигнина «бурой гнили», а более высокие температуры (500...550 °С) приводят, по видимому, к разрушению этих структур и, как следствие, к снижению выхода угля-сырца. Что касается угля-сырца из гидролизного лигнина, то вследствие высокой сконденсированности его макромолекул, наблюдается закономерное возрастание доли нелетучего углерода с увеличением температуры карбонизации.

Выбор оптимальной температуры карбонизации 450 °С обусловлен как максимальным содержанием нелетучего углерода в угле из «бурой гнили», так и в угле, получаемом из композиции с содержанием «бурой гнили» 12,5%. Это подтверждает, что «бурую гниль», имеющую многокомпонентный состав, можно использовать как эффективный модификатор гидролизного лигнина при карбонизации, в целях получения из него кондиционного угля-сырца.

Полученный уголь-сырец был подвержен ситовому анализу для определения его фракционного состава. Зависимость фракционного состава получаемого угля-сырца от содержания «бурой гнили» в шихте представлена на рис. 7.

Фракционный состав не зависит от температуры, но с увеличением содержания «бурой гнили» закономерно увеличивается доля фракций более 2 мм. При увеличении ее содержания выше 17,5 % фракционный состав изменяется незначительно. Отсутствие влияния температуры в исследуемом интервале на фракционный состав свидетельствует о том, что «сшивание» макромолекул лигнина проходит при температурах ниже 300 °С, что связано с изменением функционального

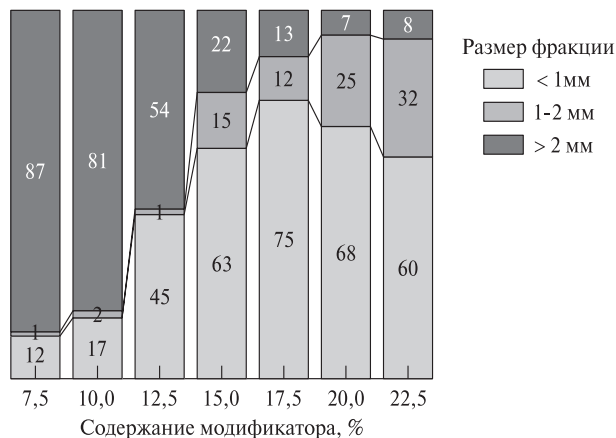


Рис. 7. Гистограммы зависимости фракционного состава угля-сырца от содержания «бурой гнили» в исходной шихте при температуре пиролиза 450 °С

Fig. 7. Histograms of the fractional composition dependence of raw coal on the brown rot content in the initial charge at a pyrolysis temperature of 450 °С

состава лигнина [18]. Как показано на гистограммах (рис. 7), при увеличении содержания «бурой гнили» выше 17,5 % начинает снижаться доля фракции размером более 2 мм и увеличивается доля фракции размером от 1 до 2 мм, что связано с уменьшением прочности получаемых гранул и их частичным разрушением при проведении ситового анализа. Низкая прочность и высокая хрупкость древесины с «бурой гнилью» дает возможность легко ее гомогенизировать до порошкообразного состояния. Однако участки древесины, не подвергшиеся действию целлюлолитических ферментов гриба и содержащие полисахаридную составляющую, не измельчаются в порошок [19]. Аналогичные процессы могут наблюдаться при получении технологической щепы из древесины с участками «бурой гнили».

В результате сепарации измельченной древесины будет получена кондиционная технологическая щепка и порошкообразный продукт, включающий как мелкодисперсную «бурую гниль», так и частицы здоровой древесины, содержащей целлюлозу. Такой технологический вид отходов, по нашему мнению, можно использовать в качестве сырья для получения лигноуглеводных пластиков. В этой композиции роль армирующего волокнистого компонента будут выполнять частицы здоровой древесины, а своеобразного связующего — мелкодисперсная «бурая гниль» [20, 21]. Наличие в последней и высоколабильного биолигнина, и реакционноспособных низкомолекулярных фенольных соединений, подтвердивших свою активность при получении угля-сырца, может позволить реализовать химические процессы начальной стадии пиролиза в режимах пьезотермической обработки получения композиционных пластиков [22].



**Физико-механические характеристики биопластиков, полученных из микологически разрушенной дрессины ели с «бурой гнилью»**

**Physico-mechanical characteristics of bioplastics obtained from mycologically destroyed spruce wood with «brown rot»**

Состав композиции, %		Физико-механический показатель			
Здоровая дрессина	«Бурая гниль»	Предел прочности при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Водопоглощение при 20 °С за 24 часа, %	Разбухание при 20 °С за 24 часа, %
0	100	3,45	6,90	13,9	12,0
25	75	6,08	7,20	16,2	13,5
50	50	15,53	10,11	17,47	14,5
75	25	18,07	6,10	21,78	18,0
100	0	–	–	–	–

Для реализации теоретических предпосылок были составлены прессовочные композиции, состоящие из определенных пропорций измельченной здоровой дрессины и мелкодисперсной «бурой гнили», подвергшиеся горячему прессованию в режиме получения композиционных фенопластов при температуре 150 °С и давлении 40 МПа [23] (табл. 5).

Как следует из табл. 5, в результате эксперимента были получены биопластики с приемлемыми прочностными показателями, значения которых закономерно возрастали с увеличением содержания здоровой дрессины как армирующего агента. Однако из композитов со 100%-м содержанием здоровой дрессины биопластик не был получен. Следовательно, «бурая гниль», как и предполагалось, выполняет функцию гидрофобного связующего, о чем дополнительно свидетельствует закономерное возрастание водопоглощения и разбухания при снижении ее содержания в прессовочных композициях. Оптимально соотношение компонентов находится в пределах 50/50, при котором получаемый биопластик обладает достаточно высокой прочностью и водостойкостью (рис. 8).

Из предыдущих исследований известно, что экстрактивные вещества «бурой гнили» чрезвычайно многообразны, а их содержание в ней в некоторых случаях достигает почти 50 % [10]. Особенно хорошо они извлекаются водой и щелочными растворами в виде фенолятов. Высокая реакционная способность этих веществ подтверждает их нестабильность при выпаривании экстрактов. Так, после полного удаления воды, сухой остаток экстракта не удается полностью растворить в исходном объеме растворителя, что свидетельствует о конденсационных процессах с участием экстрактивных веществ.

Этот эффект был использован при синтезе олигомеров в условиях получения резолов с использованием упаренных щелочных экстрактов



**Рис. 8.** Биопластик из прессмассы, включающей в себя 50 % здоровой дрессины и 50 % «бурой гнили»

**Fig. 8.** Bioplastics from a press-mass with 50 % healthy wood and 50 % «brown rot»



**Рис. 9.** Предконденсат из экстрактивных веществ «бурой гнили» и параформа

**Fig. 9.** Precondensate from extractive substances of «brown rot» and paraform

и параформа [24]. В результате были получены высоковязкие предконденсаты, переходящие в неплавкое состояние при последующем нагревании (рис. 9).



Этот факт лишний раз подтверждает высокую реакционную способность экстрактивных веществ «бурой гнили» и возможность использования древесины с «бурой гнилью» разных стадий ее развития в качестве прессовочных композиций для получения биопластиков без применения связующего.

## Выводы

Древесину с «бурой гнилью» можно использовать в качестве структурирующего агента гидролизного лигнина при его пиролизе.

Древесные композиции с включением «бурой гнили» можно использовать при получении биопластиков.

Экстрактивные вещества «бурой гнили» могут быть заменителями фенолов при синтезе фенолформальдегидных олигомеров.

## Список литературы

- [1] Aguiar A., Gavioli D., Ferraz A. Extracellular activities and wood component losses during *Pinus taeda* biodegradation by the brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum* // *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2013, v. 82, no. 8, pp. 187–191.
- [2] Nakazawa T., Izuno A., Horii M. Effects of pex1 disruption on wood lignin biodegradation, fruiting development and the utilization of carbon sources in the white-rot Agaricomycete *Pleurotus ostreatus* and non-wood decaying Coprinopsis cinerea // *Fungal Genetics and Biology*, 2017, v. 82, no. 12, pp. 7 – 15.
- [3] WenXu J., DongDing Y., LiLi S., Mao R. Amount and biodegradation of dissolved organic matters leached from tree branches and roots in subtropical plantations of China // *Forest Ecology and Management*, 2021, v. 484, no. 3, pp. 11–28.
- [4] Грабакина О.А., Бабкин В.А., Медведева С.А., Иванова С.З. Деструкция грибом *Sporotrihium Pulverulentum* алкиларилэфирных димерных модельных соединений лигнина с карбонильной группой // *Химия древесины*, 1987. № 5. С. 34–40.
- [5] Кононов Г.Н. Химия древесины и ее основных компонентов. Лабораторный практикум. М.: МГУЛ, 2005. 138 с.
- [6] Григорьев О.Н., Федотова А.И. Лабораторный практикум по технологии пластических масс. В 2 т. М.: Высшая школа, 1977. Т. 2. 264 с.
- [7] Кононов Г.Н. Дендрохимия. Химия, нанохимия и биогенхимия компонентов клеток, тканей и органов древесных растений. В 2 т. М.: МГУЛ, 2015. Т. 2. С. 481–1111.
- [8] Ганбаров Х.Г., Мурадов П.З., Самедова Р.Ф., Мамедьяров М.А. Биоконверсия обрезков виноградной лозы дереворазрушающими базидиальными грибами // *Химия древесины*, 1987. № 1. С. 61–64.
- [9] Кононов Г.Н., Мазитов Л.А., Климов В.С. Пиролиз лигносодержащего сырья // *Науч. тр. МГУЛ. Вып. 273*. М.: МГУЛ, 1994. С. 56–59.
- [10] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Зайцев В.Д., Горячев Н.Л., Воликова А.С. Поведение экстрактивных веществ «бурой гнили» при термических воздействиях и возможные пути их использования // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2019. Т. 23. № 1. С. 102–109. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-102-109
- [11] Лигнины (структура, свойства и реакции) / под ред. К.Б. Сарканена, К.Х. Людвиг. М.: Лесная пром-сть, 1975. 630 с.
- [12] Кислицын А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. М.: Лесная пром-сть, 1990. 312 с.
- [13] Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров. СПб.: Лань, 2010. 624 с.
- [14] Боголищын К.Г. Физическая химия лигнина. Архангельск: Академкнига, 2010. 492 с.
- [15] Целлюлоза и ее производные. В 2 т. / под ред. Н. Байкля, Л. Сегала. М.: Мир, 1974. Т. 2. 512 с.
- [16] Дайнеко И.П. Химические превращения целлюлозы при пиролизе // *ИВУЗ Лесной журнал*, 2004. № 4. С. 97–112.
- [17] Чудаков В.И. Промышленное использование лигнина. М.: Лесная пром-сть, 1983. 200 с.
- [18] Кононов Г.Н., Зарубина А.Н., Зайцев В.Д. Влияние технологических факторов на процесс пиролиза модифицированного гидролизного лигнина // *Тез. докл. Междунар. конф. «Леса России: политика, промышленность, наука, образование»*, Санкт-Петербург, 16–18 июня 2020 г. СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 142–143.
- [19] Озолия Н.Р., Сергеева В.Н., Хохолко С.В., Абрамович Ц.Л. Изменение лигнина древесины березы при поражении ее грибом *Coriolus Hirsutus* // *Химия древесины*, 1988. № 4. С. 74–79.
- [20] Кононов Г.Н., Зайцев В.Д. Микологически разрушенная древесина как перспективное органическое сырье // *Тез. докл. Междунар. конф. «Леса России: политика, промышленность, наука, образование»*, 22–24 мая 2019 г. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2019. С. 292–294.
- [21] Билай В.И. Трансформация целлюлозы грибами. Киев: Наукова думка, 1982. 295 с.
- [22] Микелиз древесины, его продукты и их использование // *Тез. докл. Междунар. конф. «Лесной комплекс в цифровой экономике»*, Москва, 02–05 декабря 2019 г. М.: Научные технологии, 2019. С. 91–94.
- [23] Рабинович М.Л., Болобова А.В., Кондращенко В.И. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. Кн. 1. Древесина и разрушающие ее грибы. М.: Наука, 2001. 264 с.
- [24] Азаров В.И., Винославский В.А., Кононов Г.Н. Лабораторный практикум по химии древесины и синтетических полимеров. М.: МГУЛ, 2006. 248 с.

## Сведения об авторах

**Кононов Георгий Николаевич** <sup>✉</sup> — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), чл.-корр. РАЕН, ученый секретарь секции «Химия и химическая технология дресины» РХО им. Д.И. Менделеева, kononov@mgul.ac.ru

**Веревкин Алексей Николаевич** — канд. хим. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), verevkin@mgul.ac.ru

**Сердюкова Юлия Владимировна** — ст. преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), serdykova@mgul.ac.ru

**Петухов Владимир Алексеевич** — студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), poroviviv24@gmail.com

**Горячев Никита Леонидович** — канд. техн. наук, руководитель испытательного центра целлюлозно-бумажной продукции ОАО «ЦНИИБ», nlgoryachev@bk.ru

Поступила в редакцию 28.03.2022.

Одобрено после рецензирования 08.04.2022.

Принята к публикации 23.05.2022.

## MYCOLYSIS OF WOOD, ITS PRODUCTS AND THEIR USE.

V. «BROWN ROT» OF WOOD AS A NATURAL COMPOSITE  
AND SOURCE OF INTERMEDIATES

G.N. Kononov<sup>1✉</sup>, A.N. Verevkin<sup>1</sup>, Yu.V. Serdyukova<sup>1</sup>, V.A. Petukhov<sup>1</sup>, N.L. Goryachev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>JSC «TSNIB», 15/1, Lenin st., 141260, Pravdinsky settlement, Moscow reg., Russia

kononov@mgul.ac.ru

The article is devoted to the consideration of possible ways of using wood with «brown rot» as a natural product enriched with a vitamin component. The results of the study of the pyrolysis process of such mycologically destroyed wood, as a modifier of hydrolytic lignin in the production of raw coal from it, are presented. Studies have been carried out on the piezothermic processing of this natural composite in order to obtain ligno-hydrocarbon plastics from it. The possibility of using extractive substances of «brown rot» in the production of lignoformaldehyde oligomers has been studied. This article is the fifth in the cycle «Mycolysis of wood, its products and their use», the previous ones were published in the journal «Forestry Bulletin», 2020, vol. 24, No. 2, No. 5 and 2021, vol. 25, No. 1, No. 5. **Keywords:** biolignin, hydrolytic lignin, technological waste, raw coal, lingo-carbohydrate plastic, lingo-formaldehyde oligomers

**Suggested citation:** Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Petukhov V.A., Goryachev N.L. *Mikoliz drесины, ego produkty i ikh ispol'zovanie. V. «Buraya gnil'» drесины kak prirodnyy kompozit i istochnik poluproduktov* [Mycolysis of wood, its products and their use. V. «Brown rot» of wood as a natural composite and source of intermediates]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 4, pp. 92–102. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-92-102

## References

- [1] Aguiar A., Gavioli D., Ferraz A. Extracellular activities and wood component losses during Pinus taeda biodegradation by the brown-rot fungus Gloeophyllum tradeum. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2013, v. 82, no. 8, pp. 187–191.
- [2] Nakazawa T., Izuno A., Horii M. Effects of pex1 disruption on wood lignin biodegradation, fruiting development and the utilization of carbon sources in the white-rot Agaricomycete Pleurotus ostreatus and non-wood decaying Coprinopsis cinerea. *Fungal Genetics and Biology*, 2017, v. 82, no. 12, pp. 7–15.
- [3] WenXu J., DongDing Y., LiLi S., Mao R. Amount and biodegradation of dissolved organic matters leached from tree branches and roots in subtropical plantations of China. *Forest Ecology and Management*, 2021, v. 484, no. 3, pp. 11–28.
- [4] Grabakina O.A., Babkin V.A., Medvedeva S.A., Ivanova S.Z. *Destruksiya gribom Sporotrihium Pulverulentum alkilarilefirnykh dimernykh model'nykh soedineniy lignina s karbonil'noy gruppoy* [Destruction by the fungus Sporotrihium Pulverulentum of alkylaryl ether model compounds of lignin with a carbonyl group]. *Khimiya drесины* [Chemistry of wood], 1987, no. 5, pp. 34–40.
- [5] Kononov G.N. *Khimiya drесины i ee osnovnykh komponentov. Laboratornyy praktikum* [Chemistry of wood and its main components]. Moscow: MGUL, 2005, 138 p.
- [6] Grigor'ev O.N., Fedotova A.I. *Laboratornyy praktikum po tekhnologii plasticheskikh mass* [Laboratory workshop on plastic mass technology]. In 2 t. Moscow: Higher School, 1977, v. 2, 264 p.
- [7] Kononov G.N. *Dendrokimiya. Khimiya, nanokhimiya i biogeokhimiya komponentov kletok, tkaney i organov drесинnykh rasteniy* [Chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of components of cells, tissues and organs of woody plants]. In 2 t. Moscow: MGUL, 2015, v. 2, p. 481–1111.

- [8] Ganbarov Kh.G., Muradov P.Z., Samedova R.F., Mamed'yarov M.A. *Biokonversiya obrezkov vinogradnoy lozy derevorazrushayushchimi bazidial'nymi gribami* [Bioconversion of vine trimmings by wood-destroying basidial fungi]. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of wood], 1987, no. 1, pp. 61–64.
- [9] Kononov G.N., Mazitov L.A., Klimov V.S. *Piroliz ligninosoderzhashchego syr'ya* [Pyrolysis of lignin-containing raw materials]. *Nauchnye trudy MGUL* [Scientific works of MGUL]. Iss. 273. Moscow: MSFU, 1994, pp. 56–59.
- [10] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Zaitsev V.D., Goryachev N.L., Volikova A.S. *Povedenie ekstraktivnykh veshchestv «buroy gnili» pri termicheskikh vozdeystviyakh i vozmozhnye puti ikh ispol'zovaniya* [Extractive substances behavior of «brown rot» under thermal exposure and possible ways of their use]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 102–109. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-102-109.
- [11] *Ligniny (struktura, svoystva i reaktsii)* [Lignins (structure, properties and reactions)]. Ed. K.B. Sarkanen, K.H. Ludwig. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1975, 630 p.
- [12] Kislytsyn A.N. *Piroliz drevesiny: khimizm, kinetika, produkty, novye protsessy* [Pyrolysis of wood: chemistry, kinetics, products, new processes]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1990, 312 p.
- [13] Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. *Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Chemistry of wood and synthetic polymers]. Petersburg: Lan', 2010, 624 p.
- [14] Bogolitsyn K.G. *Fizicheskaya khimiya lignina* [Physical chemistry of lignin]. Arkhangel'sk: Akademkniga, 2010, 492 p.
- [15] *Tsellyuloza i ee proizvodnye. V 2 t.* [Cellulose and its derivatives. In 2 v.]. Ed. N. Baykles, L. Segal. Moscow: Mir, 1974, v. 2, 512 p.
- [16] Dayneko I.P. *Khimicheskie prevrashcheniya tsellyulozy pri pirolize* [Chemical transformations of cellulose during pyrolysis]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2004, no. 4, pp. 97–112.
- [17] Chudakov V.I. *Promyshlennoe ispol'zovanie lignina* [Industrial use of lignin]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1983, 200 p.
- [18] Kononov G.N., Zarubina A.N., Zaytsev V.D. *Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na protsess piroliza modifitsirovannogo gidroliznogo lignina* [The influence of technological factors on the pyrolysis process of modified hydrolytic lignin]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii «Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie»* [Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii «Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie»], Sankt-Peterburg, 16–18 Juny 2020 g. St. Petersburg: Politekh-Press, 2020, pp. 142–143.
- [19] Ozolinya N.R., Sergeeva V.N., Khokholko S.V., Abramovich Ts.L. *Izmenenie lignina drevesiny berezy pri porazhenii ee gribom Coriolus Hirsutus* [The change in the lignin of birch wood when it is affected by the fungus Coriolus Hirsutus]. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of wood], 1988, no. 4, pp. 74–79.
- [20] Kononov G.N., Zaytsev V.D. *Mikologicheski razrushennaya drevesina kak perspektivnoe organicheskoe syr'e* [Mycologically destroyed wood as a promising organic raw material]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii «Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie»* [Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii «Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie»], St. Petersburg, 22–24 May 2019 g. St. Petersburg: SPbGLTU, 2019, p. 115.
- [21] Bilay V.I. *Transformatsiya tsellyulozy gribami* [Transformation of cellulose by fungi]. Kiev: Naukova dumka, 1982, 295 p.
- [22] *Mikoliz drevesiny, ego produkty i ikh ispol'zovanie* [Mycolysis of wood, its products and their use]. *Tezisy Mezhdunarodnoy konferentsii «Lesnoy kompleks v tsifrovoy ekonomike»* [Abstracts of the international conference «Forest complex in the Digital Economy»], Moskva, 02–05 dekabrya 2019 g. Moscow: Nauchnye tekhnologii, 2019, pp. 91–94.
- [23] Rabinovich M.L., Bolobova A.V., Kondrashchenko V.I. *Teoreticheskie osnovy biotekhnologii drevesnykh kompozitov. Kn. 1. Drevesina i razrushayushchie ee griby* [Theoretical foundations of biotechnology of wood composites. Book 1. Wood and its destroying fungi]. Moscow: Nauka, 2001, 264 p.
- [24] Azarov V.I., Vinoslavskiy V.A., Kononov G.N. *Laboratornyy praktikum po khimii drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Laboratory workshop on chemistry of wood and synthetic polymers]. Moscow: MGUL, 2006, 248 p.

## Authors' information

**Kononov Georgiy Nikolaevich** ✉ — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, the Scientific Secretary of Section «Chemistry and engineering chemistry of wood» RHO of D.I. Mendeleev, kononov@mgul.ac.ru

**Verevkin Aleksey Nikolaevich** — Cand. Sci. (Chemical), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), verevkin@mgul.ac.ru

**Serdyukova Yuliya Vladimirovna** — Senior Lecturer of the BMSTU (Mytishchi branch), serdyukova@mgul.ac.ru

**Petukhov Vladimir Alekseevich** — Student of the BMSTU (Mytishchi branch), popoviviv24@gmail.com

**Goryachev Nikita Leonidovich** — Cand. Sci. (Tech.), Head of the Testing Center for pulp and paper products of the JSC «TSNIIB», nlgoryachev@bk.ru

Received 28.03.2022.

Approved after review 08.04.2022.

Accepted for publication 23.05.2022.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
 The authors declare that there is no conflict of interest